

流れ場が変化する地盤浸透流の解析方法に関する研究

2014年3月

埼玉大学大学院理工学研究科（博士後期課程）

理工学専攻（主指導教員 渡辺 邦夫）

今 井 久

目 次

1. 序章	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
1.2.1 テーマ 1	3
1.2.2 テーマ 2	3
1.2.3 テーマ 3	3
1.2.4 テーマ 4	3
1.3 本論文の構成	4
2. 地下水流動特性と浸透流解析	6
2.1 地下水の存在形態	6
2.2 飽和と不飽和	8
2.3 浸透流の支配方程式	9
2.3.1 水頭の表示	9
2.3.2 ダルシーの法則	10
2.3.3 Darcy 流速と実際の地下水流速	11
2.3.4 透水異方性	12
2.3.5 連続の式（質量保存則）	14
2.3.6 地下水流動の支配方程式	16
2.4 浸透パラメータ	18
2.4.1 透水係数	18
2.4.2 比貯留係数	20
2.4.3 不飽和浸透パラメータ	23
2.5 飽和・不飽和浸透流の有限要素法による定式化	25
2.5.1 ガレルキン法を用いた有限要素法による定式化	25
2.5.2 要素マトリクス成分の計算	27
2.5.3 時間項の取り扱いと繰り返し（収束）計算	28

2.5.4 全体マトリクスの作成	30
2.6 第2章のまとめ	31
3. 不確定な境界条件設定方法の研究	32
3.1 境界条件	32
3.2 境界条件設定の課題	33
3.3 掘削切羽の進展により解析モデルの要素や節点が除去される場合	33
3.3.1 切羽進展に伴う境界条件設定の課題	33
3.4 蒸発量を考慮した地下空洞壁面の境界条件設定方法	35
3.4.1 地下空洞周辺に設定される境界条件とその課題	35
3.4.2 空洞への地下水流出量と蒸発量	36
3.4.3 解析事例	38
3.5 涵養量を考慮した広域地下水位流動表面の境界条件設定方法	43
3.6 第3章のまとめ	51
4. 岩盤の不飽和浸透パラメータ測定方法の研究	52
4.1 研究の構成	52
4.2 人工地盤試験における不飽和特性の評価	52
4.2.1 試験の目的背景	52
4.2.2 試験概要	53
4.2.3 測定値からの体積含水率の推定方法	57
4.2.4 計測結果	57
4.2.5 浸透流解析	63
4.2.6 本節のまとめ	66
4.3 岩盤の不飽和浸透パラメータ測定方法	66
4.3.1 はじめに	66
4.3.2 岩石の不飽和パラメータ	66

4.3.3 本節のまとめ	77
4.4 第4章のまとめ	80
5. 浸透流解析から地盤の沈下量を評価する解析システムの研究	81
5.1 沈下量評価システム	81
5.1.1 システム概要	81
5.1.2 沈下量算定手法	82
5.1.3 沈下量算定表計算ファイル	83
5.2 沈下量算定システムの作動確認	84
5.3 適用サイトの概要	85
5.3.1 工事概要	85
5.3.2 地質	85
5.3.3 本工事で必要な対策検討課題	87
5.4 対策工の検討	87
5.4.1 対策工	87
5.4.2 地盤沈下量推定結果	87
5.5 計測値とシミュレーション結果	88
5.5.1 揚水・注水実績	89
5.5.2 計測値とシミュレーション	89
5.6 第5章のまとめ	93
6. 長期地質環境変遷に対応した広域地下水流動解析方法の研究	95
6.1 立坑掘削影響試験への浸透流解析の適用	95
6.1.1 立坑掘削影響試験の概要	95
6.1.2 水理地質構造の概要	97
6.1.3 モデル化	100
6.1.4 解析結果	104
6.1.5 解析と実測	107
6.1.6 本節のまとめ	113

6.2 地質環境の長期的変遷を考慮した地下水流動解析方法の開発.....	115
6.2.1 地形・地質構造の形状や物性の経時変化を連続的に解析できる手法の概要.....	115
6.2.2 解析事例.....	120
6.2.3 本節のまとめ（開発したシステム SMS のまとめ）.....	125
6.3 第 6 章のまとめ.....	127
7. 結論.....	128

謝辞

参考文献

図表目次

図 1-1 現代の人間活動と地下水との関わり	2	
図 1-2 本研究の構成.....	5	
図 2-1 地下水の循環と地質構造.....	6	
図 2-2 地下水の存在形態と地質構造（地下水ハンドブック図 2.1.2 を参考に作成）	6	
図 2-3 さまざまな間隙形状（地下水ハンドブック図 2.1.1 を参考に作成）	7	
図 2-4 不飽和地下水の存在形態（地下水入門 1983 を参考に作成）	8	
図 2-5 地下水流と水頭.....	9	
図 2-6 流速と動水勾配.....	11	
図 2-7 屈曲した流路.....	11	
図 2-8 主透水係数(k'_{xx} , k'_{yy} , k'_{zz})と直交座標系 $x_i(x, y, z)$ との関係	12	
図 2-9 亀裂方向と座標.....	13	
図 2-10 走向傾斜.....	13	
図 2-11 基本体積 $dx dy dz$ への水の流入出.....	15	
図 2-12 体積含水率, サクシヨンと比水分容量.....	17	
図 2-13 提案式に基づく間隙率と透水係数の関係.....	19	
図 2-14 ホース地下水流動経路に見立てたイメージ.....	22	
図 2-15 物性の異なる場合の流出量の経時変化.....	22	
図 2-16 不飽和浸透パラメータ事例.....	25	
図 2-17 時間軸の差分法.....	28	
図 2-18 繰り返し計算を伴う解析のフロー	29	
図 2-19 1次元問題の例題.....	30	
図 3-1 堤体浸透問題における境界条件設定例.....	32	
図 3-2 掘削の進捗スケジュールと解析モデルの要素分割.....	33	
図 3-3 掘削部該当要素の飽和条件.....	34	
図 3-4 立坑掘削影響解析における全水頭の経時変化例.....	35	
図 3-5 地下空洞周辺に設定される境界条件.....	36	
図 3-6 地下水流出量の経時変化イメージ.....	38	
図 3-7 事例解析モデル形状	図 3-8 境界条件.....	39
図 3-9 空洞周辺の圧力水頭分布（掘削後 564 日, 単位 : m）	41	
図 3-10 空洞周辺の飽和度分布（掘削後 564 日）	41	
図 3-11 坑壁面上節点の流量の経時変化.....	41	
図 3-12 坑壁面上節点の圧力水頭の経時変化.....	42	
図 3-13 空洞壁面からの圧力水頭分布	図 3-14 空洞壁面からの飽和度分布.....	42
図 3-15 流出量の経時変化.....	42	
図 3-16 圧力水頭の経時変化.....	43	
図 3-17 飽和度の経時変化.....	43	

図 3-18 地表面境界条件設定と解析結果のイメージ	44
図 3-19 解析モデルの形状スケール	45
図 3-20 設定した境界条件	45
図 3-21 設定した不飽和特性	45
図 3-22 case1	47
図 3-23 case2	48
図 3-24 case3	49
図 3-25 case4	50
図 3-26 重力式ダム基礎岩盤の浸透流解析時の境界条件設定	51
図 4-1 本章における研究の構成	52
図 4-2 人工地盤構築状況	53
図 4-3 人工地盤の形状，計器設置位置	54
図 4-4 人工地盤での測定状況	54
図 4-5 川砂の p F 試験結果と V G 式で表現した相対透水係数と比水分容量	55
図 4-6 使用したセンサーと設置状況	56
図 4-7 計測期間を通じて計測された項目	59
図 4-8 ADR, RADAR, TDR で計測された体積含水率分布の比較	60
図 4-9 テンシオメータで計測されたサクションから推定した体積含水率と	61
図 4-10 解析対象領域と要素分割	63
図 4-11 第 2 期間の体積含水率の分布の変化	64
図 4-12 第 3 期間の体積含水率の分布（その 1）	64
図 4-13 テンシオメータ SUC3,4 による圧力水頭の比較	65
図 4-14 ADR3,4 による体積含水率の比較	65
図 4-15 泥岩 1 の水分特性曲線 図 4-16 泥岩 1 の比透水係数	69
図 4-17 花崗岩 3 の水分特性曲線	69
図 4-18 砂岩の水分特性曲線	70
図 4-19 水銀圧入により測定された白浜砂岩の間隙径分布（高橋，林 2004）	70
図 4-20 土柱法と加圧板法の試験装置	71
図 4-21 サイクロメータ法での測定概要	71
図 4-22 試験 1 の概要	72
図 4-23 試験 1 の概要（センサーの設置状況）	72
図 4-24 試験 1 の概要写真	73
図 4-25 試験 2 の概要 ²¹⁾	74
図 4-26 コアと含水比測定分割状況	74
図 4-27 蒸発量測定状況	74
図 4-28 測定された蒸発量	76
図 4-29 測定されたサクションと解析結果	76

図 4-30 測定されたサクションと解析結果.....	77
図 4-31 測定されたサクションと解析結果.....	78
図 4-32 岩石の不飽和浸透パラメータ評価の流れ.....	79
図 4-33 不飽和状態における水分フラックスの構成.....	79
図 5-1 システムのフロー.....	82
図 5-2 沈下量算定イメージ.....	83
図 5-3 簡易沈下算定システムファイル.....	83
図 5-4 砂質土に適用する圧力と間隙比の関係（日本道路公団 1998）.....	84
図 5-5 例題モデルの形状・算定結果.....	85
図 5-6 対象サイトの平面図.....	86
図 5-7 対象サイトの地質構造.....	86
図 5-8 対策工を実施しない場合の表層面の沈下量分布コンタ.....	88
図 5-9 a-a' 断面での沈下量分布.....	88
図 5-10 全揚水・注水量と注水／揚水の比率.....	91
図 5-11 地下水の実績と解析.....	91
図 5-12 層別沈下計設置位置概要.....	92
図 5-13 JW1 での沈下量測定結果.....	92
図 5-14 JW2 での沈下量測定結果.....	92
図 5-15 JW1 での沈下量とシステム算定結果.....	93
図 5-16 JW2 での沈下量とシステム算定結果.....	93
図 5-17 粘土層からの排水量から算定した沈下量.....	94
図 5-18 JW1 での比貯留係数を変化させた場合の沈下量の変化.....	94
図 6-1 解析対象領域の平面図.....	96
図 6-2 立坑・坑道の地下における位置関係と地質構造.....	97
図 6-3 地質構造断面図.....	98
図 6-4 ボーリング孔内での透水係数，全水頭分布と地質構造.....	99
図 6-5 メッシュ分割図.....	100
図 6-6 設定した不飽和浸透特性.....	101
図 6-7 水理地質構造モデル.....	102
図 6-8 境界条件の概要	図 6-9 ボーリング孔部に設定した境界条件..... 103
図 6-10 初期条件設定用定常解析結果からの水収支.....	103
図 6-11 初期条件設定のための定常解析結果と測定値.....	103
図 6-12 試験立坑形状，掘削工程と解析モデル要素分割の関係.....	104
図 6-13 掘削終了時点の全水頭，ダルシー流速分布.....	105
図 6-14 南北鉛直断面内全水頭分布図.....	105
図 6-15 ボーリング孔内全水頭の深度方向分布の経時変化予測.....	106
図 6-16 立坑内への湧水量の経時変化予測.....	107

図 6-17 計測孔 TH1,2,3,5 における全水頭の掘削前と掘削後 300 日経過時点の比較.....	108
図 6-18 計測孔 TH1,2,3,5 における掘削開始後 300 日の全水頭分布の予測値と実測値の比較.....	108
図 6-19 計測孔 TH1,2,3,5 における全水頭分布の予測値と実測値の比較.....	109
図 6-20 試験立坑からの距離と水頭低下量（掘削開始より 3 年後）.....	109
図 6-21 TH-1 孔の EL210m, EL135m における全水頭の掘削に伴う変化の解析と実測.....	110
図 6-22 立坑・坑道への流入量の解析と実測の比較.....	111
図 6-23 掘削前後の外周にあるボーリング孔内全水頭分布の比較.....	112
図 6-24 CASE2 における立坑・坑道への流入量の解析と実測の比較.....	113
図 6-25 CASE1, CASE2 の全水頭分布の比較.....	113
図 6-26 地形・地質構造の変遷.....	115
図 6-27 タイムステップ間での初期値の引き継ぎの概念図（今井ほか 2007）.....	117
図 6-28 SMS での初期値設定のイメージ（今井ほか 2009 に加筆修正）.....	117
図 6-29 2 次元四辺形要素における座標系（今井 2013）.....	118
図 6-30 局所座標同定および要素内外判定のフロー.....	119
図 6-31 多タイムステップ対応解析システム.....	120
図 6-32 解析領域と解析モデルの地質構造区分（現在）.....	121
図 6-33 適用した境界条件設定.....	122
図 6-34 全水頭と濃度分布.....	123
図 6-35 全水頭と濃度分布.....	124
図 6-36 想定した圧密問題の概要.....	126
表 2-1 代表的な物質の圧縮率.....	20
表 2-2 圧縮率から想定される比貯留係数.....	21
表 2-3 一般的によく提示される比貯留係数.....	21
表 3-1 解析ケース.....	39
表 3-2 解析ケースと物性、涵養量.....	46
表 3-3 表面の節点における解析結果.....	47
表 3-4 表面の節点における解析結果.....	48
表 3-5 表面の節点における解析結果.....	49
表 3-6 表面の節点における解析結果.....	50
表 4-1 川砂の基本物性.....	55
表 4-2 計測機器の諸元.....	56
表 4-3 既存の岩石の不飽和浸透特性.....	68
表 5-1 地質区分と物性値.....	86
表 6-1 水理地質区分に設定したパラメータ.....	101
表 6-2 水理地質区分とパラメータ設定.....	121

表 6-3 物性値.....	126
表 6-4 沈下量の計算内訳.....	126

1. 序章

1.1 研究の背景

水は人間にとって不可欠な物質であり、人は水を求める。人類と地下水の関わりの始まりは、飲み水としての湧水ではなかったかと思われる。さらに多くの飲み水を求めて、湧水を掘り始め井戸により安定的に水資源を確保したと考えられる。人口が増えれば更なる水資源を求め、より深く、さらに深く掘り進み水資源を確保してきたと考えられる。人口が増え、人間の活動の範囲が広がると、さまざまな場所で、さまざまな形態で、人類と地下水との関わりを持ってきた。農耕が始まると灌漑水の確保のため井戸を、水路を、堰を、ダムを、と水資源確保のためにさまざまな施設を考案し、構築し、利用してきた。エネルギー源として、石油や石油ガス（天然ガス）の利用が始まると石油資源開発とともに深部地下水との関わり（水攻法、水溶性天然ガス）ができ、また、温泉や地熱開発も同様である。

人の活動範囲が広がると、人の往来が増え、道路、鉄道が整備される。より早く、短距離での移動を求め、山を削り、トンネルを掘る。そこで新たな地下水との遭遇がある。こちらは、人間にとって地下水は迷惑な存在であり、ある時は地下水により人命も奪われる（吉村昭 1990）。

地下水を水資源として確保利用し、生活圏の拡大に伴い遭遇する地下水を制御することから、地下水の性状を知るようになり、知識化し、易学的、俯瞰的、科学的にと、人類と地下水との関わりが始まる。地下水を水資源として利用・確保のために、地下水の起源、循環への関心が高まり学問として水文学、水循環学などが発生したと考えられる。

水利用が、井戸から水道を介しての都市型の利用になると、水を濾過し、濾過能力の定量的把握の必要性から、現在でも使用されるダルシー則（榎根勇 1980）なる地下水流束を評価する数式が使用される様になり、さらに井戸理論が展開され地下水の数理的評価が行われるようになってきた。

産業革命により集約型の生産システムが広がり、労働力の都市への集中が生じると、生産・生活両面からの都市部での水需要が増加し、地下水がより多く汲み上げられるようになった。汲み上げる量が地下水の涵養量を上回ると、地下に貯存する水量が減少、地下水位の低下を招き、地盤沈下を生じた。人口集中の進んだ、関東平野や大阪平野では第二次大戦前より地盤沈下は始まり、高度経済成長期に各地で深刻な被害が生じるまでになった。東京都江東区では4メートル以上の地盤沈下（環境省 水・大気環境局, 2012.12）が生じている。

地盤沈下と井戸による揚水の評価には、ちょうどこの頃開発され、使われたした、複雑な地質構造を反映することのできる浸透流解析が地盤沈下検討に適用され、この時期に浸透流解析が普及したと考えられる。

同じく水資源確保の観点からダムも盛んに作られ、ダム建設に適す堅牢な岩盤を有す河川サイトが減少すると、岩盤強度をそれほど要求しないロックフィルダムが作られ、堤体内浸透挙動評価等で浸透流解析が使用（駒田ほか 1978, 赤井ほか 1979）され、浸透流解析が普及する一因となったと考えられる。

以上のように、人間活動に広がりにつれ地下水との関わりも増え、地下水の適切な管理、地下水への対策などの観点から、さらに計算機性能の向上・普及により浸透流解析はよく利用されるようになった。現在では、地下水は資源としてばかりでなく、環境面、防災面、大深度利用など、新たな地下水との関わり方が始まり、浸透流解析を扱う上で新たな課題も生じている。

図 1-1 に、現代の人間活動と地下水の関わりとして、地下水の関わる構造物と地下水の関係を示している。地下水との新たな関わりとして、放射性廃棄物の地層処分や LP ガスの地下貯蔵など新たな大深度地下利用のニーズに伴い、従来は不透水扱いされていた 10^{-8} m/s より小さい透水係数の岩盤などを対象にする解析が必要となっている。このためにこれまで無視されてきた地下空洞表面からの蒸発量など微小な境界流量への対応や、浸透流解析に用いる岩盤の不飽和パラメータの把握が必要となっている。また、放射性廃棄物の地層処分においては 10～100 万年オーダーの評価期間となるため、地球温暖化や東日本大震災の経験も踏まえ、地質変動などの長期地質環境変遷を考慮する必要性など、新たな解決すべき課題が発生している。土木工事の観点からは、施工へのより一層の高い安心・安全性の要求など、浸透流解析と連携した施工管理、環境保全に関する浸透流解析のニーズや、地下水挙動とともに地下水質への影響、地盤沈下などへの影響も同時に評価する必要性が生じている。

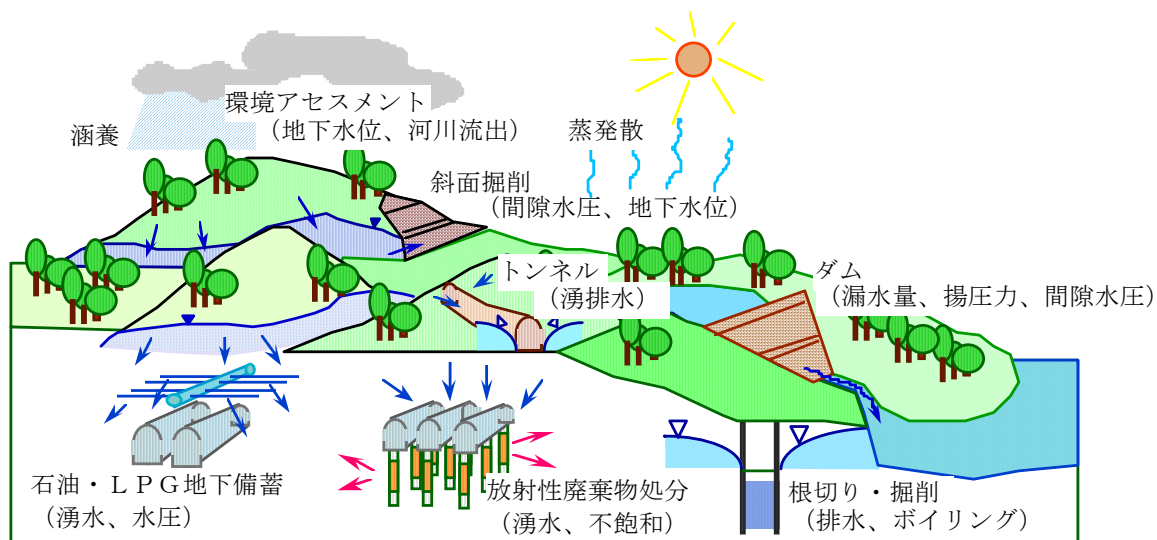


図 1-1 現代の人間活動と地下水との関わり

1.2 研究の目的

前節で述べたように、地下水との新たな関わりに伴い、浸透流解析の対象とする岩盤の透水係数などの物性値や、境界流量、求められる解析精度などが変化している。これに伴い、従来の浸透流解析の知見ではニーズに対応した解析結果を得られなくなり、新たな課題が出てきている。これら課題解決のため、以下に示す 4 つのテーマを設定し研究を行った。

- ①テーマ 1：地下水流動状況に応じた境界条件の変化への対応方法
- ②テーマ 2：岩盤の不飽和浸透パラメータの評価方法

③テーマ 3：掘削工事に伴う地下水影響と地盤沈下を解析・評価する方法

④テーマ 4：長期地質環境変遷を考慮する広域地下水流動解析方法

1.2.1 テーマ 1

テーマ 1 は、浸透流解析を実施する過程で、計算結果を参照しないと境界条件が設定できない状況に対応する際の対象方法を研究するもので、このような状況として 3 ケースの状況に対応する計算方法を対象に研究する。

ケース 1：トンネルや立坑などの掘削に伴う課題で、掘削過程で、掘削該当部の要素が序越された後に表出する新たな境界面の境界条件を設定する問題である。掘削工程と、掘削該当部要素の除去のタイミング、新たな境界に設定する境界条件を制御し安定な解析結果を得るための方法を研究する。

ケース 2：透水性の低い岩盤空洞壁面の境界条件設定に関する課題で、この場合境界面（節点）上には浸出条件としての圧力水頭 0 の条件を設定する場合、空洞内換気効果を考慮した壁面からの水分蒸発量を設定する場合が想定されるが、これらを適切に設定する方法に関して研究する。

ケース 3：広域を対象とした地下水流動解析における傾斜した地表面に設定する境界条件設定の課題で、地表面からの涵養と浸出条件としての圧力水頭 0 の条件を適切に設定する方法に関しての研究である。

1.2.2 テーマ 2

テーマ 2 は、岩盤の不飽和浸透パラメータの評価方法に関する課題である。土壌を対象とした不飽和浸透パラメータの評価方法に関する研究は多くなされ、その測定データも多く報告され、その一部はデータベース化され広く知られている。一方、岩盤の不飽和浸透パラメータに関しては、従来の道路等の地下利用では必要とされず、また、岩石の透水係数は一般に土壌に比べ小さく岩石を浸透する流量を測定することの難しさも手伝い十分検討されてこなかった経緯がある。しかし、放射性廃棄物の地層処分では地下空洞が 100 年オーダでオープンな状態が維持されることが想定され、地下空洞周辺に不飽和領域が広がる可能性がある。不飽和領域は地層処分システム性能に影響すると考えられ、不飽和領域の測定や解析による評価予測する技術が望まれ、岩盤の不飽和浸透パラメータの測定・評価は必要な研究課題である。

1.2.3 テーマ 3

テーマ 3 は、河口部の沖積層を含む地盤で掘削工事を行う際の地下水対策工のために行う浸透流解析と、この浸透流解析を通じて構築した水理地質モデルを利用し、沖積層の掘削や地下水対策工による沈下影響を評価する解析方法に関する研究であり、効率的な解析システムが構築されると解析評価の作業時間短縮、早期対策工立案に寄与する現場支援を目的とした実務的研究課題である。

1.2.4 テーマ 4

テーマ 4 は、放射性廃棄物の地層処分の安全評価等で考慮する 10～100 万年オーダの広域的な

地下水流動経路等を評価する際に影響すると考えられる、地形・地質構造の長期的変遷の影響評価のための解析方法に関する研究である。わが国の場合、隆起・沈降速度は高々1000年で1m程度、岩盤の透水係数が 1×10^{-9} m/s、動水勾配0.01、間隙率0.1を仮定すると、地下水の移動は1000年でおおよそ3mと隆起・沈降速度と同じオーダーの移動量となり、地形・地質構造の長期的変遷は無視できない。従来の研究としては、地形地質の変形は考慮せずに海進・海退など長期的気候変動による海水準や涵養量の変化の影響評価、地形・地質構造の長期的変遷を考慮した固定した古地質環境条件における地下水流動特性の解析的評価研究の報告事例はあるものの、気候・地形地質の変遷両者を考慮した事例はほとんどない。テーマ4の研究は、こうした気候・地形・地質の長期的変遷を考慮しうる解析方法に関する研究である。

以上の4テーマをまとめると、テーマ1は掘削や蒸発・涵養により地下水流動領域や境界の位置・条件が逐次変化する場合へ適用する研究、テーマ2は地下水流動場の飽和状態の変化に関する研究、テーマ3は揚水注水など地下水を動かすことで地盤変形を生じる影響を評価する研究、テーマ4は長期間を対象とすることで、地下水流動場が隆起沈降など変化することへの対応方法を開発する研究、と考えられる。これらを総括すると、地下水の流動場が変化することに対応するための地盤浸透の流解析方法の研究と捉えられ、本研究のタイトルを“流れ場が変化する地盤浸透流の解析方法に関する研究”とした。

1.3 本論文の構成

本研究では、前述の課題に浸透流解析が対応できるよう、四つの研究テーマを設定し、これにより浸透流解析の適用性、正確性を高めることを目的に展開する。

第1章は序章として現代社会における人間活動と地下水流動との関わりを示し、現代の抱える地下水の取り扱い等に関する新たな課題、四つの研究テーマを提示する。

第2章では、地下水及び次章等に適用する浸透解析技術に関する基礎的知見を整理すると共に、現時点での浸透流解析における技術的課題を提示する。

第3章では、第1の研究テーマとして境界条件設定方法に関する3種類の課題に対する対処方法を提案すると共に、その適用例を示し、地下水シミュレーションにおいて、地盤の持つ特性をより自然な状態で評価できる方法に関する研究について示す。

第4章では、不飽和特性の評価方法として、大規模砂人工地盤試験における不飽和特性の測定と解析による評価性能を確認・提示すると共に、研究例の少ない岩盤の不飽和特性評価に着目した試験・解析的な研究を行い、岩盤・岩石の不飽和特性に関する新たな知見を提示する。

第5章では、地下水対策工を必要とする軟弱層を有する工事において適用した実用性の高い地下水流動評価と軟弱層の沈下評価方法の研究開発について示す。

第6章では長期地質環境変遷に適用可能な広域地下水流動解析の開発を目標に、立坑掘削に伴い生じる地下水への影響評価を通じた地質環境変遷の影響評価手法の適用性を確認すると共に、地形地質構造が変化した場合に対応可能な解析方法を考案・提示し、その妥当性を定性的に示す。

第7章では、上記研究成果を総括すると共に、今後の課題に関して言及する。

研究の構成を図 1-2 に示す。

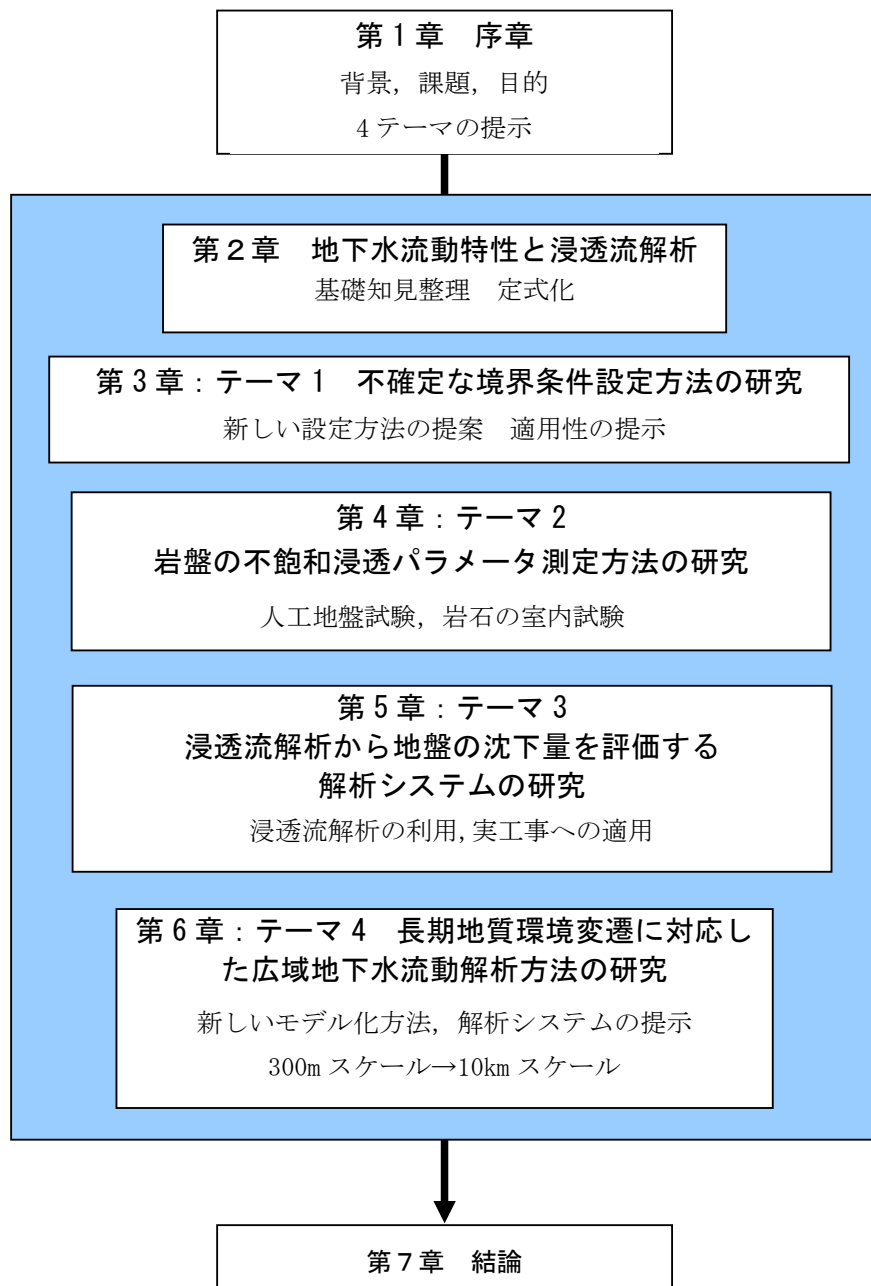


図 1-2 本研究の構成

2. 地下水流動特性と浸透流解析

2.1 地下水の存在形態

地下水は地表下の土壌、地層および岩盤の間隙内に存在する水であり、その多くは降水により地表よりもたらされ、一部は地表面からの蒸発や植物に吸い上げられ蒸散により大気に戻されるが、一部は地中に浸み込み地下に取り込まれ地下水として存在（図 2-1）する。これを天水起源の地下水という。一方、土砂などが河川、湖沼、沿岸に堆積、これらが地層を形成し土粒子などの間隙に閉じ込められ地下水になったもの、火成岩など溶岩内に閉じ込められた水分が地下水になったもの、粘土鉱物の変質する際に水が排出され地下水になったものなどもあり、これらは裂隙水、化石水などとも呼ばれる。

一般に地盤中に入った水は地下水と呼ばれ、地盤の土粒子の間、岩の割れ目や間隙など地盤中の流れやすい所を選んでゆっくりと時間をかけて流れる。地下水の流れる間隙形状は地質によりさまざまな形態を有し、それにより地下水の流れ、貯存量なども異なる。図 2-2 は地質構造に応じた地下水の存在形態と名称・区分を示す。また、図 2-3 にはさまざまな間隙形態を示す。

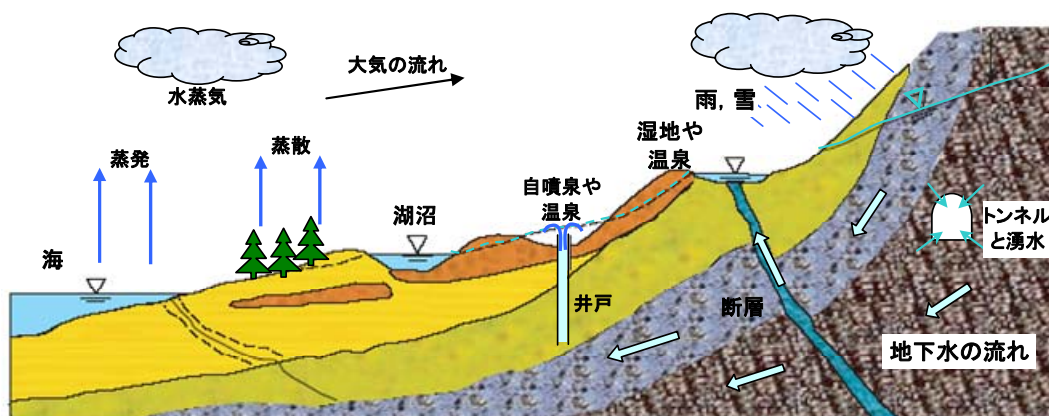


図 2-1 地下水の循環と地質構造

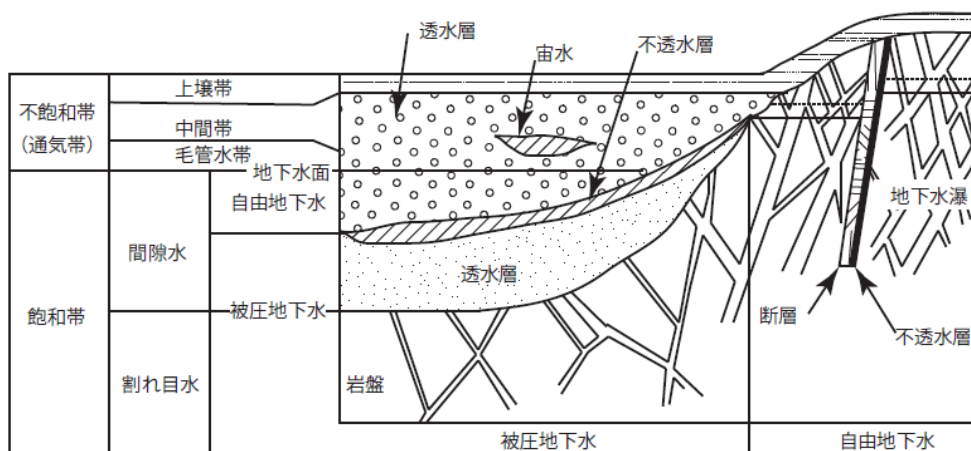


図 2-2 地下水の存在形態と地質構造（地下水ハンドブック図 2.1.2 を参考に作成）

土壌や岩盤など、地盤中のある体積 V を考えるとき、その中には土粒子や岩石などの固相部と間隙部が存在する。この間隙内に地下水は存在するが、固相部の体積 V_s に対する間隙部の体積 V_v の比を間隙比 e 、全体体積に対する間隙の割合を間隙率 n といい、以下のように示される。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2-1) \quad n = \frac{V_v}{V} \quad (2-2)$$

通常間隙率は土壌や岩石を飽和状態にしてその質量 W を測定、その後、その試料を 110°C ほどの炉にて乾燥させ、水分を除去し、残った試料の質量 W_s を測定する。この際の、炉乾燥により除去した水の体積が間隙の体積 V_v 、残った部分が固相の体積 V_s と考えて以下のように算定する。

ここで得られた間隙の体積 V_v 、固相の体積 V_s より前述の式により間隙率が算定される。

$$V_v = \frac{W_w}{\rho_w} = \frac{W - W_s}{\rho_w} \quad (2-3) \quad V_s = \frac{W_s}{\rho_s} \quad (2-4)$$

実際には、特に岩石などで、外部と通じていない間隙が存在する場合、この間隙中の水分は炉乾燥によっても排出されないことがある。このような間隙は通常水の移動に寄与しない間隙であり、水の動きに有効でない。上記で評価した間隙は水の動きに有効な間隙であることから有効間隙率 n_e と呼ばれる。この場合、炉乾燥により評価した有効間隙率ということになるが、地下水に含まれる物質移行に関する事象では、地下水に含まれる物質濃度に着目し、カラム試験等で通水に伴い地下水濃度の変化から有効間隙率を評価する場合がある。この場合の有効間隙率は、炉乾燥による有効間隙率と同じ土壌においても異なった値を示すので注意が必要である。炉乾燥の場合に、 110°C という環境下での水分移動であり水蒸気移動による水分の排出も考慮している。一方、カラム試験の場合は飽和状態の液相での現象であり、飽和地下水流れにおける有効な間隙という意味であり注意が必要である。前者の有効間隙率は後者の値よりも大きな値を示す。

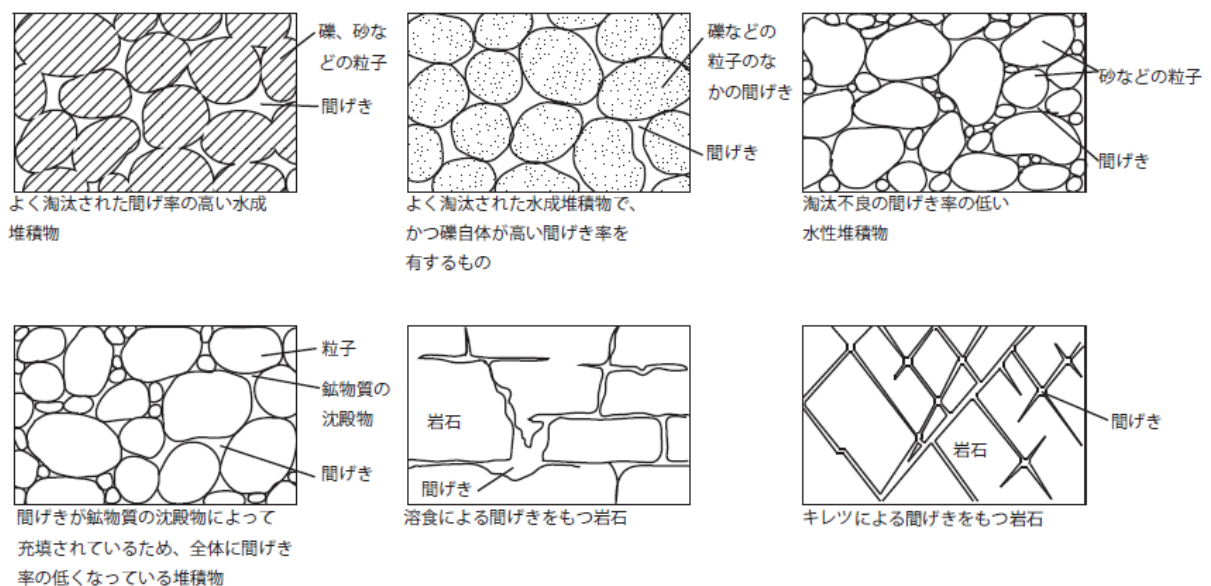


図 2-3 さまざまな間隙形状（地下水ハンドブック図 2.1.1 を参考に作成）

2.2 飽和と不飽和

図 2-2 にも示されているが、地下水面よりも下方に存在する地下水の状態を飽和帯、地下水面よりも上の間隙に空気とともに存在する地下水の状態を不飽和帯という。図 2-4 に地下水面近傍の地下水の分布およびその付近での水分移動のイメージを示す。

不飽和帯とは、間隙内に液相（地下水）と気相（空気や水蒸気）が混在した状態の部分を示す。また、液相部でも気泡を含む場合もある。地下水面より上方にある水分は重力に抗する力によりその位置に留まっている。この代表的な力が毛管力である。このような水を毛管水ともいう。その他、固相の表面や粘土などの場合はその内部構造に水分が取り込まれ保持される場合があり、これらは吸着水と呼ばれる。これら不飽和部における水分は、蒸発により気相へ移動する。水を通しにくい岩盤や粘土などでは液相での水分移動が遅く、気相での水分移動も無視できない。

地盤中にある体積 V を想定した場合に、その体積に含まれる水の体積 V_w の割合を体積含水率 θ という。間隙体積 V_v に占める水分の体積 V_s の割合を飽和度 S_r という。

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (2-5)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2-6)$$

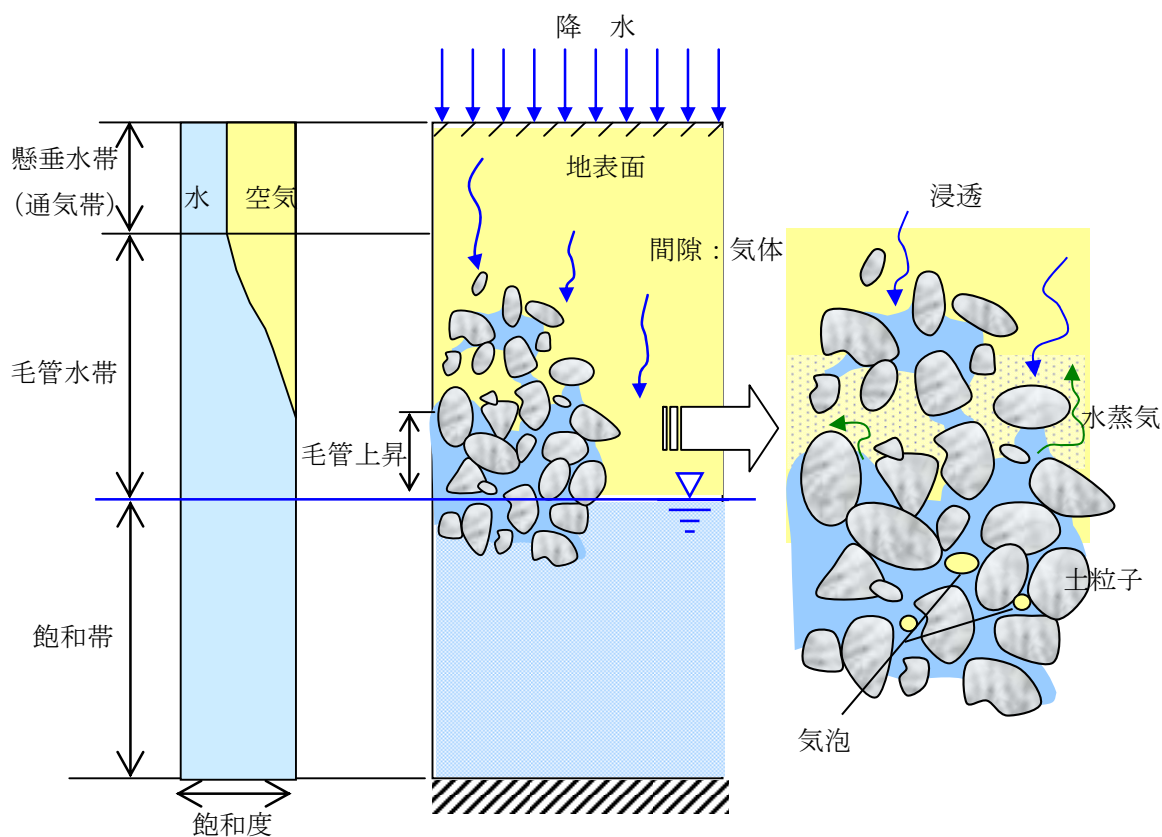


図 2-4 不飽和地下水の存在形態（地下水入門 1983 を参考に作成）

2.3 浸透流の支配方程式

2.3.1 水頭の表示

流体力学でよく知られているように、非粘性、非圧縮性流体の定常流に対して Bernoulli の定理は、次式で示される。

$$\frac{p}{\gamma_w} + z + \frac{\bar{v}^2}{2g} = \text{Constant}(=h) \quad (2-7)$$

ここに、 p : 圧力, γ_w : 流体の単位体積重量, \bar{v} : 浸透速度, g : 重力加速度, h : 全水頭, $\frac{p}{\gamma_w}$:

圧力水頭, z : 位置水頭, $\frac{\bar{v}^2}{2g}$: 速度水頭

この Bernoulli の定理は、連続した一つの流れの中で、圧力水頭、位置水頭、速度水頭の和がどの点においても等しいことを示している。地下水流に対しては、これら以外に粘性抵抗によるエネルギー損失の項を見積らなければならない、したがって Bernoulli の定理は次のように書き替えられる。

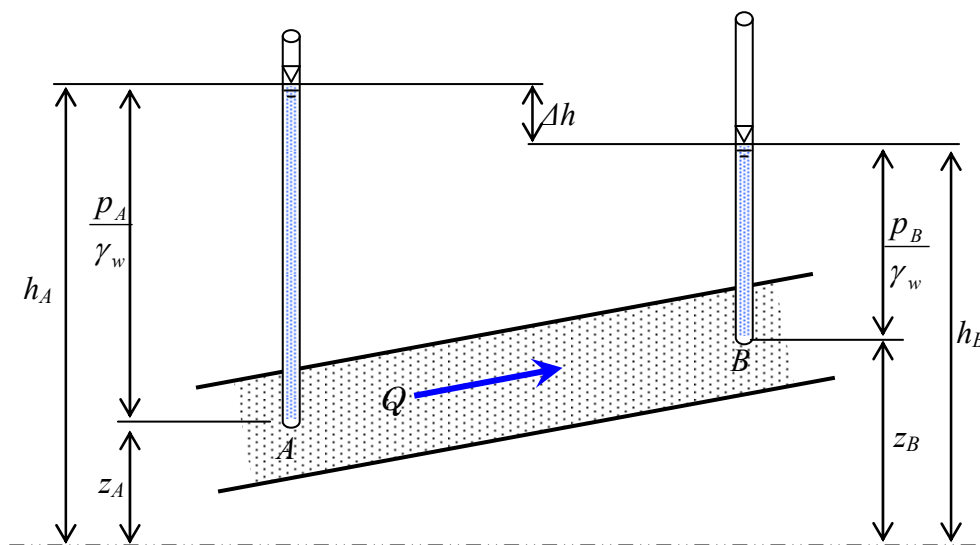


図 2-5 地下水流と水頭

$$\frac{p_A}{\gamma_w} + z_A + \frac{\bar{v}_A^2}{2g} = \frac{p_B}{\gamma_w} + z_B + \frac{\bar{v}_B^2}{2g} + \Delta h \quad (2-8)$$

ここに、 Δh は距離 Δs 間に失われる全水頭であり、これは流体の単位重量あたりの水頭損失量を意味している。

$$i = - \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta s} = \frac{-dh}{ds} \quad (2-9)$$

この i は動水勾配 (Hydraulic gradient) または水頭勾配と呼ばれ、単位長さあたりの水頭差を表わしている。

ほとんどの地下水の問題に対しては、式 (2-8) の第 3 項の速度水頭（運動エネルギー）は非常に小さいのでそれらを見捨てることのできる。たとえば、1cm/sec という速度に対しては 0.015cm という小さな速度水頭になるにすぎない。したがって式 (2-9) は次のように表される。

$$\frac{p_A}{\gamma_w} + z_A = \frac{p_B}{\gamma_w} + z_B + \Delta h \quad (2-10)$$

したがって流域内のすべての点における全水頭は以下となる。

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z \quad (2-11)$$

2.3.2 ダルシーの法則

フランスの上水道技師 Henry Darcy は、1856 年、上水道の濾過砂の実験的研究から次のような関係を発表した。

$$v (= Q/A) = -k \frac{dh}{ds} = k \cdot i \quad (2-12)$$

ここに、 v は見かけの浸透速度であり、単位時間あたりの浸透量 Q を全断面積 A で除したものである。

式 (2-12) は一般にダルシーの法則と呼ばれ、水頭勾配 i と浸透速度 v が比例することを示している。比例定数 k は透水係数と呼ばれ、速度 $[LT^{-1}]$ の次元をもっている。この Darcy の法則は式 (2-12) において微分形で書かれているが、ミクロにみて各々の間げきの中でどのような挙動をしているかについてきわめて複雑であり厳密に表現することは不可能である。したがって透水性媒体内の平均的な流れの状態の統計的表現であることに留意する必要がある。

また、ダルシーの法則には適用範囲（適用限界）があることに留意が必要である。図 2-6 に動水勾配と浸透流速の関係を示す。図 2-6 (a) はダルシーの法則における動水勾配と浸透流速の比例関係を示している。

一方、図 2-6 (b) は実測に基づく動水勾配と浸透流速の関係を示している。実際の動水勾配と浸透流速の関係は比例関係ではなく、動水勾配の小さい場合は流速が 0 の範囲が存在し、ある動水勾配 i_0 （始動動水勾配）を超えて初めて地下水は動き始める。地下水が動き出すには動水勾配に閾値が存在する。また、動水勾配が大きくなると動水勾配に対する浸透流速の増加割合が低下する。これは、乱流による流動時の流動抵抗が大きくなるを示唆している。

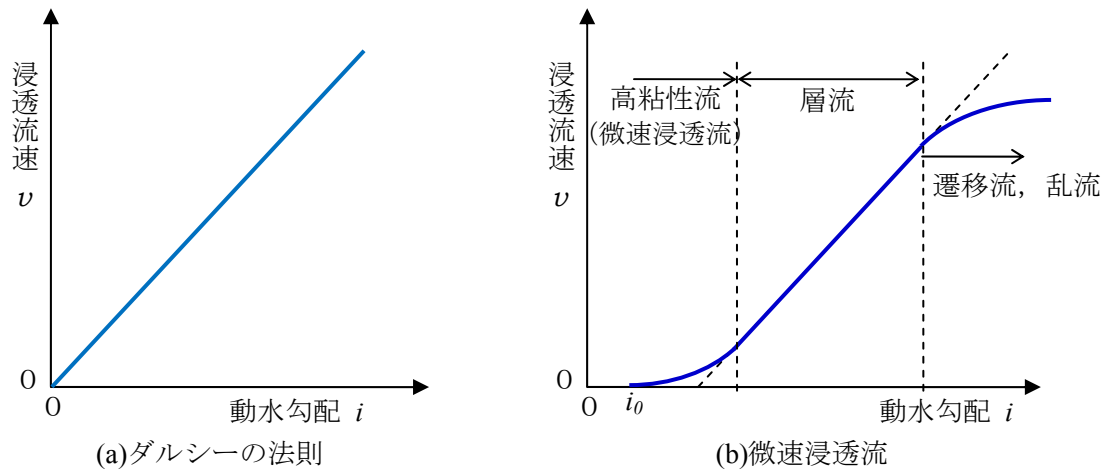


図 2-6 流速と動水勾配

2.3.3 Darcy 流速と実際の地下水流速

Darcy 流速は見かけの流速であり、断面からの流量 Q を全断面積 A で割った値である。この断面積 A には固相部の面積も含まれている。実際に地下水は間隙部を通っているため実際の地下水の通過する断面積はより小さくなる。実際に地下水が通っている地下水の流れに有効な間隙部の断面積 A_e を有効間隙率で表すと次のように表される。

$$A_e = n_e \cdot A \quad (2-13)$$

したがって間隙中の平均的地下水流速 v' は次のようになる。

$$v' = \frac{Q}{A_e} = \frac{v}{n_e} \quad (2-14)$$

図 2-7 のように間隙形状が屈曲していることを考慮すると間隙中の平均的地下水流速 v^* は

$$v^* = \frac{Q}{A_e} \times b \quad (2-15)$$

ここで b は屈曲率で、 $b = \frac{L'}{L}$ と定義される。

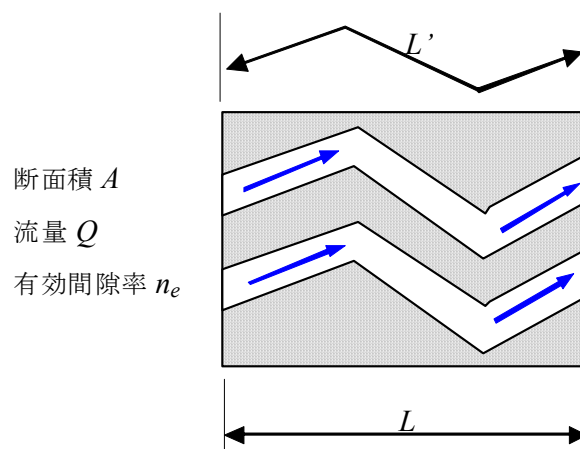


図 2-7 屈曲した流路

2.3.4 透水異方性

堆積層では砂層，シルト層，粘土層などがそれぞれ水平方向に広がり積み重なっている。このため，これらの層を一つの地層として扱う場合に地層の広がっている方向とその直角方向では透水係数が異なる。これを透水異方性という。同様に，岩盤などでは亀裂に沿って地下水は流れる傾向がある。岩盤の亀裂は，岩盤の受ける応力状態により亀裂が発生するために，応力状態に応じた亀裂の方向性があり，このために地下水の透水係数も異方性を持つ。このような異方性を持つ場合には透水係数の評価に方向性を考慮した考え方が必要であり，透水係数をテンソルとして扱う。

主透水係数(k'_{xx} , k'_{yy} , k'_{zz})と直交座標系 x_i (x, y, z) との関係を図 2-8 のように想定する。

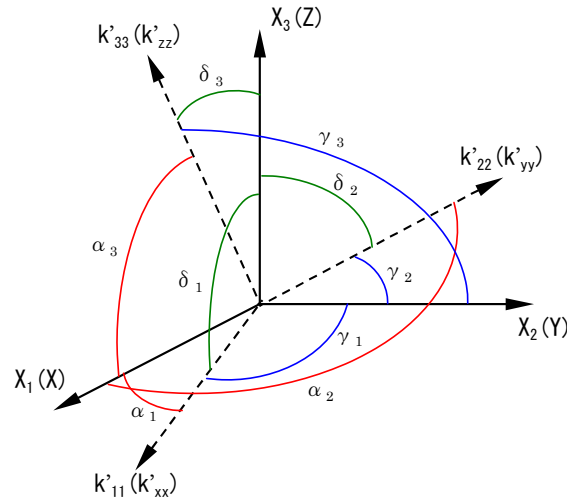


図 2-8 主透水係数(k'_{xx} , k'_{yy} , k'_{zz})と直交座標系 x_i (x, y, z) との関係

ここで主透水係数と直交座標系 x_i における透水テンソルとの関係は x_i 軸と k'_j 軸とのなす方向余弦を図 2-8，式 (2-16) のように考えると式 (2-17) で与えられる。

$$\begin{aligned} l_1 &= \cos \alpha_1 & l_2 &= \cos \alpha_2 & l_3 &= \cos \alpha_3 \\ m_1 &= \cos \gamma_1 & m_2 &= \cos \gamma_2 & m_3 &= \cos \gamma_3 \\ n_1 &= \cos \delta_1 & n_2 &= \cos \delta_2 & n_3 &= \cos \delta_3 \end{aligned} \quad (2-16)$$

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k'_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k'_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k'_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

解析の座標系(x, y)と岩盤の亀裂系（ここでは走向を基準軸 x から反時計方向に $\theta = 138.5^\circ$ ）を関係づけて示すと図 2-9 のようになる。ここで亀裂方向は透水性が高く亀裂面直交方向を最小透水係

数方向と考える。

x, y, z 軸方向の単位ベクトルを $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$, 亀裂の主透水係数方向に設定した $\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}'$ 軸方向の単位ベクトルを $\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}'$ とする。 x, y, z 軸方向の単位ベクトル $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ は式(2-18)で示される。

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}(1, 0, 0) \\ \mathbf{y}(0, 1, 0) \\ \mathbf{z}(0, 0, 1) \end{array} \right\} \quad (2-18)$$

x 軸からの走向角度を θ , 傾斜角度を α とすると, 亀裂の主透水係数方向ベクトル $\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}'$ は図 2-10 で示され, 式(2-19)となる。 $\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}'$ の x, y, z 軸に対する方向余弦は式(2-20)となる。

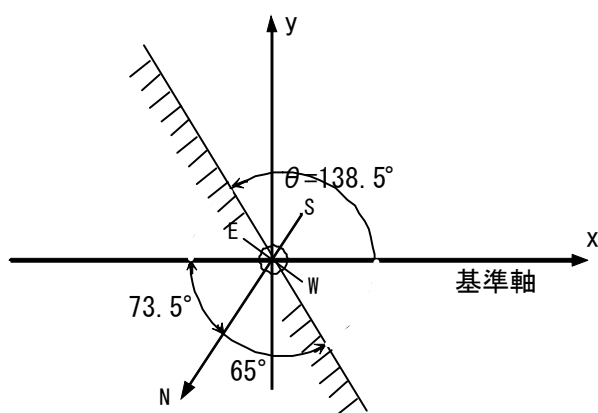


図 2-9 亀裂方向と座標

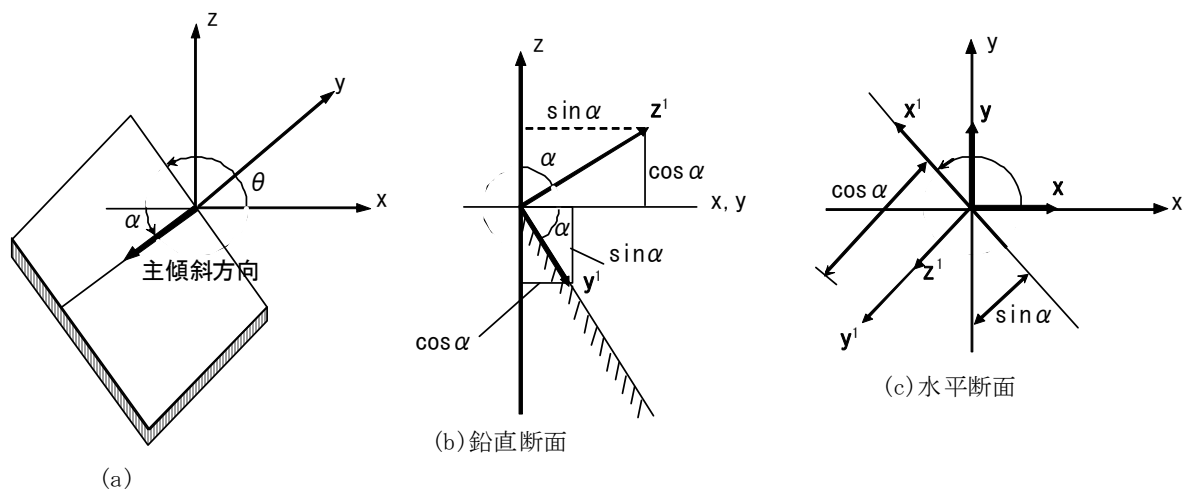


図 2-10 走向傾斜

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}'(\cos \theta, \sin \theta, 0) \\ \mathbf{y}'(-\cos \alpha \sin \theta, \cos \alpha \cos \theta, -\sin \alpha) \\ \mathbf{z}'(-\sin \alpha \sin \theta, \sin \alpha \cos \theta, \cos \alpha) \end{array} \right\} \quad (2-19)$$

$$\left. \begin{array}{l} l_1 = \cos \alpha_1 = \mathbf{x} \cdot \mathbf{x}' = \cos \theta \\ l_2 = \cos \alpha_2 = \mathbf{x} \cdot \mathbf{y}' = -\cos \alpha \sin \theta \\ l_3 = \cos \alpha_3 = \mathbf{x} \cdot \mathbf{z}' = -\sin \alpha \sin \theta \\ m_1 = \cos \gamma_1 = \mathbf{y} \cdot \mathbf{x}' = \sin \theta \\ m_2 = \cos \gamma_2 = \mathbf{y} \cdot \mathbf{y}' = \cos \alpha \cos \theta \\ m_3 = \cos \gamma_3 = \mathbf{y} \cdot \mathbf{z}' = \sin \alpha \cos \theta \\ n_1 = \cos \delta_1 = \mathbf{z} \cdot \mathbf{x}' = 0 \\ n_2 = \cos \delta_2 = \mathbf{z} \cdot \mathbf{y}' = -\sin \alpha \\ n_3 = \cos \delta_3 = \mathbf{z} \cdot \mathbf{z}' = \cos \alpha \end{array} \right\} \quad (2-20)$$

上記より変更行列 \mathbf{C} は次のようになり, これを式(2-17)に代入すると透水テンソルが得られる。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\cos \alpha \sin \theta & -\sin \alpha \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \alpha \cos \theta & \sin \alpha \cos \theta \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

2.3.5 連続の式 (質量保存則)

地下水流れの連続性について検討する。ここで図 2-11 に示すように地盤内に微少な基本体積 $dx dy dz$ を想定する。このとき基本体積 $dx dy dz$ への水の流入出を考える。

流量として単位時間当たり地盤の単位面積を通過する水の体積は流束 (フラックス) と呼ばれる。これはダルシー流速に相当する。 x 方向の流束を q_x とすると, dt 時間当たりの x 方向の基本体積 $dx dy dz$ への水の流入出質量は水の密度を ρ_w とすると, 面 $bcgf$ からの流入質量は

$$\rho_w \cdot q_x \cdot dy dz \cdot dt \quad (2-22)$$

面 $bcgf$ からの流出質量は

$$\left(\rho_w q_x + \frac{\partial \rho_w q_x}{\partial x} dx \right) dy dz \cdot dt \quad (2-23)$$

となる。

y , z 方向の流入出質量も同様にして次のように与えられる。

y 方向の流入出質量

$$\text{流入} \quad \rho_w \cdot q_y \cdot dz dx \cdot dt \quad \text{流出} \quad \left(\rho_w q_y + \frac{\partial \rho_w q_y}{\partial y} dy \right) dz dx \cdot dt \quad (2-24)$$

z 方向の流入出質量

$$\text{流入} \quad \rho_w \cdot q_z \cdot dx dy \cdot dt \quad \text{流出} \quad \left(\rho_w q_z + \frac{\partial \rho_w q_z}{\partial z} dz \right) dx dy \cdot dt \quad (2-25)$$

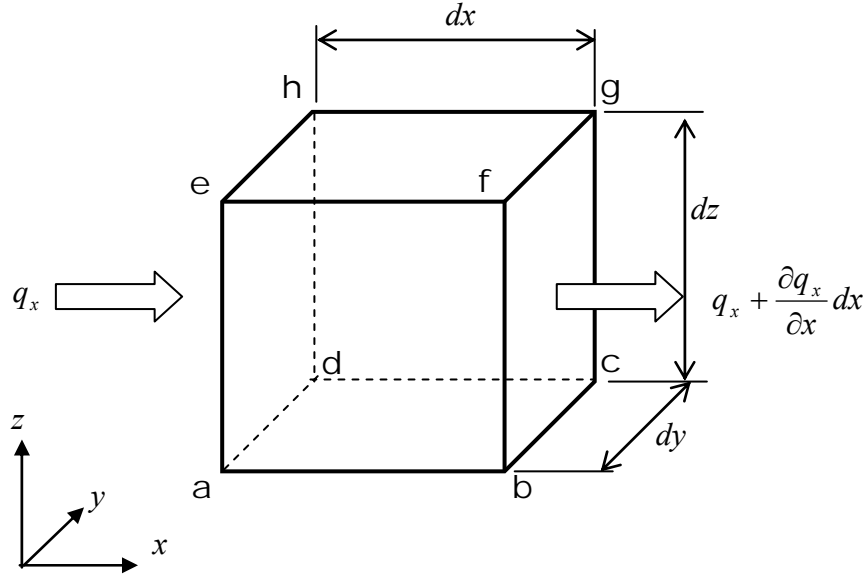


図 2-11 基本体積 $dx dy dz$ への水の流入出

流入を＋、流出を－として上記を合計すると

$$\begin{aligned}
 & \rho_w \cdot q_x \cdot dy dz \cdot dt + \rho_w \cdot q_y \cdot dz dx \cdot dt + \rho_w \cdot q_z \cdot dx dy \cdot dt \\
 & - \left(\rho_w \cdot q_x + \frac{\partial \rho_w \cdot q_x}{\partial x} dx \right) dy dz \cdot dt \\
 & - \left(\rho_w \cdot q_y + \frac{\partial \rho_w \cdot q_y}{\partial y} dy \right) dz dx \cdot dt \\
 & - \left(\rho_w \cdot q_z + \frac{\partial \rho_w \cdot q_z}{\partial z} dz \right) dx dy \cdot dt \\
 & = - \left(\frac{\partial \rho_w \cdot q_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho_w \cdot q_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho_w \cdot q_z}{\partial z} \right) \cdot dx dy dz \cdot dt
 \end{aligned} \tag{2-26}$$

となる。これは dt 時間に基本体積 $dx dy dz$ に含まれる水の質量（貯留量）の変化に相当する。基本体積内の有効間隙率を n_e とすると

$$- \left(\frac{\partial \rho_w \cdot q_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho_w \cdot q_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho_w \cdot q_z}{\partial z} \right) \cdot dx dy dz \cdot dt = \frac{\partial \rho_w \cdot n_e}{\partial t} \cdot dx dy dz \cdot dt \tag{2-27}$$

となる。両辺を $dx dy dz dt$ で割ると次式となる。これが連続の式（質量保存則）である。

$$- \left(\frac{\partial \rho_w \cdot q_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho_w \cdot q_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho_w \cdot q_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial \rho_w \cdot n_e}{\partial t} \tag{2-28}$$

水の密度が空間的に変化しないとすると上の式は次のように表わせる。

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w \cdot n_e}{\partial t} \quad (2-29)$$

また水の密度は一定とすると次のように表わせる。

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = \frac{\partial n_e}{\partial t} \quad (2-30)$$

(2-23) 式右辺は次式のように変換され、 S_s は比貯留係数と呼ばれる。これは水位（水圧）の変化に対する水の体積と有効間隙率の変化を表わす係数である。

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w n_e}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w} \left(\rho_w \frac{\partial n}{\partial h} + n \frac{\partial \rho_w}{\partial h} \right) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-31)$$

2.3.6 地下水流動の支配方程式

流束 q_x, q_y, q_z はダルシー流速に対応することから式 (2-30) に

$$q_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2-32)$$

を代入する。ここで k_x, k_y, k_z はそれぞれ x, y, z 方向の透水係数である。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w n_e}{\partial t} \quad (2-33)$$

上の式 (2-34) は飽和領域における地下水流動の支配方程式（基礎方程式）となる。

ここで上の式を不飽和領域まで拡張する。

ダルシー則は不飽和領域まで拡張して考えられている。不飽和状態における透水係数は含水量（体積含水率，飽和度）の関数となる。不飽和領域では水の流れは空気により妨げられ，水は飽和している狭い部分を流れたり，土粒子の周りを薄膜状になって流れる。このため飽和時の透水係数よりも小さな透水係数となる。含水量が小さくなるほど透水係数は小さくなる。

飽和状態の透水係数 k_s に対する不飽和状態の透水係数の割合を比透水係数 kr (図 2-8) と定義し，ダルシー則は次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} q_x &= -k_x(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} = -k_s k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -k_y(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} = -k_s k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -k_z(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} = -k_s k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (2-34)$$

不飽和状態における式 (2-34) の右辺 $\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w n_e}{\partial t}$ の項について考える。不飽和状態では水頭 h (圧

力、 $h = P/\gamma_w + z = \psi + z$ ，ここに ψ ; 圧力水頭) の変化により水の圧縮や間隙率の変化は生じないも

のとする。この時 $\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w n_e}{\partial t}$ は

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w n_e}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \frac{\partial h}{\partial t} = C(\theta) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-35)$$

$$\therefore h = \phi + z, \quad \frac{\partial h}{\partial \phi} = 1, \quad C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \quad (2-36)$$

のように表わされる。ここで $C(\theta)$ は比水分容量と呼ばれる係数で、体積含水率 θ あるいは圧力水頭 ϕ の関数である。

不飽和領域では圧力水頭 ϕ は負の値を示し、その絶対値はサクションと呼ばれる。体積含水率 θ とサクション ϕ の関係は水分特性曲線（図 2-12）と呼ばれ、式（2-24）に示される体積含水率 θ の圧力水頭 ϕ に対する傾きが比水分容量 $C(\theta)$ に相当する。

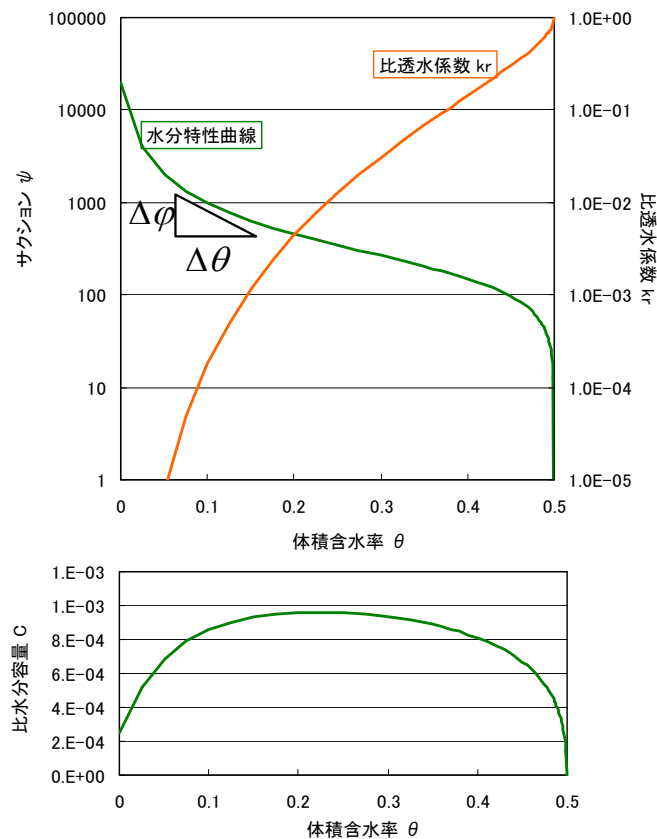


図 2-12 体積含水率，サクションと比水分容量

【負の圧力】通常の圧力は重力による圧縮力であるが、負の圧力は重力により下方に落ちようとする水を重力に抗して押し留めよう、あるいは下方にある水を上方に吸い上げようとする力である。これは通常の圧力とは逆方向に作用するため圧力としては逆方向つまり負の値をとる圧力とされている。

式 (2-27) に、不飽和状態を考慮した相対透水係数、比貯留係数、比水分容量を組み込むと飽和・不飽和両状態を表現する地下水流動の支配方程式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{s_x} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{s_y} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{s_z} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right) = (\alpha S_s + C(\theta)) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-37)$$

ここで α は比貯留係数を飽和状態により選択するための変数である。

$\alpha ; =0$ (不飽和状態), $=1$ (飽和状態) となる。

ここで透水係数をより一般的に異方性を考慮すると、

$$\begin{aligned} q_x &= -k_{s_{xx}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} - k_{s_{xy}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} - k_{s_{xz}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -k_{s_{yx}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} - k_{s_{yy}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} - k_{s_{yz}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -k_{s_{zx}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} - k_{s_{zy}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} - k_{s_{zz}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (2-38)$$

と表わせる。上式にあるように透水係数には 9 成分存在する。これらは次のように表現することもできる。

$$\begin{array}{ccc} k_{s_{xx}} & k_{s_{xy}} & k_{s_{xz}} \\ k_{s_{yx}} & k_{s_{yy}} & k_{s_{yz}} \\ k_{s_{zx}} & k_{s_{zy}} & k_{s_{zz}} \end{array} \rightarrow k_{s_{ij}} \quad (i, j=1,2,3) \quad (2-39)$$

ここで $k_{s_{ij}} = k_{s_{ji}}$ である。これを (2-25) に適用すると次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{s_{ij}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = (\alpha S_s + C(\theta)) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (i, j=1,2,3) \quad (2-40)$$

x_1, x_2, x_3 はそれぞれ x, y, z に対応する。

2.4 浸透パラメータ

本節では浸透パラメータとして、透水係数、比貯留係数、不飽和浸透パラメータ（水分特性曲線、比透水係数）について記す。

2.4.1 透水係数

(1) 固有透過度

通常、透水係数は飽和状態でのダルシーの法則にて定義される次式の比例定数 $k [LT^{-1}]$ で、対象とする地盤特性によりオーダ的な幅を有する浸透パラメータである。この値は、図 2-5 に示すような 1 次元流動場での流量 Q を測定し、その流動場での断面積 A で除してダルシー流速を算定、また、2 点間の水頭差とその距離から算定した流動場の透水勾配でダルシー流速を除して与えられるものである。

$$v \left(= \frac{Q}{A} \right) = -k \frac{dh}{dx} \quad (2-41)$$

したがって、透水係数は流動場の間隙の大きさや間隙の連結性など、地下水の移動する媒体（地

盤、土壌など）の間隙特性の影響と、その間隙を通過する流体（液体）作用する圧力、流体と周辺媒体との摩擦力（粘性により通過する流体が周辺の土粒子や岩盤にまとわり付こうとする流れに対する抵抗力）の影響を受ける。これらの影響も示したものが次式である。

$$k = \frac{\rho_w g K}{\mu_w} \quad (2-42)$$

ここで ρ_w は水の密度 [$\text{ML}^{-1} \text{T}^{-1}$], ρ_w は粘性係数 [ML^{-3}], g は重力加速度 [LT^{-2}], K は固有透過度 [L^2] 固有透過度は流体の影響を受けない、透過媒体の間隙特性を示すパラメータであり、この値をもとに、流体の種類や温度の影響などを考慮した浸透解析が可能となる。

(2) 間隙率と透水係数の経験式

一般に、間隙が大きいと間隙を通過する地下水は流れ易く、透水係数は大きくなる傾向がある。また、砂質土などでは構成する土粒子の粒径によりその間隙の大きさはある程度推定可能となり、このような特性を利用した間隙特性を利用した透水係数の推定式が提案されている。代表的な関係式を以下に示す。上から、Kozeny-Donat, Zunker, Terzaghi による提案式（石原研而，2009）である。

$$k = \frac{C_K}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} D_w^2 \quad (2-43)$$

$$k = \frac{C_Z}{\mu} \left(\frac{n}{1-n} \right)^2 D_w^2 \quad (2-44)$$

$$k = \frac{C_T}{\mu} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 D_{10}^2 \quad (2-45)$$

ここで、 μ : 水の粘性係数, D_w, D_{10} : 粒径に関する定数, C_K, C_Z, C_T : 係数

下図に各提案式と透水係数の関係を整理した。Kozeny-Donat, Zunker, Terzaghi の式では間隙率 0.6 にて透水係数が $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ となるよう係数値を設定している。

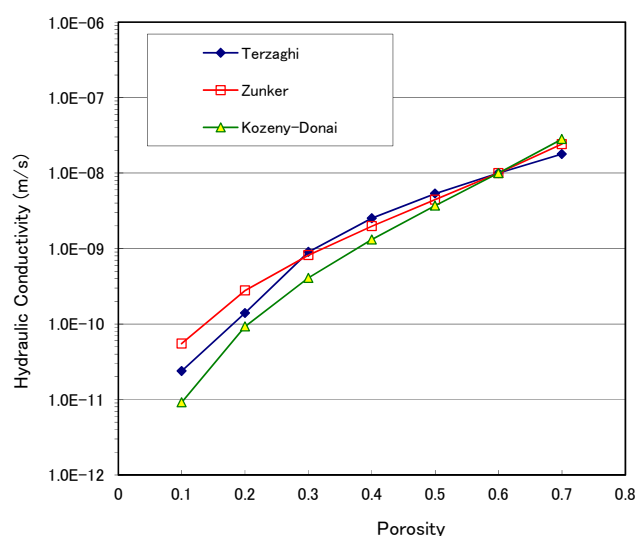


図 2-13 提案式に基づく間隙率と透水係数の関係

2.4.2 比貯留係数

(1) 比貯留係数の内訳

比貯留係数は飽和状態において水位（間隙水圧）変動に伴い間隙に貯留しうる水量の変化を示す水理パラメータである。水圧の変化は、地下水（流体）や媒体（土粒子や亀裂周辺の岩石）を変形させる。一般に圧力が増加すると水や岩石は圧縮されるために体積が減少し、地盤中に想定する領域に占めるこれら体積が減少することにより領域内に貯留しうる水量は増加する。逆に、圧力が減少すると、水や岩石の体積が増加し領域内に貯留しうる水量は増加する。以上のように、比貯留係数は岩と水の圧縮性により影響されるため、以下のように示される。

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta) \quad (2-46)$$

α : 岩石の圧縮率, n : 間隙率, β : 水の圧縮率, ρ_w : 水の密度, g : 重力加速度
岩石の圧縮率 α , 水の圧縮率 β はそれぞれ以下のように示され, 圧力の逆数 [Pa^{-1}] = [$\text{M}^{-1} \text{L}^{-1} \text{T}^2$] の次元をもつ。

$$\alpha = -\frac{dV_s/V_s}{dp} \quad (2-47) \quad \beta = -\frac{dV_w/V_w}{dp} \quad (2-48)$$

V_s , V_w は, それぞれ, 領域内の固相（土粒子, 岩石）の体積, 間隙に含まれる水の体積を示している。岩石の圧縮率はヤング率 E , ポアソン比 ν とすると弾性論に基づき次式で与えられる。

$$\alpha = -\frac{3(1-2\nu)}{E} \quad (2-49)$$

砂岩の場合, その代表値としてヤング率 $E=50\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu=0.2$ （日本材料学界, 1993）とすると, これらを式（2-52）に代入し, $\alpha=4.2 \times 10^{-11}[\text{Pa}^{-1}]$ となる。

水, 粘土, 砂, 礫の圧縮率を表 2-1（山本莊毅 1986）に示す。これら圧縮率から, 間隙率等を想定し土質ごとに想定される比圧縮係数を算定した結果を表 2-2 に示し, 表 2-3 に一般的によく提示される比貯留係数（日本地下水学会 2010）を示す。両者の整合性が確認される。

地下水中に気泡を含む場合は, 気泡の体積は圧力増加に伴い減少し, 減少分だけ地下水をより多く蓄えることになり, 地下水中に気泡が存在する場合は見かけ上比貯留係数は大きくなる。

表 2-1 代表的な物質の圧縮率

物質	圧縮率 [Pa^{-1} or m^2/N]
水	4.4×10^{-10}
砂	$10^{-7} \sim 10^{-9}$
礫	$10^{-8} \sim 10^{-10}$
粘土	$10^{-5} \sim 10^{-8}$

表 2-2 圧縮率から想定される比貯留係数

パラメータ	記号	単位	砂	粘土	礫	シルト
重力加速度	g	m/s^{-2}	9.8	9.8	9.8	9.8
水の密度	ρ_w	kg/m^3	1000	1000	1000	1000
間隙率	n	m^3/m^3	0.3	0.5	0.3	0.4
水の圧縮率	β	Pa^{-1}	4.40E-10	4.40E-10	4.40E-10	4.40E-10
土壌などの圧縮率	α	Pa^{-1}	1.00E-08	1.00E-06	1.00E-09	1.00E-07
比貯留係数	S_s	m^{-1}	9.93E-05	9.80E-03	1.11E-05	9.82E-04

表 2-3 一般的によく提示される比貯留係数

物 質	比貯留率 (m^{-1})
塑性粘土	$2.0 \times 10^{-2} \sim 2.6 \times 10^{-3}$
締まった粘土	$2.6 \times 10^{-3} \sim 1.3 \times 10^{-3}$
やや硬い粘土	$1.3 \times 10^{-3} \sim 9.2 \times 10^{-4}$
ルーズな砂	$1.0 \times 10^{-3} \sim 4.9 \times 10^{-4}$
密な砂	$2.0 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-4}$
密な砂礫	$1.0 \times 10^{-4} \sim 4.9 \times 10^{-5}$
割れ目のある岩石	$6.9 \times 10^{-5} \sim 3.3 \times 10^{-6}$
固結した岩石	$3.3 \times 10^{-6} \sim$

(Domenico(1972)を修正)

(2) 比貯留係数のアナロジー

比貯留係数は地下水挙動にどのような役割をするのか、水道につながれたホースの事例（図 2-14）でアナログ的に示す。蛇口の右の四角形は地盤のある領域を示し、この領域内にホースが存在する。ホースが地盤中の地下水流動経路を示す。図中の Close1 は蛇口が綴じた段階で、地盤の間隙は乾いている。Open1 で注水するとホースは満管となり、水圧で膨れ、水圧の高い蛇口近傍ほど大きく広がる。Close2 で蛇口を閉じると、ホースから出る水はすぐに止まらず、流量が低減しつつ出続ける。最終的（Close3）にはホースへの水圧は 0 となり、ホースへ空気が入ってくる。この時点でも少量であるが水は出続けやがてその後流量は 0 となる。

水圧が 0 となった時点が不圧状態で、この状態でどの程度ホースから水が排出される量を示すパラメータが比算出率 S_y (Specific yield) に該当する。これは有効間隙率に準じ、通常は有効間隙率の 1/3～1/2 程度といわれる。

ホースの硬さによりどの程度膨らみ、ホース内に水を貯留し、蛇口を閉じてからの排水挙動なども異なる。この影響を図 2-15 に示す。ホースの硬さは地盤の固さに相当し、太さは間隙率に相当する。地盤が固いほど S_s は小さくなり、蛇口開閉の影響は短期で収束する。

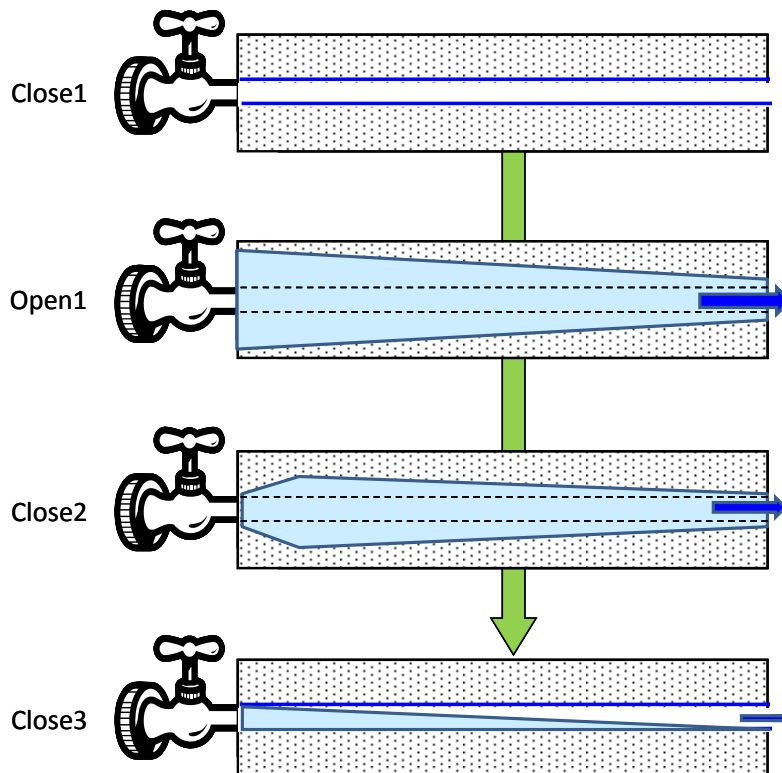


図 2-14 ホース地下水流動経路に見立てたイメージ

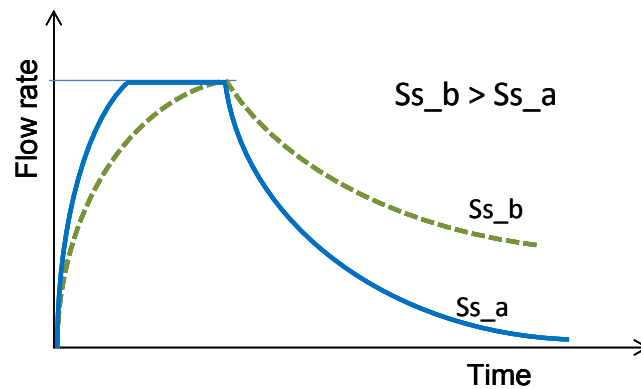


図 2-15 物性の異なる場合の流出量の経時変化

(3) 粘性土の圧密特性と比貯留係数の関連

先述のように、比貯留係数は地盤の変形特性に関連するパラメータであり、粘性土の圧密変形との関係性に関して示す。1次元の圧密式 (2-50)、1次元飽和浸透流式 (2-51) を以下に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2-50)$$

$$Ss \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad (2-51)$$

u : 過剰間隙水圧[MLT⁻² or Pa], t : 時間[T], C_v : 圧密係数[-], z : 位置座標[L]
 上記両式を比較すると圧密係数は透水係数を以下の関係であることがわかる。

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (2-52)$$

$$u = \gamma_w \cdot h = \rho_w \cdot g \cdot h \quad (2-53)$$

$$m_v = \frac{\Delta h/h}{\Delta p} \quad (2-54)$$

(2-52)(2-53)を(2-50)に代入

$$\begin{aligned} \gamma_w \cdot \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \rightarrow \gamma_w^2 \cdot m_v \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \gamma_w \cdot k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \\ &\rightarrow \gamma_w \cdot m_v \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (2-55)$$

ここで, m_v : 体積圧縮率[M⁻¹L⁻¹T² or Pa⁻¹], t : 時間[T], C_v : 圧密係数[-]
 (2-55)と(2-51)を比較すると次式の関係となる。

$$Ss = \gamma_w \cdot m_v \quad (2-56)$$

2.4.3 不飽和浸透パラメータ

不飽和浸透パラメータとしては、水分特性曲線、水分容量、比透水係数があり、図 2-9 に体積含水率、サクシヨンと比水分容量の一例を示している。土壤に関する不飽和浸透パラメータに関しては土壤物理学、農学、水文学、土木工学などで研究され、その非線形関数に関するモデル式も多数提案され論文（たとえば西垣誠 1984）や成書（たとえば地盤工学会 2004）などで整理されている。ここでは、代表的なモデル式を 2～3 例を示しておく。

(1) 水分特性曲線

水分特性曲線として、Brooks&Corey, Narshimhan, van Genuchten のモデル式およびその曲線事例（図 2-16）を示す。Brooks&Corey と Narshimhan は有効飽和度 Se の定義など異なるが、同じ関数系でありパラメータ設定により同じ曲線の再現が可能であり、 $Se=1.0$ にて $\varphi = \varphi_{cr}$ から $\varphi = 0$ に変化するため、縦軸に φ 、横軸に Se を設定する場合、この部分が鉛直な線となる。

Brooks&Corey（西垣, 1983）

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\varphi_{cr}}{\varphi} \right)^\lambda \rightarrow \varphi = \varphi_{cr} Se^{\frac{1}{\lambda}} \quad (2-57)$$

ここで, Se : 有効飽和度[-], θ : 体積含水率[-], θ_s : 飽和体積含水率[-],

θ_r : 最小体積含水率[-], φ_{cr} : 限界毛管水頭（Critical capillary head）, λ : 定数

Narshimhan (Pruess, et.al 1999)

$$\varphi = \varphi_e + \varphi_0 \left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r} \right)^{-\frac{1}{\lambda}} = \varphi_e + \varphi_0 \hat{S}e^{\frac{1}{\lambda}} \quad (2-58)$$

ここで、 φ_e と φ_0 は定数

van Genuchten (van Genuchten 1980)

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ 1 + |\alpha \psi|^n \right\}^{-m}, m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2-59)$$

ここで、 α , m , n は定数

(2) 比透水係数

比透水係数として、Brooks&Corey, Irmay, van Genuchten のモデル式およびその曲線事例を示す。

Brooks&Corey

$$kr = \left(\frac{\varphi}{\varphi_{cr}} \right)^{-n} = Se^{\frac{n}{\lambda}} \quad (2-60)$$

n : 定数, λ : 水分特性曲線 (2-57) 式の定数

Irmay

$$kr = Se^n \quad (2-61)$$

n : 定数

van Genuchten

$$k_r = Se^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(1 - Se^{1/m_2} \right)^{m_2} \right\}^2 \quad (2-62)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad 0 < m < 1, n > 1$$

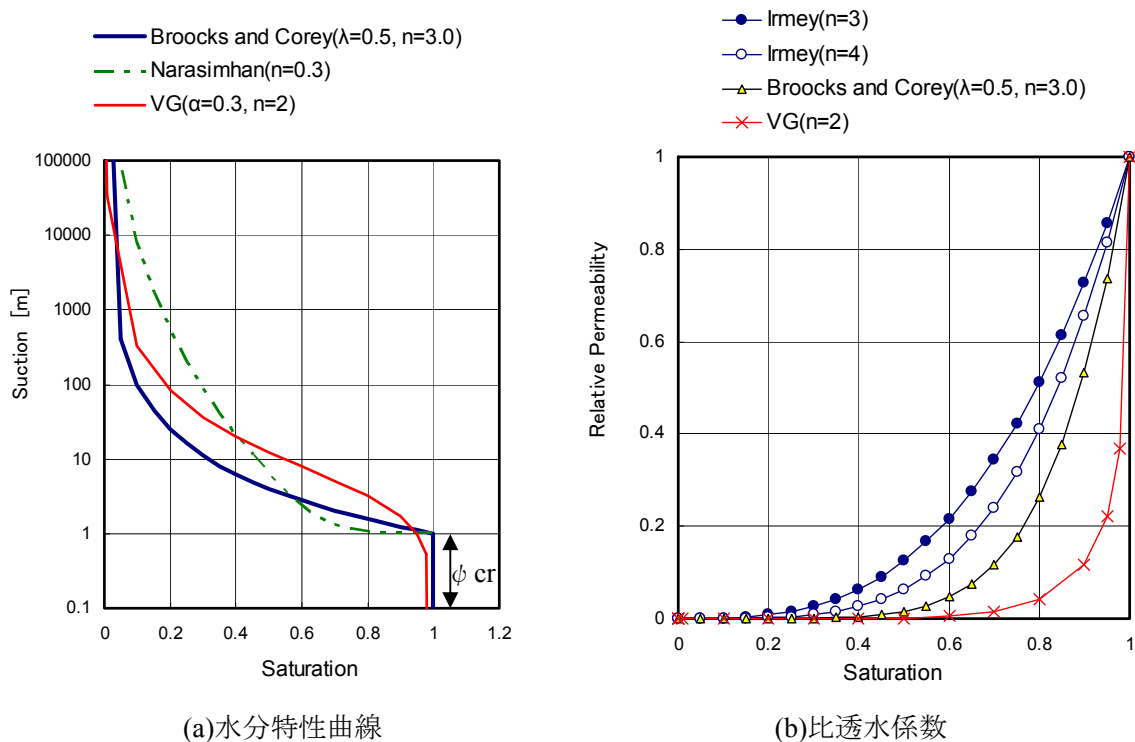


図 2-16 不飽和浸透パラメータ事例

2.5 飽和・不飽和浸透流の有限要素法による定式化

2.5.1 ガレルキン法を用いた有限要素法による定式化

飽和・不飽和浸透流の支配方程式は 式 (2-63) より与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{s_{ij}} k_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = (\alpha S_s + C(\theta)) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (2-63)$$

この式をある解析領域 Ω で、以下に示す条件下で、ガレルキン法を用いた有限要素法で解くことを考える。

初期条件 ; $t=0, h_0=h(0, x_i)$

$t=0$ における全水頭分布は領域内ですべてわかっている。

既知水頭境界条件 ; $h(t, x_i)=h_b(t, x_i)$

河川や貯水池など水面と接している個所や掘削面など大気圧となっている部分（浸出面）に該当する。

既知流量境界条件 ; $q_b=v_b(t, x_i)$

涵養量や蒸発量の生じている個所や、井戸などによる排水，給水がなされている個所に該当する。

支配方程式は次式のように表わせる。

$$L(h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(ks_{ij} kr(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - (\alpha Ss + C(\theta)) \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2-64)$$

h の近似解として解析領域内で分割された各要素にて次式のように近似する。

$$h(t, x_i) \cong \hat{h}(t, x_i) = \sum_{l=1}^{Le} h_l^e(t, x_i) \cdot N_l^e(x_i) \quad (2-65)$$

ここで Le ; 要素内の近似関数の数

式 (2-64) に式 (2-65) を近似解として代入すると、近似による誤差 R を生じる。

$$R(\hat{h}) = L(\hat{h}) \neq 0 \quad (2-66)$$

この残差 R を 0 とする近似解を求めるために重み関数 w_m を用いて重みつき残差法を適用すると

$$\begin{aligned} \int_{V_e} R(\hat{h}) w_m dv &= \int_{V_e} L(\hat{h}) w_m dv \\ &= \int_{V_e} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(ks_{ij} kr(\theta) \frac{\partial \hat{h}}{\partial x_j} \right) - (\alpha Ss + C(\theta)) \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} \right\} w_m dv = 0 \end{aligned} \quad (2-67)$$

ガレルキン法では重み関数として形状関数を用いるため式 (2-67) は

$$\int_{V_e} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(ks_{ij} kr(\theta) \frac{\partial \hat{h}}{\partial x_j} \right) - (\alpha Ss + C(\theta)) \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} \right\} N_m^e dv = 0 \quad (2-68)$$

Green -Gauss の定理により部分積分すると

$$\begin{aligned} < \int_V g' \cdot f dv = \oint_{\Gamma} g \cdot f ds - \int_V g \cdot f' dv > \\ \int_{V_e} ks_{ij} kr(\theta) \frac{\partial \hat{h}}{\partial x_j} \frac{\partial N_m^e}{\partial x_i} dv - \oint_{\Gamma} N_m^e ks_{ij} kr(\theta) \frac{\partial \hat{h}}{\partial x_j} \bar{n}_i ds + \int_{V_e} N_m^e (\alpha Ss + C(\theta)) \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} dv = 0 \\ (m=1, Le) \end{aligned} \quad (2-69)$$

また相対透水係数 kr や比貯留係数 Ss , 比水分容量 $C(\theta)$ の項はそれぞれ各要素内の平均をとるものとする,

$$ks_{ij} kr^e(\theta) = \sum_{l=1}^{Le} ks_{ij} kr_l^e(\theta) \cdot N_l^e(x_i) \quad (2-70)$$

$$a^e(\theta) = (\alpha Ss + C(\theta))^e = \sum_{l=1}^{Le} (\alpha Ss + C(\theta))^e \cdot N_l^e(x_i) \quad (2-71)$$

式 (2-69) に (2-70), (2-71) を代入すると

$$\sum_l \int_{V_e} ks_{ij} kr(\theta) \frac{\partial N_l^e}{\partial x_j} \frac{\partial N_m^e}{\partial x_i} h_l^e dv + \sum_l \int_{V_e} N_l^e N_m^e (\alpha Ss + C(\theta)) \frac{\partial h_l^e}{\partial t} dv$$

$$-\sum_l^{Le} \oint_{\Gamma} N_m^e k s_{ij} k r(\theta) \frac{\partial N_l^e}{\partial x_j} h_l^e \bar{n}_i ds = 0$$

$$(m=1, Le) \quad (2-72)$$

さらに

$$\left[A_{lm}^e \right] \{ h_l^e \} + \left[B_{lm}^e \right] \left\{ \frac{\partial h_l^e}{\partial t} \right\} - \{ Q_m \} = 0 \quad (2-73)$$

ここで

$$A_{lm}^e = \sum_l^{Le} \int_{V_e} k s_{ij} k r(\theta) \frac{\partial N_l^e}{\partial x_j} \frac{\partial N_m^e}{\partial x_i} dv \quad (2-74)$$

$$B_{lm}^e = \sum_l^{Le} \int_{V_e} N_l^e N_m^e (\alpha S s + C(\theta)) dv = \sum_l^{Le} \int_{V_e} N_l^e N_m^e a^e(\theta) dv \quad (2-75)$$

$$Q_m^e = \sum_l^{Le} \oint_{\Gamma} N_m^e k s_{ij} k r(\theta) \frac{\partial N_l^e}{\partial x_j} h_l^e \bar{n}_i ds = - \sum_l^{Le} \oint_{\Gamma} N_m^e q_i \bar{n}_i ds \quad (2-76)$$

2.5.2 要素マトリクス成分の計算

式 (2-74), (2-75), (2-76) の各成分を計算する。

ここで多数ある要素マトリクス成分を効率よく行えるよう局所座標系, アイスパラメトリック要素を導入する。各要素マトリクス成分の計算は, 各要素毎に設定される局所座標と局所座標により定義される形状関数を用いて実施する。要素内で定義される座標系を ξ_i とする。また局所座標系 ξ_i 定義される形状関数を $N_i(\xi_i)$ とする。

$N_i(\xi_i)$ で要素内の座標 x_i は次式のように示される。

$$\{ x_i \} = \left[N^j \right] \left\{ \xi_i^j \right\} \quad (2-77)$$

ここで i ; 対象とする問題の次元数, j ; 要素の形状関数の数

<3次元の場合に x_i が (x, y, z) を意味し, ξ_i は (ξ, η, ζ) を意味する。>

要素内の全水頭 $h^e(t, x_i)$ についても $N_i(\xi_i)$ を表わし得るとすると次式となる。

$$h^e(t, x_i(\xi_i)) = \left[N^j \right] \left\{ h_j^e \right\} \quad (2-78)$$

座標変換の法則, Gauss の求積法を用いると $f(x_i)$ の要素内の積分は次式のように与えられる。

$$\int_V f(x_i) dv = \int_{V(\xi)} f(\xi_i) \det |J| d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3$$

$$= \sum_{n1=1}^N \sum_{n2=1}^N \sum_{n3=1}^N H^{n1} H^{n2} H^{n3} f(\xi_1^{n1}, \xi_2^{n2}, \xi_3^{n3}) \det|J| \quad (2-79)$$

上記 $f(x)$ に式 (2-74), (2-75), (2-76) をあてはめることにより容易に要素マトリクス成分が計算できる。

2.5.3 時間項の取り扱いと繰り返し（収束）計算

式 (2-73) に示す時間項を差分法にて示す（図 2-17）と次式となる。（差分法のほかにガレルキン法の重み付き残差法を時間軸に適用する方法もある）

$${}^{t+\varepsilon} \left[A_{lm}^e \right] \left\{ \varepsilon \cdot {}^{t+1} h_l^e + (1 - \varepsilon) \cdot {}^t h_l^e \right\} + {}^{t+\varepsilon} \left[B_{lm}^e \right] \left\{ \frac{{}^{t+1} h_l^e - {}^t h_l^e}{\Delta t} \right\} - {}^{t+\varepsilon} \left\{ Q_m \right\} = 0 \quad (2-80)$$

ここで ε は差分の取り方を示す時間の重み係数である。

$\varepsilon=0$; 前進差分, $\varepsilon=1/2$; 中央差分, $\varepsilon=1$; 後退差分, を示す。 ε の設定についてはいろいろと検討がなされているが, 通常 $\varepsilon=1/2$ の中央差分がよく用いられている。

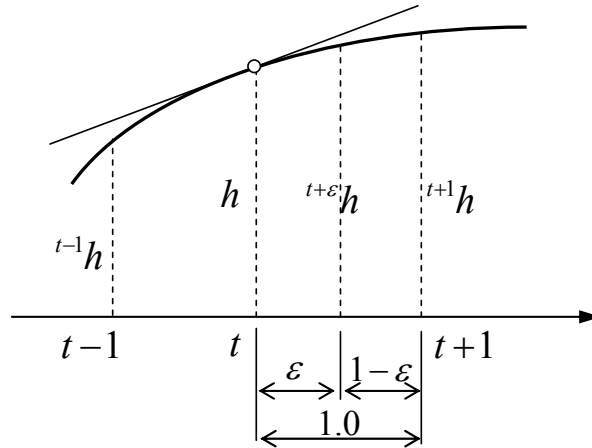


図 2-17 時間軸の差分法

不飽和領域における非定常解析では透水係数や比水分容量が状態により変化するため差分のタイムステップでどの時点の透水係数や比水分容量を計算で用いるかにより、式(2-80)の

${}^{t+\varepsilon} \left[A_{lm}^e \right], {}^{t+\varepsilon} \left[B_{lm}^e \right], {}^{t+\varepsilon} \left\{ Q_m \right\}$ が異なり結果に影響する。

${}^{t+1} h_l^e$ を求める際, 始めに次式により線形補間し予測し透水係数や比水分容量を推定する。

$${}^{t+\varepsilon}h_l^e = {}^th_l^e + \frac{({}^th_l^e - {}^{t-1}h_l^e)}{{}^t\Delta T} \cdot {}^{t+1}\Delta T \quad (2-81)$$

上式で推定した ${}^{t+\varepsilon}h_l^e$ と次式のように ${}^{t+1}h_l^e$ を計算した結果から得られる ${}^{t+\varepsilon}h_l^e$

$${}^{t+\varepsilon}h_l^e = \varepsilon \cdot {}^th_l^e + (1 - \varepsilon) \cdot {}^{t+1}h_l^e \quad (2-82)$$

との差が十分小さくなるよう計算精度を確保するために繰り返し計算を行う。

図 2-18 にこの繰り返し計算のフロー図を示す。

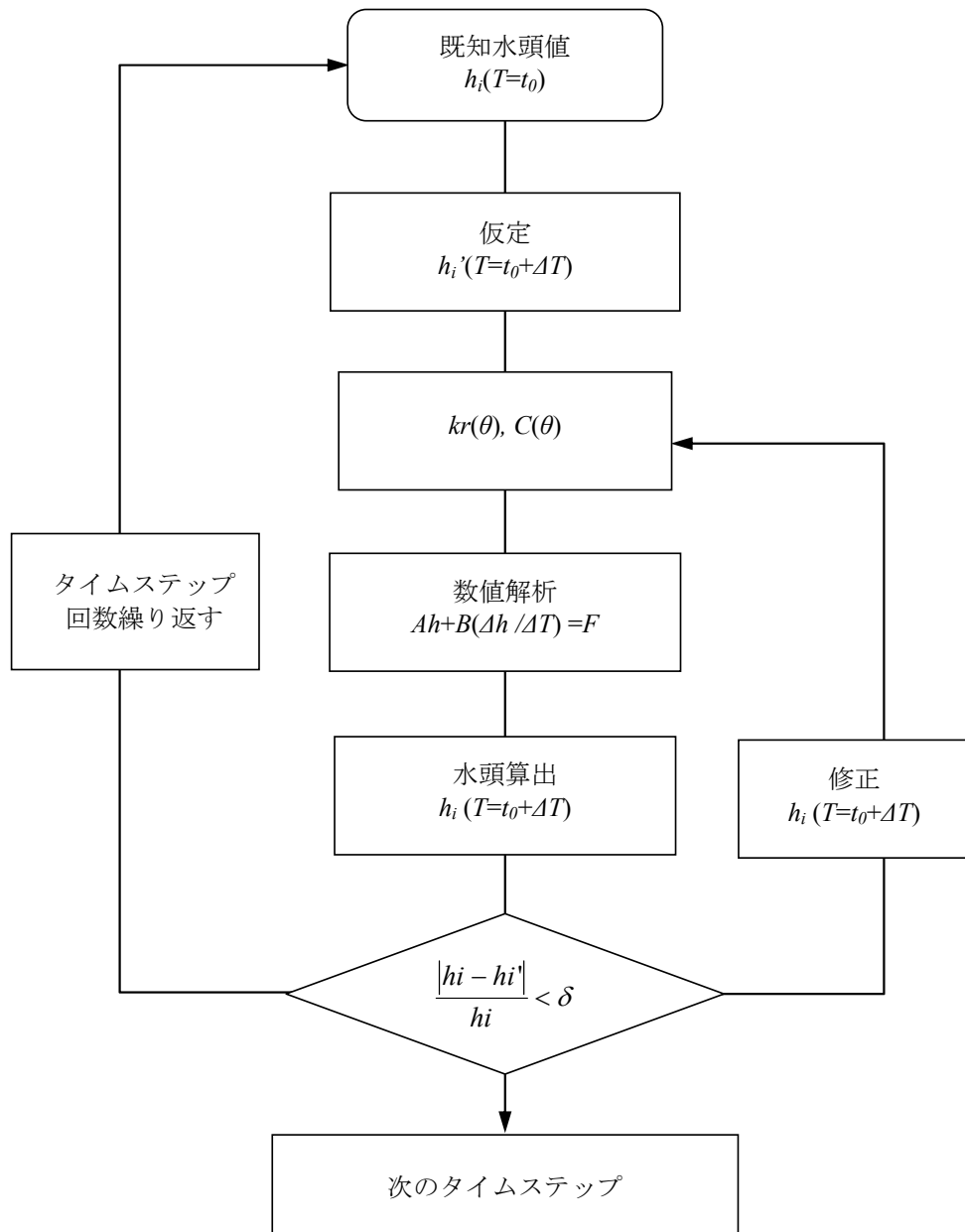


図 2-18 繰り返し計算を伴う解析のフロー

2.5.4 全体マトリクスの作成

式 (2-80) は ${}^{t+1}h_l^e$ を未知数とする連立一次方程式となる。ここまでは各要素ごとに計算される。各要素ごとの連立一次方程式を重ね合わせ全体の連立方程式を合成する必要がある。図 2-19 で示した 1 次元問題を例題として示す。

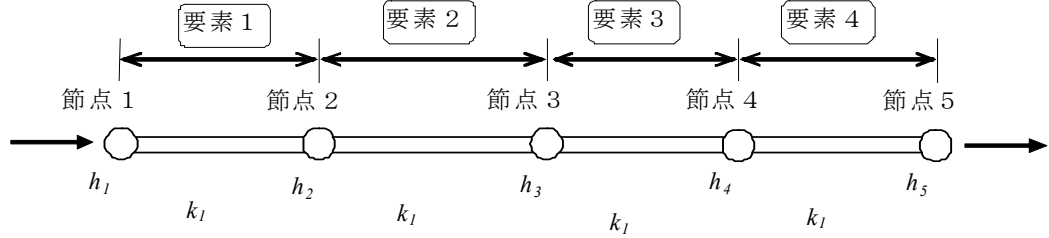


図 2-19 1 次元問題の例題

要素 1, 要素 e の要素方程式は次式のように 2 元一次方程式として示される。

$$\text{要素 1} \begin{bmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 \\ a_{21}^1 & a_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1^1 \\ h_2^1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \end{Bmatrix} \quad \text{要素 e} \begin{bmatrix} a_{11}^e & a_{12}^e \\ a_{21}^e & a_{22}^e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1^e \\ h_2^e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1^e \\ q_2^e \end{Bmatrix} \quad (2-83)$$

全体の連立方程式を合成するためには次式のように全体系での番号付けが必要となる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{Bmatrix} \quad (2-84)$$

要素 1, 要素 2 は全体マトリクスで示すと次のように示される。

$$\begin{bmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21}^1 & a_{22}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{11}^2 & a_{12}^2 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21}^2 & a_{22}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ q_1^2 \\ q_2^2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

(2-85)

(2-86)

要素 3, 要素 4 は全体マトリクスで示すと次のように示される。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^3_{11} & a^3_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a^3_{21} & a^3_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ q_1^3 \\ q_2^3 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

(2-87)

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^4_{11} & a^4_{12} \\ 0 & 0 & 0 & a^4_{21} & a^4_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_1^2 \\ q_2^1 \end{Bmatrix}$$

(2-88)

要素 1 から要素 4 を重ね合わせると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} a^1_{11} & a^1_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a^1_{21} & a^1_{22} + a^2_{11} & a^2_{12} & 0 & 0 \\ 0 & a^2_{21} & a^2_{22} + a^3_{11} & a^3_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a^3_{21} & a^3_{22} + a^4_{11} & a^4_{12} \\ 0 & 0 & 0 & a^4_{21} & a^4_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 + q_1^2 \\ q_2^2 + q_1^3 \\ q_2^3 + q_1^4 \\ q_2^4 \end{Bmatrix} \quad (2-89)$$

水頭既知条件のマトリクスへの組み込み

水頭既知条件は未知水頭の計算結果に影響を与えぬよう留意して組み込む必要がある。この方法には厳密に代入するものと、代入する行に対して非常に大きい係数を乗じる方法がある。

$h_3=H$ の場合の前者の例を示す。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{23} & a_{25} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & 0 & a_{43} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & 0 & a_{53} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q1 - a_{13}H \\ q2 - a_{23}H \\ H \\ q4 - a_{43}H \\ q5 - a_{53}H \end{Bmatrix} \quad (2-90)$$

2.6 第 2 章のまとめ

本章では、地下水及び地下水に関わるパラメータについて既往の知見、パラメータの持つ意味などに言及し示すと共に、浸透流解析の基礎となる、地下水流動の基礎方程式とその FEM 解析における定式化について示した。

3. 不確定な境界条件設定方法の研究

3.1 境界条件

浸透流解析において境界条件は非常に重要な役割を果たしている。境界条件設定により地下水の流速、流れの方向は、右から左へ、放射状の流れから収束的な流れへと、ながれ方向を自在に制御しうる。したがって、境界条件を設定することは流れの方向を決定することになる。

境界条件は、基本的境界条件として以下に示す i), ii), iii) の 3 種類、さらに自由浸出境界条件を加え、通常 4 種類に区分できる。

i) 既知水頭境界（ディリクレ条件、固定水頭境界、圧力固定境界）

河川、湖沼など水位が既に把握されている境界である。水位を設定するため通常この部分では水の出入りがある。

ii) 既知流量境界（ノイマン条件、固定流量境界）

境界部における境界通過流量がわかっている境界である。井戸の用水・給水や降雨の地表からの浸透、地表からの蒸発散などがこの境界条件に相当する。

iii) 不透水境界（noflow 境界）

境界部における境界通過流量 0 の境界である。分水嶺、遮水壁が境界に存在する場合などがある。既知流量境界において、その流量が 0 の場合と考えることもできる。

iv) 自由浸出境界

不飽和時は不透水境界、飽和し水位より下方になると水頭を大気圧に固定する境界である。斜面や掘削されたトンネル等の表面がこの条件に相当する。

境界条件の設定事例として、堤体内浸透流解析を実施する際の 4 種類の境界条件の適用例を図 3-1 に示す。堤体下部は堤体の透水係数に比べ十分小さい透水係数であり、堤体下部への水の流入出は無視できるので不透水境界を設定する。堤体左側には貯水位相当の既知水頭境界、下流部は浸出してくる為に自由浸出境界を設定する。堤体上方からは降水によりある流量が与えられるため、既知流量境界を設定する。

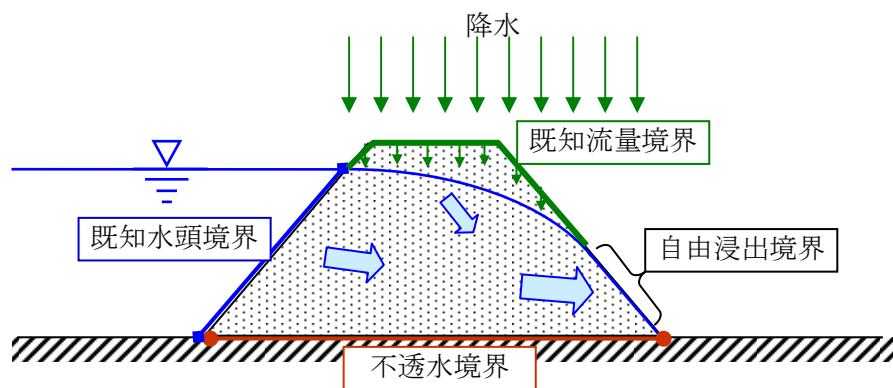


図 3-1 堤体浸透問題における境界条件設定例

3.2 境界条件設定の課題

前述のように浸透流解析の境界条件は通常、基本的境界条件として、i)水頭固定 (Dirichlet 境界)、ii)流量固定 (Neuman 境界)、iii)不透水境界の 3 種類がある。掘削工事や長期的変遷に対応した解析では、工事に伴う状況の変化や海水準の変動などで同じ場所で設定すべき境界条件の種類や値が変化する場合や、境界条件を設定すべき個所が変化する場合もある。これらに対応するためには、解析プログラムを改良し、あらかじめ工事情報や地質環境の長期変遷（海水準や涵養量の変化など）に関わる情報と非定常な解析経過を合わせて判断する仕組みを設定する必要がある。これに対し、

①掘削切羽の進展により解析モデルの要素や節点が除去される場合、②地下空洞掘削後の排水過程およびその後の空洞周辺の地下水挙動を、空洞内換気による壁面からの蒸発による強制排水を考慮して評価する場合、③広域地下水流動解析のモデル表面斜面において涵養量と自由浸出条件を適切に設定する場合、の 3 ケースについて示す。

3.3 掘削切羽の進展により解析モデルの要素や節点が除去される場合

3.3.1 切羽進展に伴う境界条件設定の課題

図 3-2 は深さ約 150m の地下水解析モデルの立坑部の要素割りと掘削工程を示している。立坑部には上部から①～⑨と鉛直方向に 9 段の要素が積み重なっている。掘削スケジュールは横軸に時間、縦軸に掘削底部（切羽）の深度（左縦軸）および標高（右縦軸）を示している。水平部は掘削が止まっていることを示す。

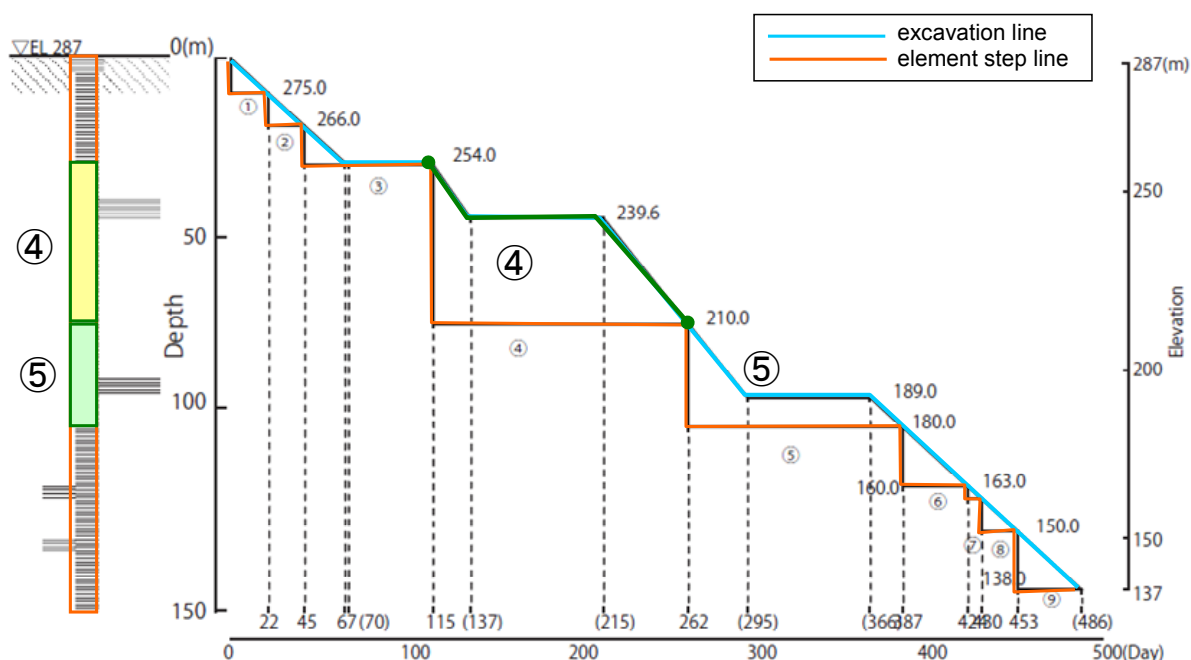


図 3-2 掘削の進捗スケジュールと解析モデルの要素分割

浸透流解析では掘削面が掘削部該当要素に入って時点で、その要素は解析系外に除外する。除

外した要素直下の要素が解析モデルにおける掘削底面になる。要素④に着目すると、要素④は標高 254m～210mにわたっている。掘削底面が標高 254m に降った時点で要素④を除去すると、瞬時に標高 210mまで掘り進んだことになり、掘削の進行状況や掘削休止状態などの掘削スケジュールを表現できない。また、急激な境界条件の変化を与えると計算が安定せず、解の振動、不飽和特性の非線形に関する収束が得られず計算の中断に至ることがある。このために、要素⑤の上面の節点（図 3-2 に丸印で示す、要素④（掘削部該当要素の下面の節点））の全水頭を掘削スケジュールに沿うよう非定常に（徐々に）変化させて与える。

では、具体的にどのように非定常に変化する境界条件を掘削部該当要素の節点に与えるかが課題となる。この場合、図 3-3 に示すような掘削部該当要素の飽和条件が想定される。(a)上下節点とも飽和 ($p \geq 0$)、(b)上節点不飽和 ($p < 0$) で下節点が飽和 ($p \geq 0$)、(c)上下節点とも不飽和 ($p < 0$)、の場合である。

$$h_{bottom} = h_1 - \frac{h_2 - h_1}{v_{excavation}} T_{element} \quad (3-1)$$

$$(a) \quad h_1 = h_1^{T=0}, \quad h_2 = z_2$$

$$(b) \quad h_1 = h_1^{T=0}, \quad h_2 = z_2$$

$$(c) \quad h_1 = h_1^{T=0}, \quad h_2 = h_2^{T=0}$$

ただし、 $h_2^{T=0} \geq h_1^{T=0}$ の場合は $h_1 = h_2^{T=0}$

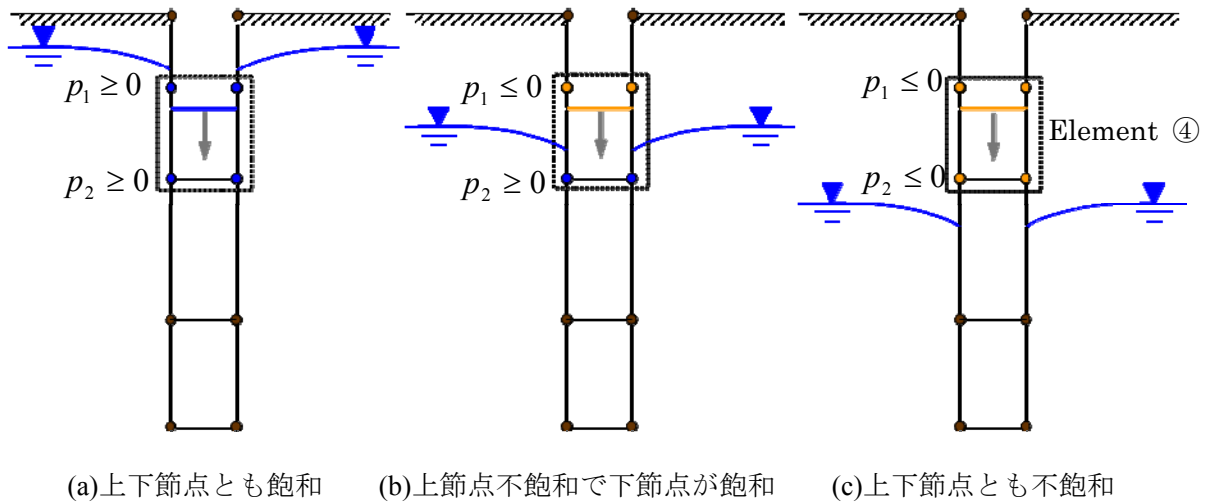


図 3-3 掘削部該当要素の飽和条件

この境界条件設定方法は 6.1 立坑掘削影響解析に適用し、良好な結果を得た。この結果の一例として、立坑から 10m 離れた二つの節点の非定常な全水頭の変化を図 3-4 に示す。図中、横軸は掘削開始時点からの経過時間、縦軸が全水頭である。破線は掘削に伴う立坑底部を示している。

(a)EL210m における立坑から 10m 離れた節点では、立坑底部が EL250m を過ぎた頃より水頭の低下を示し、その低下は掘削に応じた低下を示していることから設定した境界条件が適切に降下

していることがわかる。

(b)EL135m における立坑から 10m 離れた節点は、掘削底部に該当する標高にあり、始めの 500 日間は水位変動がほとんどなく、立坑底部が 150m まで下りた時点から水頭低下を示している。始めの 500 日間は立坑底部から距離があることなどで応答がなく、立坑底部が近づいた時点からは掘削工程と調和的な水頭低下を示していると考えられ、この節点においても設定した境界条件が適切に機能したものと考えられる。

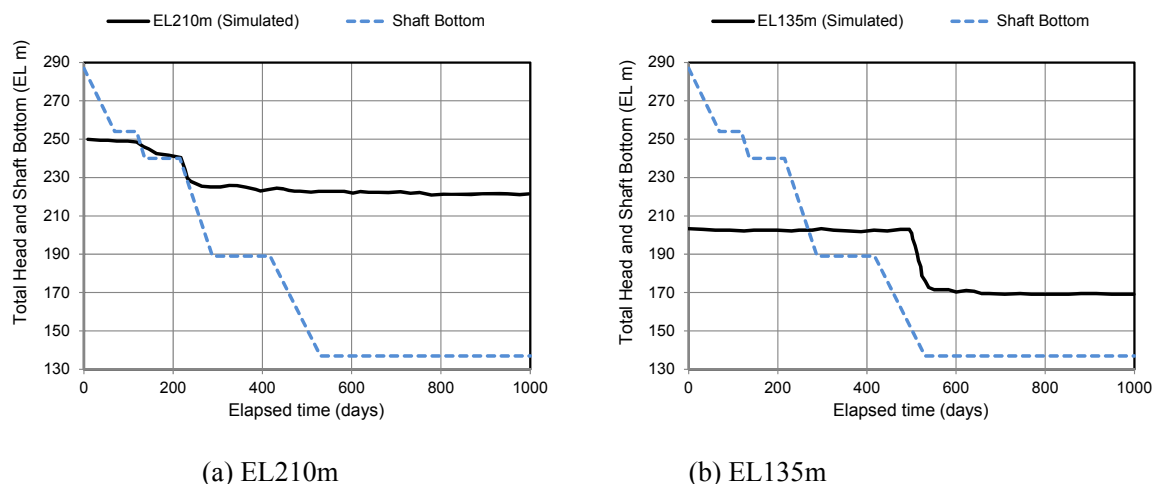


図 3-4 立坑掘削影響解析における全水頭の経時変化例

3.4 蒸発量を考慮した地下空洞壁面の境界条件設定方法

3.4.1 地下空洞周辺に設定される境界条件とその課題

地下空洞周辺に設定される境界条件は通常、図3-5に示す (a) 圧力固定条件（通常圧力は大気圧に等しいとする）、(b)自由浸出条件（飽和の場合は大気圧に等しいとする圧力固定条件、不飽和時には不透水条件）および (c)流量固定条件、の3種類が適用条件に応じて設定される。(d) は圧力固定と流量固定を壁面上で使い分けた場合である。(a)は地下水面下の岩盤に空洞を設置した場合には解析上、不飽和領域が生じない。また、時間の経過とともに周囲の水位が低下した場合、(a')に示すように壁面から岩盤へ水が供給される不適切な設定となる可能性がある。(b)は壁面の圧力状況に応じた境界条件が設定でき一般によく適用される。しかし、岩盤の透水係数が小さい場合、壁面からの蒸発による流出を考慮できず、本来不飽和領域が生じているにもかかわらず不飽和領域を解析的に表現できない場合が考えられる。(c)は適切な流量設定により不飽和領域の発生およびその広がり表現可能であるが、設定する流量が小さいと(c')に示すように壁面は飽和状態が維持される場合もある。また、掘削直後の圧力の急減や大きな流出量発生とその経時変化の表現は不可能である。(d)は圧力固定と流量固定の条件を部分的に使い分け、この図では理想的に見えるが、事前に決めるのは難しく、壁面状態の経時的変化に対応できない。通常の道路や鉄道のトンネルなど、主に湧水量や地下水位低下を評価対象とし詳細な不飽和領域の評価が必要でな

い場合では(b)の自由浸出境界で十分であるが、放射性廃棄物の地層処分や液化石油ガスの地下貯蔵においては透水性の低い岩盤を利用するために空洞内換気による壁面からの蒸発が岩盤の不飽和形成に無視できず、境界条件として壁面からの蒸発や自由浸出を考慮しうる境界条件設定手法が必要であり、これ一つの課題である。

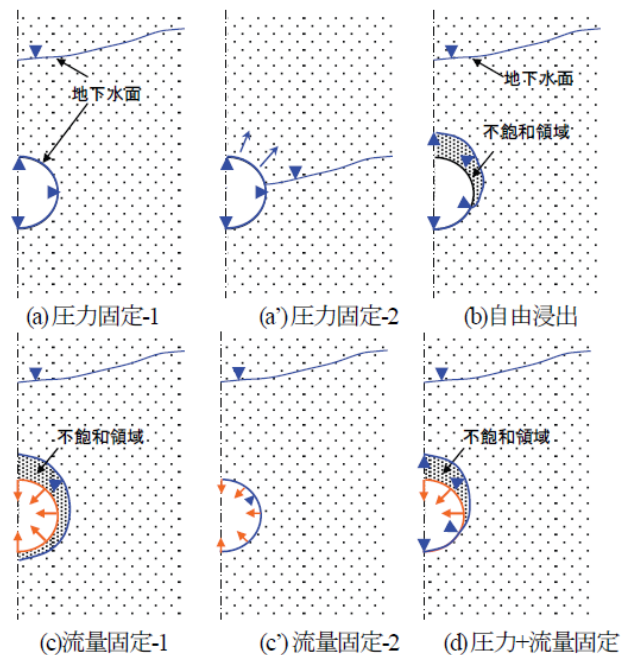


図 3-5 地下空洞周辺に設定される境界条件

(青い▼と青い線が地下水面，青い矢印が壁面から岩盤への水の流れ，黄色い線が壁面での不飽和部，黄色い矢印が水蒸気の移動を示す。)

3.4.2 空洞への地下水流出量と蒸発量

地下空洞掘削直後からの空洞への地下水流出量（単位時間あたりに空洞へ流出する地下水の流量）の経時変化のイメージを図3-6（櫛原ほか，2000）に示す。空洞への地下水流出量の経時変化は地山や岩盤の正常により二つのタイプに分けられる。

掘削直後は掘削前の高い水圧の影響で空洞へ向かう動水勾配が大きく，背部の地下水圧により地下水が押し出され流出量が多い。空洞部への地下水流出に伴い空洞背部の水圧は徐々に低下し流出量は逡減（Step-1）する。

透水係数が大きく背部から十分な水の供給がある場合（Type-I），空洞壁面は飽和した状態で地下水の流出を継続する。この場合，壁面より地下水が浸み出る状態で，地下水は液体状で流下・滴下し，壁面は湿潤状態が保たれ不飽和領域は形成されない。この時の地下水流出量は，空洞を囲む地山の地下水供給能力（かん養量や透水係数など）により規定される。

透水係数が小さく背部からの十分な水分の供給がない場合（Type-II），掘削後の初期にはType-Iと同様に背部の地下水圧による押し出しにより飽和状態で流出（Step-1）するが，徐々に流出量は

低下する。壁面に流出した地下水は液体状で壁面を流下・滴下するが、一部は壁面より水蒸気として空气中に蒸発している。背部水圧の低下に伴い地下水流出量が低下すると液体状での流下・滴下はなくなり、壁面から気体状で水蒸気としての流出となり、換気風量などの蒸発条件により規制される流出メカニズム（Step-2）に遷移する。言い換えると、Step-1は空洞周辺地山主体の流出、Step-2は空洞内および空洞壁面の条件が主体となる流出であるといえる。

蒸発量が地下水供給量を上回ると空洞周辺に不飽和領域が広がる。蒸発量は、空洞背面の水圧分布よりも空洞壁面近傍の諸条件（空洞内の風速、気温、湿度）で決まる。渡邊ら^{33), 34)}によれば壁面からの蒸発量は $1\text{mg/m}^2/\text{s} \sim 30\text{mg/m}^2/\text{s}$ 程度と報告されている。これを空洞からの流出量とし、空洞背部の動水勾配を 1.0 と仮定すると、飽和透水係数で $1 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8} \text{m/s}$ に相当する。言い換えるとおよそ 10^{-8}m/s オーダよりも小さい透水係数の岩盤(岩石)は図 3-6 に示す type-II に該当し、換気等による壁面からの蒸発により空洞背部岩盤内に不飽和領域が形成される可能性があるといえる。

上記のように透水係数の小さい岩盤においては、不飽和領域の発生とその広がり、及び地下水流出量の経時変化を数値解析より再現するためには、流出状況や流出メカニズムに応じた境界条件を適切に設定する必要がある。ここで、空洞壁面からの蒸発量 E_v （空洞内の気温・湿度、送風条件や岩盤の水理条件等により決まり時間的に変化する可能性がある）、浸出量 q （壁面を大気圧とした際の流出量、岩盤から空洞への流れを+）とすると、壁面に設定する境界条件は q と E_v の大小関係により以下のように示される。

$q \geq E_v$: 流出量 → 圧力固定境界条件（ディリクレ条件）

$q < E_v$: 流出量 → 流量固定境界条件（ノイマン条件）

空洞壁面に設定する境界条件は壁面上節点の圧力、流出量、蒸発条件により2種類の境界条件を使い分け、壁面上に2種類の境界条件が混在しこれをハイブリッド境界条件と表現する。圧力固定境界条件の場合、岩盤から壁面への流出が前提であり、圧力固定とした場合に壁面上の節点から岩盤へ流入となるような場合にはこの節点には不透水境界（流量0の条件）を適用する。これは自由浸出境界に該当するものであり、これも加えるとハイブリッド境界条件は3種類の境界条件の可能性を持つ。

通常の大気圧開放の地下空洞における浸透流解析の具体的な境界条件設定手順は以下のようになる。

(i) 圧力（＝大気圧）固定条件として計算を実施

(ii) 計算結果の節点流量の調査と判別

$q < 0$ の場合：→ 不透水境界

（空洞から岩盤への流入となる場合）

$q \geq \epsilon E_v$: 流出量 → 圧力固定境界条件（＝大気圧）

（ $\epsilon=0.9999$: 収束判定裕度設定値）

$q < E_v$: 流出量 → 流量固定境界条件（＝ E_v : 空洞壁面からの蒸発量）

(iii) 上記境界条件を設定し直し、再計算

(iv) 上記(ii), (iii)を収束するまで繰り返し

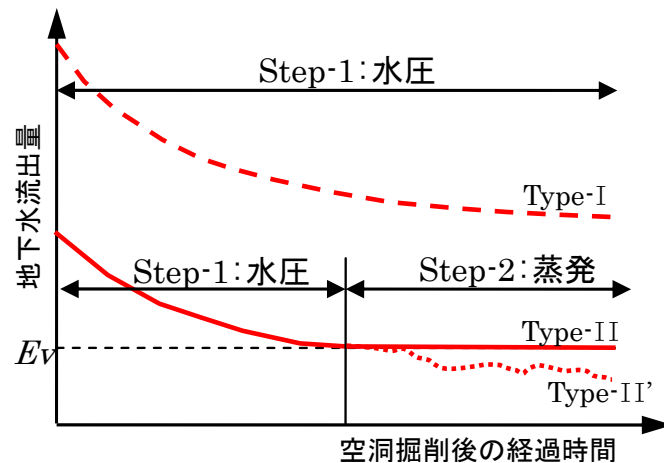


図 3-6 地下水流出力の経時変化イメージ

(空洞壁面からの蒸発量は一定としているが、実際には周辺岩盤の水理特性、空洞の換気条件等により変動する。この変動の一例をして Type-II' として示す。)

3.4.3 解析事例

前述の境界条件設定方法を土被り150m、直径3mの円形空洞を想定し、空洞を中心とする水平方向150m、鉛直方向250mの矩形の鉛直2次元断面モデル（左右対称より片側をモデル化、図3-7）に適用した。

境界条件は、地表部にかん養量（50mm/y、平均的年降水量の約3%相当）を与え、左側部は対称面であり不透水境界、底部も不透水境界を設定し、右側部は地表より20m下方に地下水面が存在するとした静水圧分布（図3-8）を設定した。

解析ケースは、空洞壁面に設定する境界条件と掘削影響を想定し空洞周辺不均質変化に関する組み合わせで6ケース（表3-1、全ケースとも最少体積含水率 $\theta_r=0$ ）を実施した。case5, case6は掘削影響により空洞周辺（壁面より1.5m以内の半ドーナツ状（図3-9、図3-10の破線））の透水係数（表-2の< >内）が1オーダー大きくなった場合を想定している。不飽和パラメータは他のケースと同じである。

蒸発量は不飽和領域の広がり強調し、流量の計算結果や設定した手法の評価を容易にする観点から一定値とした。実際に蒸発量を一定に保持するには、壁面からの蒸発量が低下を始める時点から壁面近傍の昇温や換気風量を増すなど、壁面近傍のサクションを大きくして水分移動を促進し蒸発量を保持する対応が必要となる。

初期条件は地下水位を地表面下20mにある静水圧分布とし、掘削により空洞部が大気解放された時点から564日間の非定常解析を実施した。

解析結果として、最終時点（564日経過時点）の空洞周辺の圧力水頭分布（図3-9）、飽和度分布（図3-10）を示す。空洞表面節点の流量、圧力水頭の経時変化を図3-11、図3-12に示す。

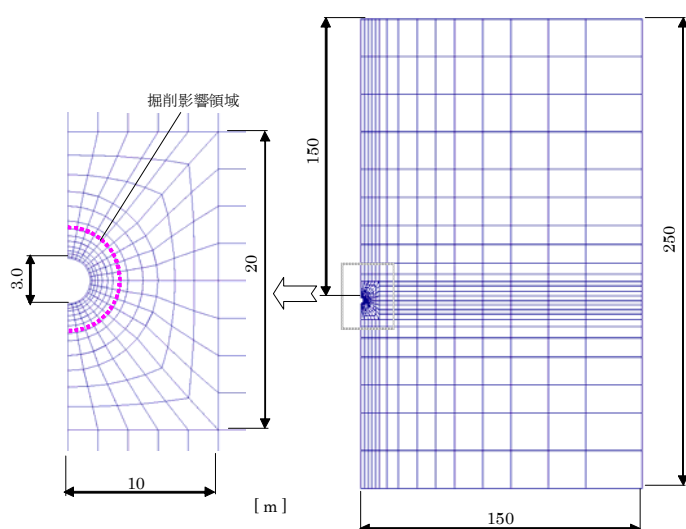


図 3-7 事例解析モデル形状

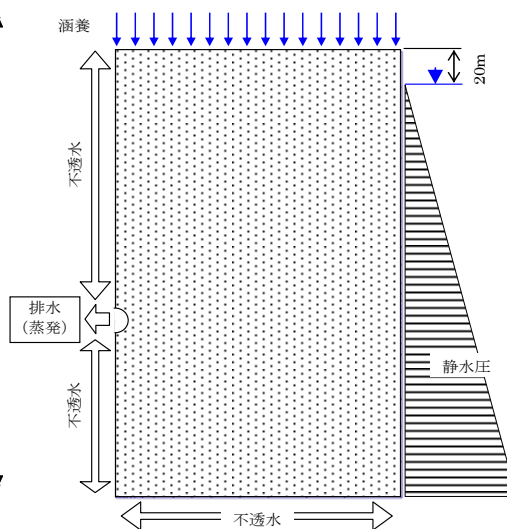


図 3-8 境界条件

表 3-1 解析ケース

解析 ケース	境界条件	蒸発量	間隙率	飽和 透水係数	比貯留 係数	VG式パラメータ		
		Ev	ϕ	k_{sat}	Ss	α	n_1	n_2
		[$\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]	[%]	[m s^{-1}]	[m^{-1}]	[m^{-1}]	[-]	[-]
case1	自由浸出	-	15	1×10^{-10}	1×10^{-5}	1×10^{-1}	1.237	3.0
case2	流量固定	5						
case3	ハイブリッド	5						
case4		10						
case5		5		1×10^{-10}				
case6		10		$<1 \times 10^{-9}>$				

case5, case6 における $<>$ 内の飽和透水係数は掘削影響想定部に対する値

また、空洞中心高さ壁面から水平奥行方向（図 3-9 と図 3-10 の解析ケース case1 に示す枠内の節点）における圧力水頭（図 3-13）、飽和度（図 3-14）分布の 6 ケースの比較を示す。図 3-15 には坑内への地下水流出量（対数表示）の経時変化を示す。図 3-16 には壁面から水平奥行き方向に 0m, 0.5m, 1.5m 地点における圧力水頭の経時変化を示し、図 3-17 には同じく 3 地点における飽和度の経時変化を示す。

図 3-11、図 3-12 に示す空洞表面節点の流量、圧力水頭の経時変化挙動より、空洞上方より準じ下方へ不飽和化が進展し、今回設定した境界条件が適切に機能していることが確認できる。

非定常解析の最終時点（564 日経過時点）における空洞周辺の圧力水頭（図 3-9、図 3-13）と飽和度の分布（図 3-10、図 3-14）に着目する。case1 では設定した境界条件より空洞壁面では圧力水頭 0m となり不飽和領域は発生しない。壁面に $5\text{mg/m}^2/\text{s}$ の蒸発量を想定した case2, case3 は

ほとんど同じ圧力水頭分布を示し、空洞壁面より 1m 付近まで不飽和領域が形成されている。同じ蒸発量を設定した case5 では、空洞周辺の透水係数が大きくなっている影響で圧力水頭および飽和度の低下量は小さいが、不飽和領域は壁面から 2m 程度まで広がっている。壁面に $10\text{mg/m}^2/\text{s}$ の蒸発量を想定した case4, case6 では空洞壁面より 2~2.5m 付近まで不飽和領域が形成され、case4 では壁面近傍で著しい圧力水頭の低下を示している。

空洞への流出量の経時変化（図3-15）に着目する。初期の流量はcase1, case3, case4はほぼ同じ通減曲線を示し、case5とcase6は別の通減曲線を示す。この初期の期間は壁面が飽和し、岩盤の透水係数と背部の水圧で流出量が規定される状態であり、透水係数設定が同じ場合に流出量は等しくなる。同じ通減曲線のcase1, case3, case4で、case4では蒸発量（換気より誘発される水分の壁面からの蒸発、強制排水量） $10\text{mg/m}^2/\text{s}$ 相当の流量（ $E_v=10\text{mg/m}^2/\text{s}=10\times 10^{-9}\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$, $A=0.5\times 3.0\pi=1.5\pi\text{m}^2$, $q=E_vA=0.0028\text{L/min}$ ）になった時点で固定流量条件が適用され一定流出量に移行する。case3では蒸発量 $5\text{mg/m}^2/\text{s}$ 相当の流量（ $E_v=5\text{mg/m}^2/\text{s}=5\times 10^{-9}\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$, $A=0.5\times 3.0\pi=1.5\pi\text{m}^2$, $q=E_vA=0.0014\text{L/min}$ ）になった時点で固定流量条件が適用され一定流出量に移行し、case1は通減を継続する。case5とcase6でも同様にそれぞれ設定した蒸発量にて、それぞれの蒸発量相当流出時点で分岐し一定流出量に移行する。一方case2は流量一定の境界条件であり初期より一定流出量となっている。

ここで提示したハイブリッド境界条件により、掘削初期は壁面が飽和の条件で岩盤特性や間隙水圧分布を反映した湧水量を算定でき、湧水量が低下して換気による壁面からの蒸発量が卓越する場合には蒸発量による流出を算定することができる。実際のトンネルに関しては現地における蒸発量の実測値と換気条件との相関性の把握などにより、換気条件に応じた蒸発量設定ができ、ハイブリッド境界条件を適応してより現実的な湧水量の予測が可能になると考えられる。

図3-16, 図3-17では、空洞壁面から奥行き方向の3点における各ケースの圧力水頭と飽和度の非定常変化を示している。空洞壁面における圧力水頭の変化（図3-16 (a)）では、case2を除く5ケースで解析初期より瞬時に大気圧（圧力水頭0m）に移行しているが、case2では一定の排水量（蒸発量）に固定されているため、圧力低下が遅くなっている。case1では設定した境界条件の影響で圧力水頭は負圧にならず、また不飽和となることもない。ハイブリッド境界条件を設定したcase3~case6では時間経過に伴い、設定した透水係数や蒸発量に応じた圧力低下、飽和度の低下（壁面から1.5mのcase3は飽和）を示し、設定に応じた適切な結果を示している。

case2とcase3を比較すると初期の50日までは値が異なるものの、徐々に両者の違いが小さくなっている。このことから掘削初期の透水挙動を取り扱う場合には今回提案したハイブリッド境界条件設定が必要であるが、長期経過した時点の不飽和領域の広がりを取り扱う場合には境界壁面に蒸発量など流量固定条件を設定するだけでよいといえる。

今回提案するハイブリッド境界条件を適用することで掘削初期段階の流出量の非定常変化、圧力水頭の低下や飽和度の低下挙動がより高精度にシミュレーション可能になったことが確認された。一方、長期経過時点の不飽和領域の評価では境界部の流量を固定する境界条件でも十分であることが示された。また、設定する境界部の流量による圧力水頭や飽和度の変化に与える影響が大きいことが確認され、実サイトにおける評価では渡辺ら（1990）のように、壁面からの蒸発

量を直接測定して与えたり，直接測定した蒸発量と空洞内の温度湿度や換気条件との相関性を把握して境界条件となる壁面の蒸発量を適切に設定するなどの必要性が示唆された。

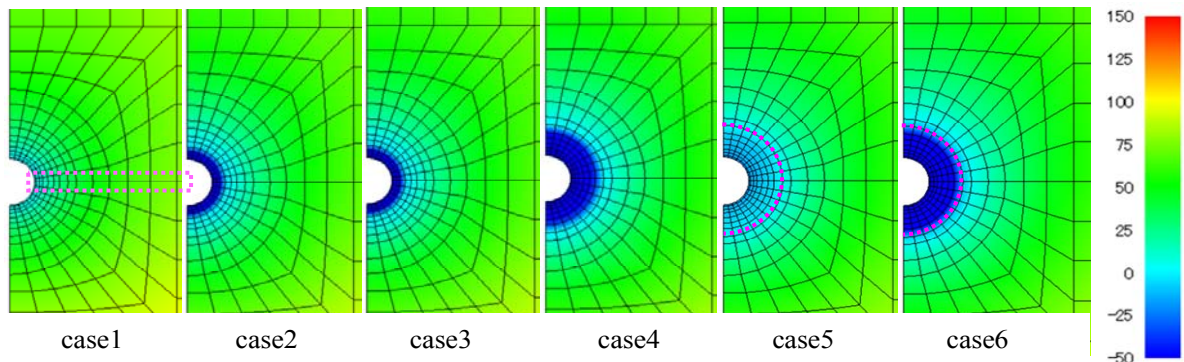


図 3-9 空洞周辺の圧力水頭分布（掘削後 564 日，単位：m）

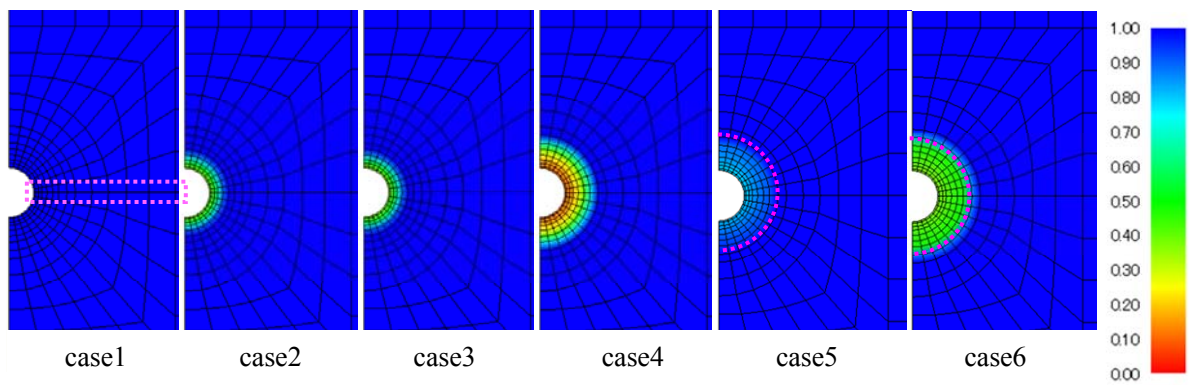


図 3-10 空洞周辺の飽和度分布（掘削後 564 日）

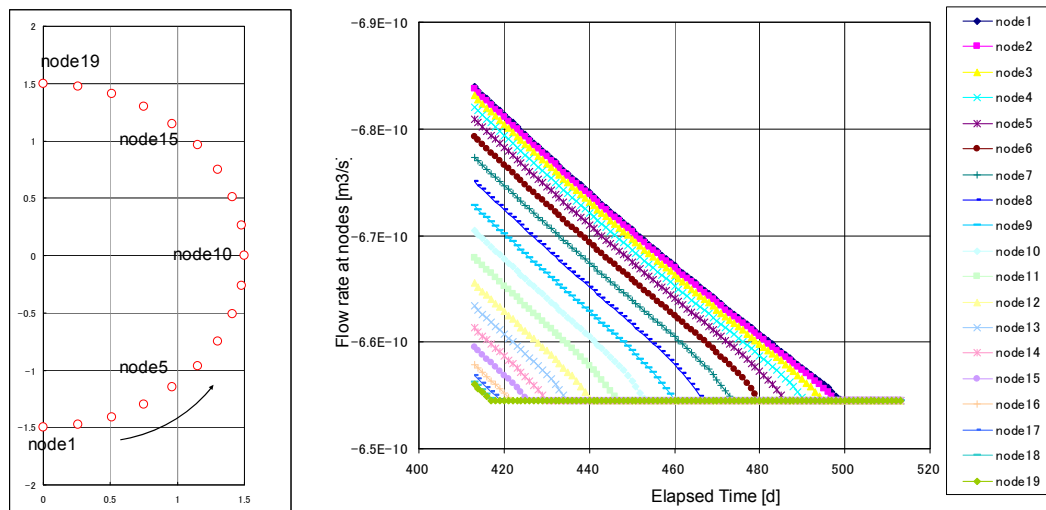


図 3-11 坑壁面上節点の流量の経時変化

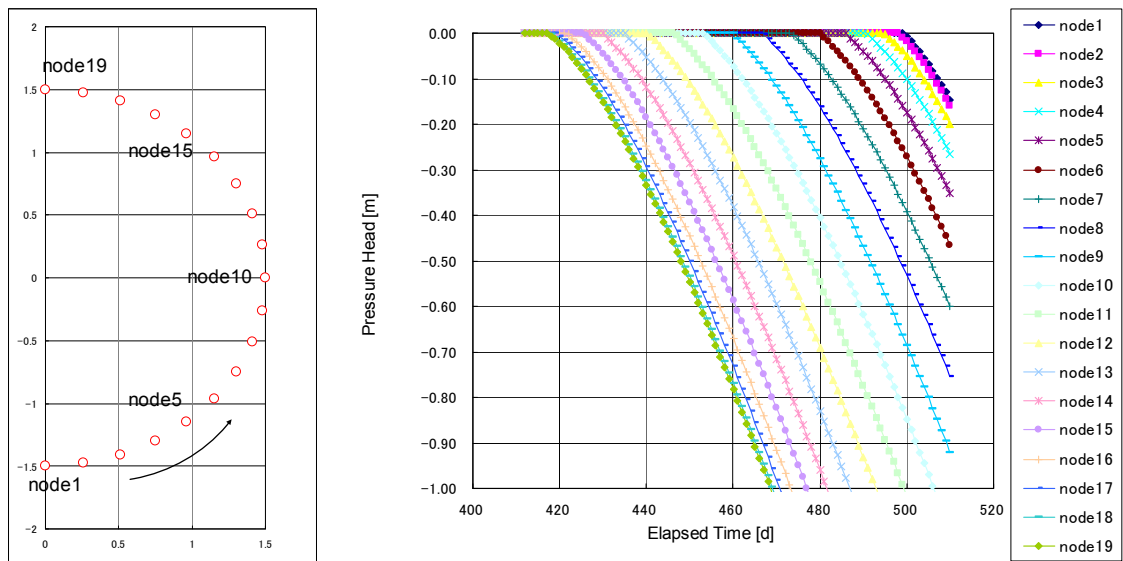


図 3-12 坑壁面上節点の圧力水頭の経時変化

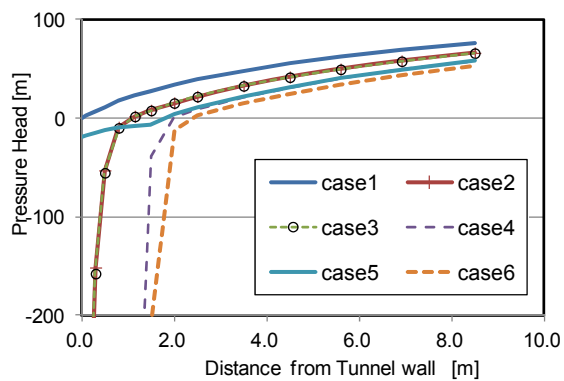


図 3-13 空洞壁面からの圧力水頭分布
(掘削後 564 日)

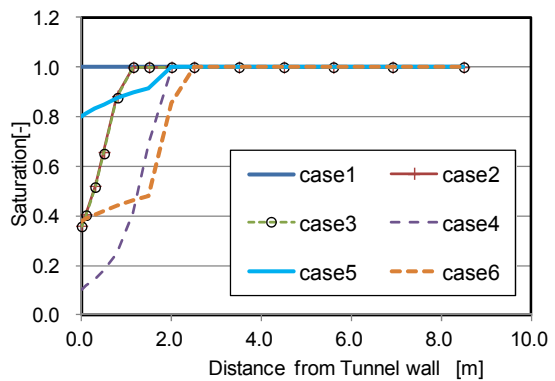


図 3-14 空洞壁面からの飽和度分布
(掘削後 564 日)

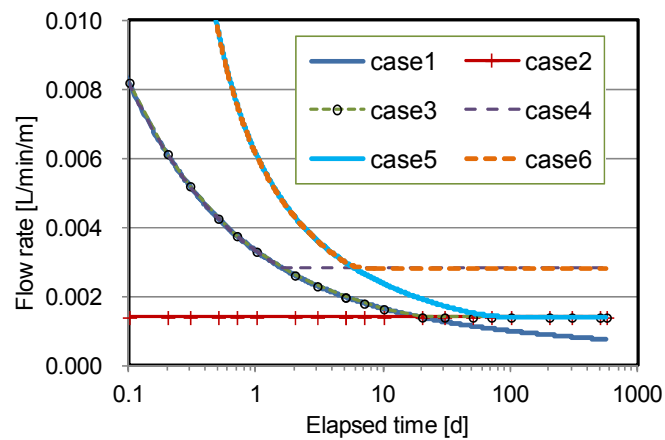


図 3-15 流出量の経時変化

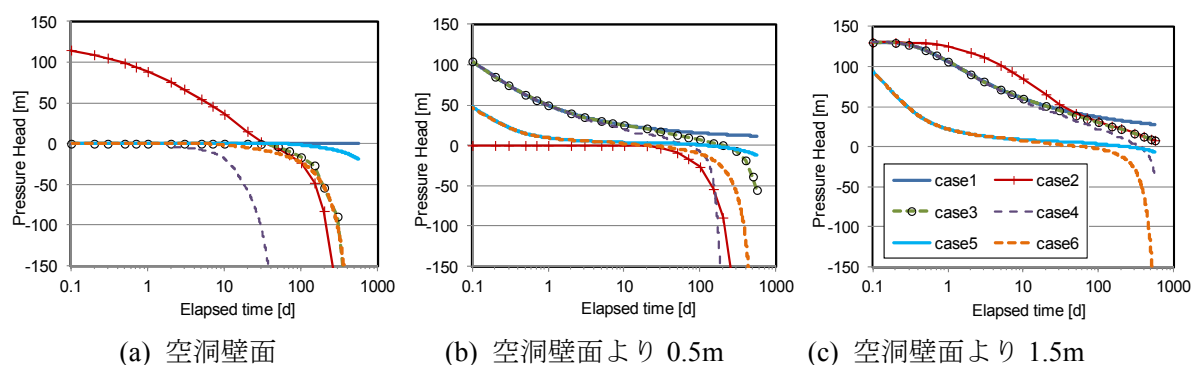


図 3-16 圧力水頭の経時変化

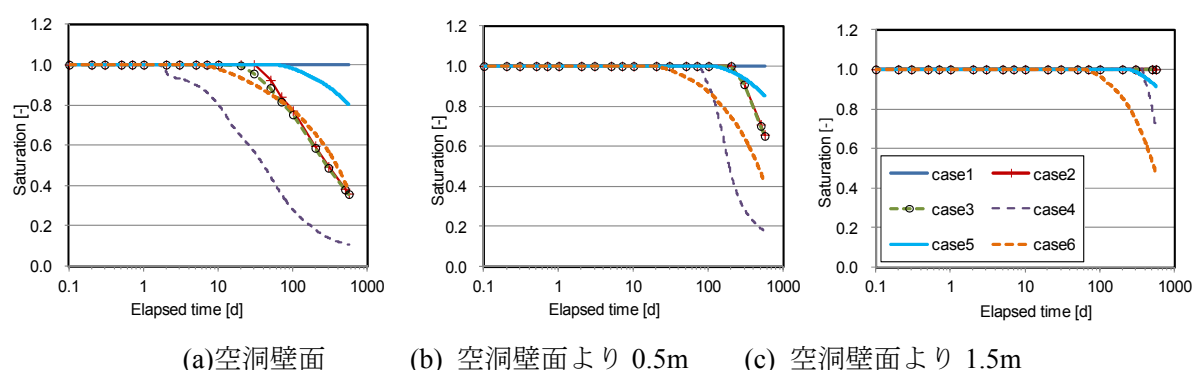


図 3-17 飽和度の経時変化

3.5 涵養量を考慮した広域地下水位流動表面の境界条件設定方法

広域地下水流動解析を実施する場合、河川・湖沼に関してはその位置の水位を固定水頭として与えるが、他の場所に関しては地表より涵養量を与える。斜面下方や谷地形の箇所では地下水面が地表に現れ、この場合には自由浸出面として地表に圧力水頭 0m に固定する。この場合、計算を行う前に地表面のどの部分が浸出面で、どの部分が涵養面であるかを把握することは難しく、何度かの繰り返し計算が必要となる。さらに、長期地質環境の変遷を考慮する広域地下水流動の場合などでは、涵養量が変動するため、より難しい課題である。

通常、表面に涵養量と自由浸出境界を設定し、地表面全体に涵養量を与え計算を実施、地表面がすべて不飽和である場合は、全表面に設定した涵養量が固定流量境界として入力されることになる。一方、圧力水頭が 0m 以上となっている表面節点がある場合、この節点には涵養量としての流量は与えず圧力水頭 0m の固定水頭条件に変更して再度計算を実施する。さらに、浸出すなわち流出であることから、圧力水頭 0m の固定水頭条件にした場合に、この箇所での流量 q は負値（流出、正值は流入を示す）を満足する必要がある。

上記設定で計算すると、斜面表面における圧力や流量は図 3-18(a)にイメージとして示した分布となり、流量が急変し、不自然な解析結果となる。従来このような現象に対する問題点の指摘はなされていない。図中の q は地表面での流量、 p は地表面の圧力水頭、 R はあらかじめ設定した涵

養量を示す。

このような状況に対して、境界条件の判定ロジックの改良を行った。従来の自由浸出となる条件では、飽和であること ($p>0$) と圧力水頭 0m の固定水頭条件にした場合に、この箇所での流量 q は負値（流出，正值は流入を示す）を満足するとしている。このため、地表面では飽和しても涵養があるよう、 q は流出・流入（正・負値）の判定ではなく、設定した涵養量 R との大小比較により判定する方法を考案した。この結果のイメージは図 3-18(b)のものである。この涵養と流出の境目部分を拡大したイメージが図 3-18(c)である。

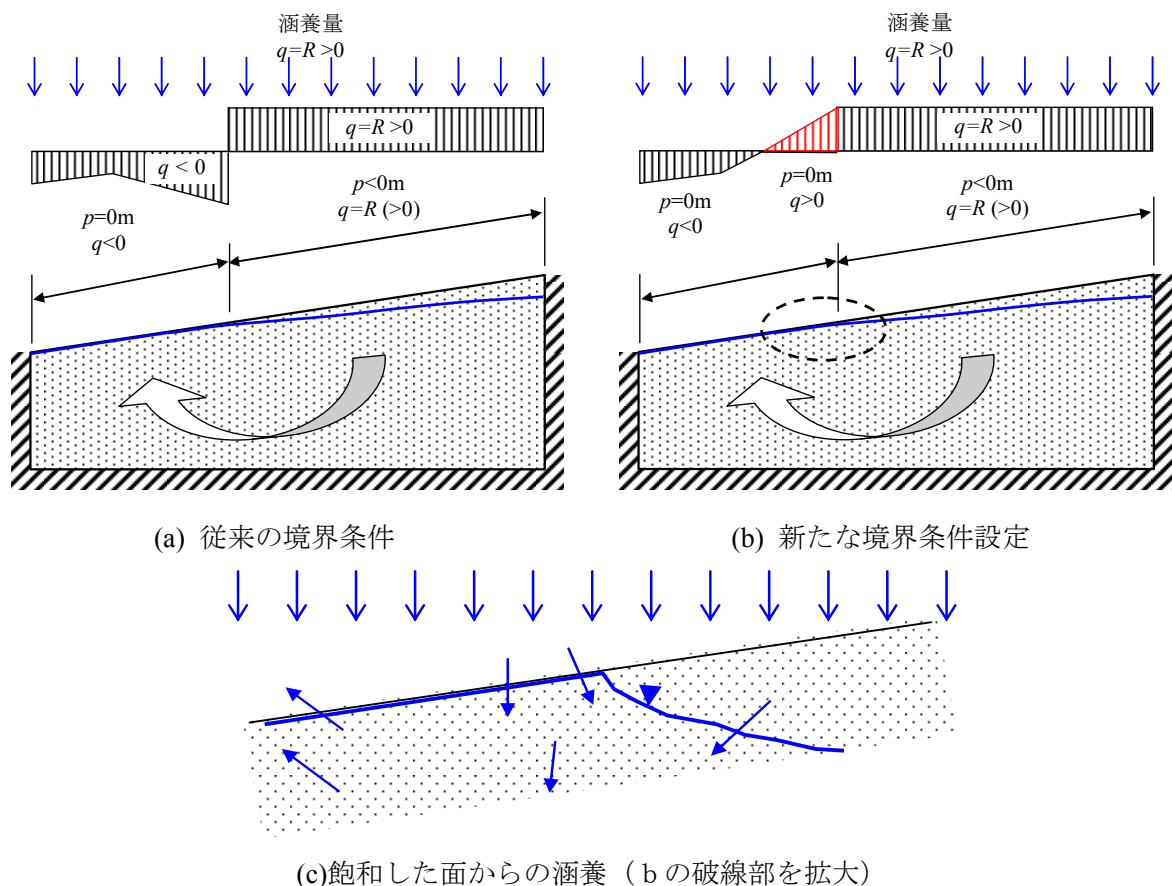


図 3-18 地表面境界条件設定と解析結果のイメージ

この方法の適用結果を以下に示す。適用対象のモデルを図 3-19 に示す。設定した境界条件，不飽和浸透パラメータを図 3-20，図 3-21 に示す。解析は設定した透水係数の組み合わせで表 3-2 に示す 4 ケースである。

各ケースに対する解析結果（定常状態）をそれぞれ図 3-22 から図 3-25，表 3-3 から表 3-6 に示す。図は，上から(a)全水頭，流向分布，(b)地形，全水頭，涵養量（＋流入，－流出）を示す。地形と全水頭の関係でおおよその地下水面形状が推定され，地形と全水頭が一致している箇所が飽和していることを示す。

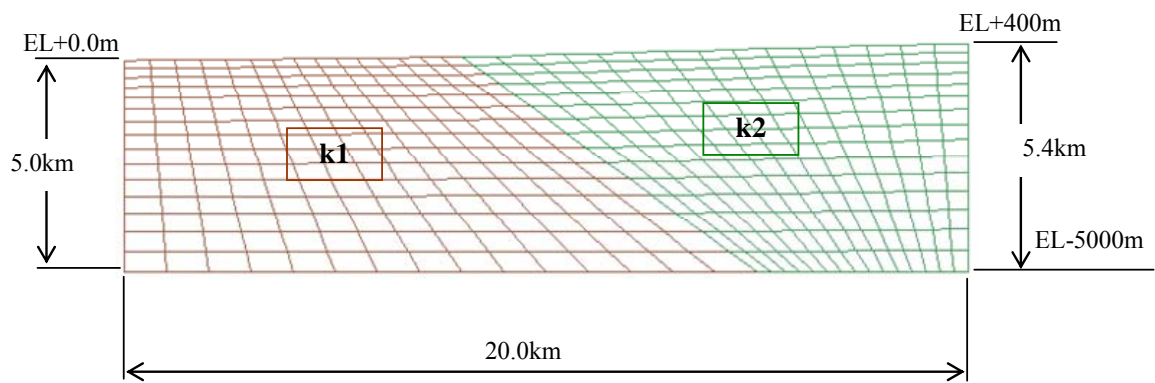


図 3-19 解析モデルの形状スケール

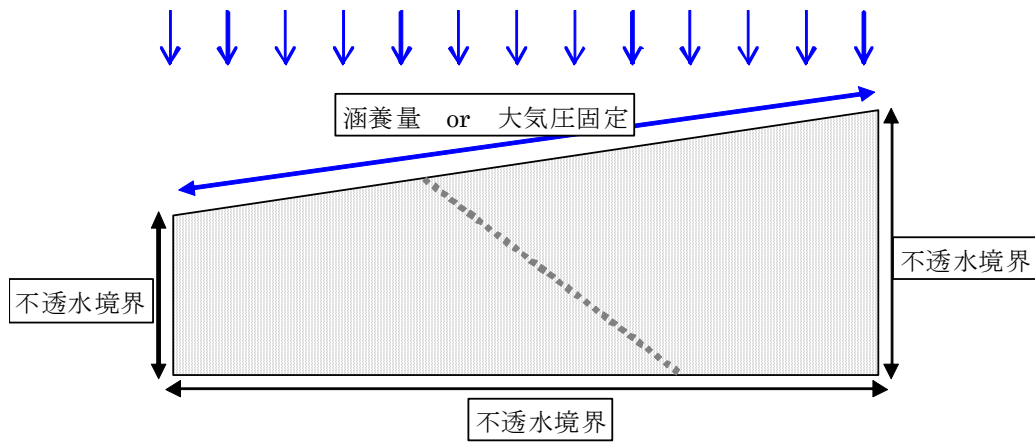


図 3-20 設定した境界条件

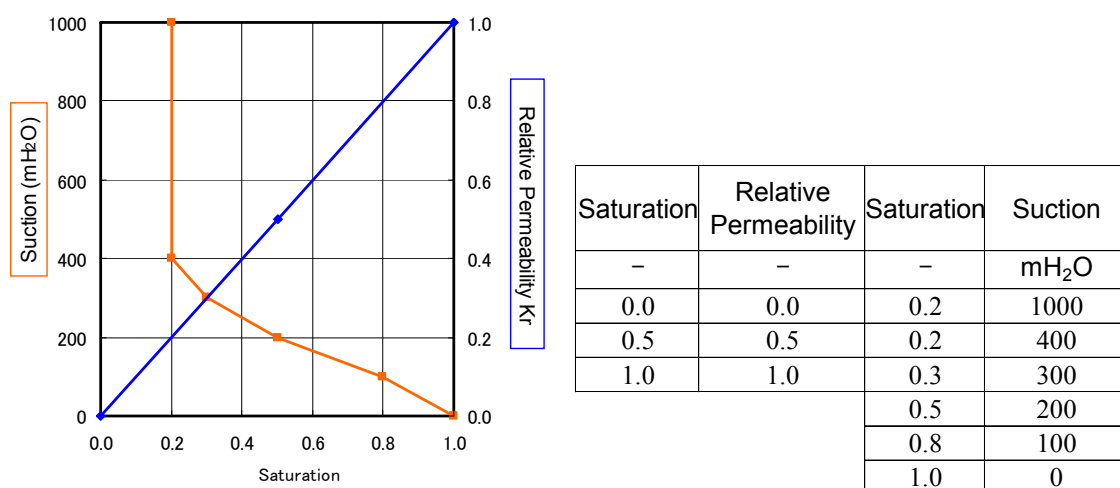


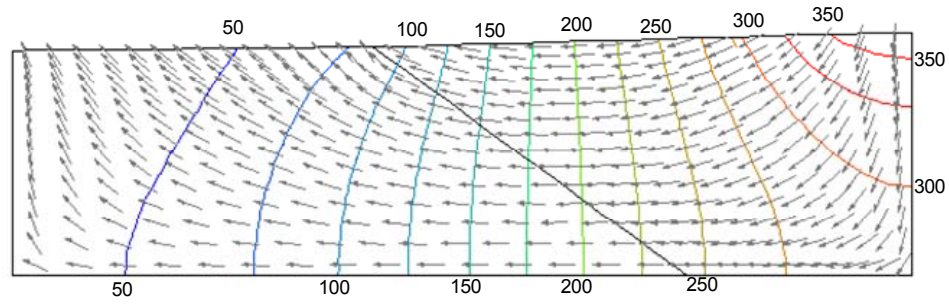
図 3-21 設定した不飽和特性

表 3-2 解析ケースと物性，涵養量

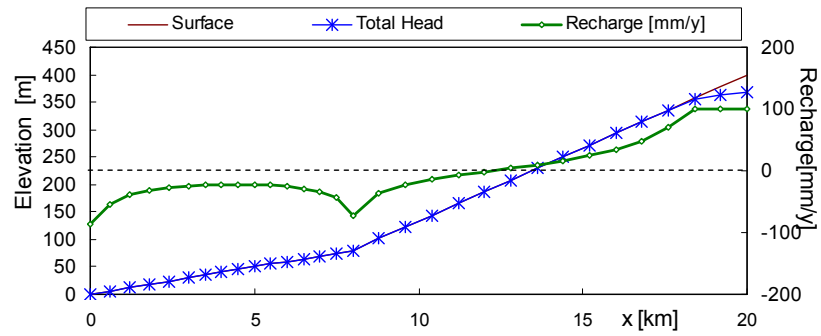
解析ケース	k1	k2	recharge
case1	1E-7	1E-7	100
case2	1E-6	1E-6	100
case3	1E-7	1E-6	100
case4	1E-6	1E-7	100

単位／透水係数[m/s]／涵養量[mm/y]

表は節点位置，全水頭，圧力水頭，節点流量とその涵養量換算，表の下方には＋流入，－流出それぞれの合計を示す。表で着色している箇所は飽和部で流入している部分を示す。この部分が新しく提案した境界条件設定の効果が確認される箇所である。この境界条件設定により斜面上方の涵養量が徐々に低下し流出に転じているのが確認される。



(a)全水頭, 流向分布

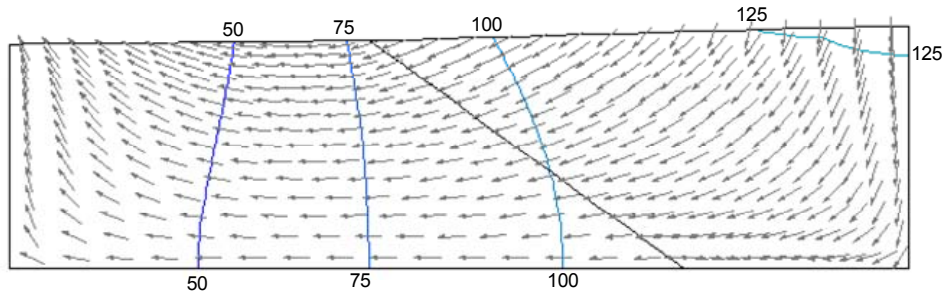


(b)地形, 全水頭, 涵養量 (+流入, -流出)

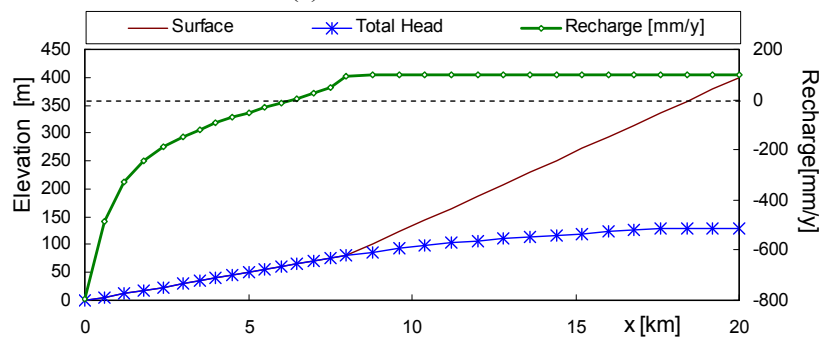
図 3-22 case1

表 3-3 表面の節点における解析結果

No	node_ID	x	z	全水頭	圧力水頭	飽和度	節点流量	涵養量換算
		m	m	m	m	-	m ³ /s	mm/y
1	1	0	0.0	0.0	0.0	1.00	-8.16E-07	-86
2	17	600	6.0	6.0	0.0	1.00	-1.05E-06	-55
3	33	1200	12.0	12.0	0.0	1.00	-7.52E-07	-40
4	49	1800	18.0	18.0	0.0	1.00	-6.12E-07	-32
5	65	2400	24.0	24.0	0.0	1.00	-5.22E-07	-27
6	81	3000	30.0	30.0	0.0	1.00	-4.27E-07	-25
7	97	3500	35.0	35.0	0.0	1.00	-3.61E-07	-23
8	113	4000	40.0	40.0	0.0	1.00	-3.46E-07	-22
9	129	4500	45.0	45.0	0.0	1.00	-3.43E-07	-22
10	145	5000	50.0	50.0	0.0	1.00	-3.50E-07	-22
11	161	5500	55.0	55.0	0.0	1.00	-3.68E-07	-23
12	177	6000	60.0	60.0	0.0	1.00	-4.01E-07	-25
13	193	6500	65.0	65.0	0.0	1.00	-4.53E-07	-29
14	209	7000	70.0	70.0	0.0	1.00	-5.37E-07	-34
15	225	7500	75.0	75.0	0.0	1.00	-6.84E-07	-43
16	241	8000	80.0	80.0	0.0	1.00	-1.48E-06	-72
17	257	8800	101.3	101.3	0.0	1.00	-9.08E-07	-36
18	273	9600	122.7	122.7	0.0	1.00	-5.63E-07	-22
19	289	10400	144.0	144.0	0.0	1.00	-3.52E-07	-14
20	305	11200	165.3	165.3	0.0	1.00	-1.87E-07	-7
21	321	12000	186.7	186.7	0.0	1.00	-4.19E-08	-2
22	337	12800	208.0	208.0	0.0	1.00	9.86E-08	4
23	353	13600	229.3	229.3	0.0	1.00	2.46E-07	10
24	369	14400	250.7	250.7	0.0	1.00	4.12E-07	16
25	385	15200	272.0	272.0	0.0	1.00	6.09E-07	24
26	401	16000	293.3	293.3	0.0	1.00	8.59E-07	34
27	417	16800	314.7	314.7	0.0	1.00	1.21E-06	48
28	433	17600	336.0	336.0	0.0	1.00	1.79E-06	71
29	449	18400	357.3	355.3	-2.1	0.49	2.54E-06	100
30	465	19200	378.7	363.8	-14.9	0.20	2.54E-06	100
31	481	20000	400.0	367.1	-32.9	0.19	1.27E-06	100
Outflow Total							-1.16E-05	-18.23
Inflow Total							1.16E-05	18.23



(a)全水頭，流向分布

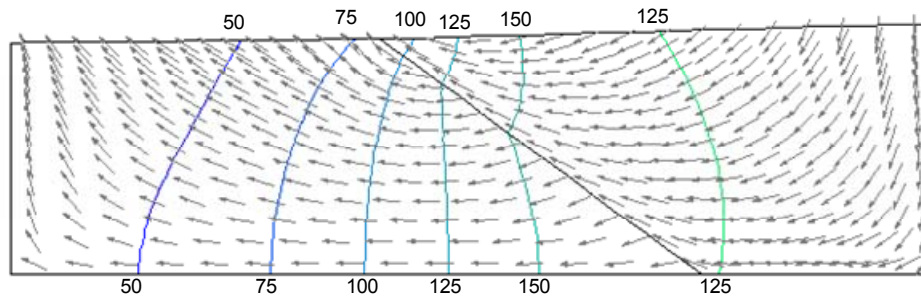


(b)地形，全水頭，涵養量（＋流入，－流出）

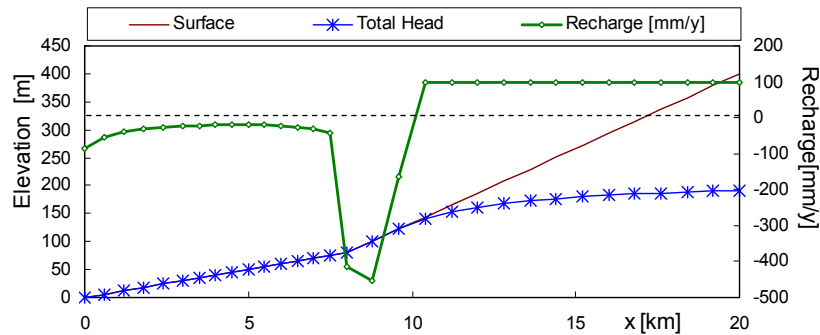
図 3-23 case2

表 3-4 表面の節点における解析結果

No	node_ID	x	z	全水頭	圧力水頭	飽和度	節点流量	涵養量換算
		m	m	m	m	-	m ³ /s	mm/y
1	1	0	0.0	0.0	0.0	1.00	-7.53E-06	-792
2	17	600	6.0	6.0	0.0	1.00	-9.23E-06	-485
3	33	1200	12.0	12.0	0.0	1.00	-6.19E-06	-325
4	49	1800	18.0	18.0	0.0	1.00	-4.68E-06	-246
5	65	2400	24.0	24.0	0.0	1.00	-3.60E-06	-190
6	81	3000	30.0	30.0	0.0	1.00	-2.60E-06	-149
7	97	3500	35.0	35.0	0.0	1.00	-1.87E-06	-118
8	113	4000	40.0	40.0	0.0	1.00	-1.48E-06	-93
9	129	4500	45.0	45.0	0.0	1.00	-1.13E-06	-71
10	145	5000	50.0	50.0	0.0	1.00	-8.16E-07	-51
11	161	5500	55.0	55.0	0.0	1.00	-5.21E-07	-33
12	177	6000	60.0	60.0	0.0	1.00	-2.35E-07	-15
13	193	6500	65.0	65.0	0.0	1.00	5.72E-08	4
14	209	7000	70.0	70.0	0.0	1.00	3.75E-07	24
15	225	7500	75.0	75.0	0.0	1.00	7.60E-07	48
16	241	8000	80.0	80.0	0.0	1.00	1.92E-06	93
17	257	8800	101.3	86.8	-14.5	0.20	2.54E-06	100
18	273	9600	122.7	92.6	-30.0	0.19	2.54E-06	100
19	289	10400	144.0	97.9	-46.1	0.19	2.54E-06	100
20	305	11200	165.3	102.6	-62.8	0.19	2.54E-06	100
21	321	12000	186.7	106.8	-79.9	0.18	2.54E-06	100
22	337	12800	208.0	110.6	-97.4	0.18	2.53E-06	100
23	353	13600	229.3	113.9	-115.4	0.18	2.54E-06	100
24	369	14400	250.7	117.1	-133.6	0.17	2.54E-06	100
25	385	15200	272.0	120.1	-151.9	0.17	2.54E-06	100
26	401	16000	293.3	122.9	-170.5	0.16	2.54E-06	100
27	417	16800	314.7	125.6	-189.1	0.16	2.54E-06	100
28	433	17600	336.0	127.7	-208.3	0.15	2.54E-06	100
29	449	18400	357.3	128.7	-228.7	0.15	2.54E-06	100
30	465	19200	378.7	129.3	-249.3	0.15	2.54E-06	100
31	481	20000	400.0	129.6	-270.4	0.14	1.27E-06	100
Outflow Total							-3.99E-05	-62.91
Inflow Total							3.99E-05	62.91



(a)全水頭, 流向分布

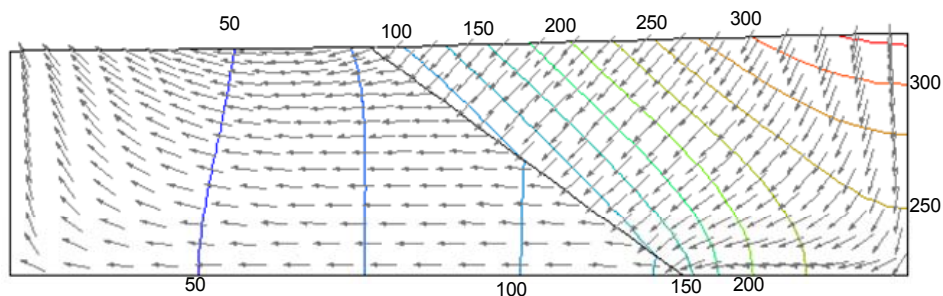


(b)地形, 全水頭, 涵養量 (+流入, -流出)

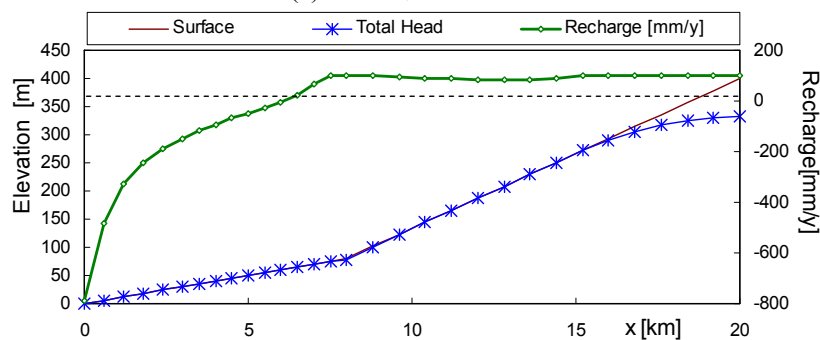
図 3-24 case3

表 3-5 表面の節点における解析結果

No	node_ID	x	z	全水頭	圧力水頭	飽和度	節点流量	涵養量換算
		m	m	m	m	-	m ³ /s	mm/y
1	1	0	0.0	0.0	0.0	1.00	-8.05E-07	-85
2	17	600	6.0	6.0	0.0	1.00	-1.03E-06	-54
3	33	1200	12.0	12.0	0.0	1.00	-7.31E-07	-38
4	49	1800	18.0	18.0	0.0	1.00	-5.89E-07	-31
5	65	2400	24.0	24.0	0.0	1.00	-4.96E-07	-26
6	81	3000	30.0	30.0	0.0	1.00	-4.01E-07	-23
7	97	3500	35.0	35.0	0.0	1.00	-3.34E-07	-21
8	113	4000	40.0	40.0	0.0	1.00	-3.16E-07	-20
9	129	4500	45.0	45.0	0.0	1.00	-3.09E-07	-20
10	145	5000	50.0	50.0	0.0	1.00	-3.12E-07	-20
11	161	5500	55.0	55.0	0.0	1.00	-3.27E-07	-21
12	177	6000	60.0	60.0	0.0	1.00	-3.56E-07	-22
13	193	6500	65.0	65.0	0.0	1.00	-4.06E-07	-26
14	209	7000	70.0	70.0	0.0	1.00	-4.93E-07	-31
15	225	7500	75.0	75.0	0.0	1.00	-6.57E-07	-41
16	241	8000	80.0	80.0	0.0	1.00	-8.50E-06	-413
17	257	8800	101.3	101.3	0.0	1.00	-1.14E-05	-451
18	273	9600	122.7	122.7	0.0	1.00	-4.18E-06	-165
19	289	10400	144.0	141.3	-2.7	0.36	2.54E-06	100
20	305	11200	165.3	152.6	-12.7	0.20	2.54E-06	100
21	321	12000	186.7	161.0	-25.7	0.20	2.54E-06	100
22	337	12800	208.0	167.4	-40.6	0.19	2.54E-06	100
23	353	13600	229.3	172.6	-56.8	0.19	2.54E-06	100
24	369	14400	250.7	176.7	-74.0	0.18	2.54E-06	100
25	385	15200	272.0	180.0	-92.0	0.18	2.54E-06	100
26	401	16000	293.3	182.6	-110.7	0.18	2.54E-06	100
27	417	16800	314.7	184.8	-129.8	0.17	2.54E-06	100
28	433	17600	336.0	186.8	-149.2	0.17	2.54E-06	100
29	449	18400	357.3	188.6	-168.8	0.16	2.54E-06	100
30	465	19200	378.7	190.2	-188.5	0.16	2.54E-06	100
31	481	20000	400.0	191.1	-208.9	0.15	1.27E-06	100
Outflow Total							-3.17E-05	-50.00
Inflow Total							3.17E-05	50.00



(a) 全水頭, 流向分布



(b) 地形, 全水頭, 涵養量 (+ 流入, - 流出)

図 3-25 case4

表 3-6 表面の節点における解析結果

No	node_ID	x	z	全水頭	圧力水頭	飽和度	節点流量	涵養量換算
		m	m	m	m	-	m ³ /s	mm/y
1	1	0	0.0	0.0	0.0	1.00	-7.52E-06	-791
2	17	600	6.0	6.0	0.0	1.00	-9.22E-06	-485
3	33	1200	12.0	12.0	0.0	1.00	-6.18E-06	-325
4	49	1800	18.0	18.0	0.0	1.00	-4.67E-06	-246
5	65	2400	24.0	24.0	0.0	1.00	-3.60E-06	-189
6	81	3000	30.0	30.0	0.0	1.00	-2.59E-06	-148
7	97	3500	35.0	35.0	0.0	1.00	-1.85E-06	-117
8	113	4000	40.0	40.0	0.0	1.00	-1.46E-06	-92
9	129	4500	45.0	45.0	0.0	1.00	-1.10E-06	-69
10	145	5000	50.0	50.0	0.0	1.00	-7.69E-07	-49
11	161	5500	55.0	55.0	0.0	1.00	-4.45E-07	-28
12	177	6000	60.0	60.0	0.0	1.00	-1.03E-07	-7
13	193	6500	65.0	65.0	0.0	1.00	3.09E-07	20
14	209	7000	70.0	70.0	0.0	1.00	1.07E-06	68
15	225	7500	75.0	74.4	-0.6	0.88	1.58E-06	100
16	241	8000	80.0	77.7	-2.3	0.44	2.06E-06	100
17	257	8800	101.3	101.0	-0.3	0.93	2.54E-06	100
18	273	9600	122.7	122.7	0.0	1.00	2.35E-06	93
19	289	10400	144.0	144.0	0.0	1.00	2.25E-06	89
20	305	11200	165.3	165.3	0.0	1.00	2.20E-06	87
21	321	12000	186.7	186.7	0.0	1.00	2.17E-06	85
22	337	12800	208.0	208.0	0.0	1.00	2.15E-06	85
23	353	13600	229.3	229.3	0.0	1.00	2.17E-06	85
24	369	14400	250.7	250.7	0.0	1.00	2.24E-06	89
25	385	15200	272.0	272.0	0.0	1.00	2.48E-06	98
26	401	16000	293.3	290.0	-3.3	0.27	2.54E-06	100
27	417	16800	314.7	304.9	-9.8	0.20	2.54E-06	100
28	433	17600	336.0	316.8	-19.2	0.20	2.54E-06	100
29	449	18400	357.3	325.5	-31.8	0.19	2.54E-06	100
30	465	19200	378.7	331.0	-47.7	0.19	2.54E-06	100
31	481	20000	400.0	333.3	-66.8	0.19	1.27E-06	100
Outflow Total							-3.95E-05	-62.34
Inflow Total							3.95E-05	62.34

3.6 第3章のまとめ

地表の斜面においては涵養部と流出部をあらかじめ把握することは難しく，このために境界条件もある程度仮定して設定せざるを得ない。地下空洞壁面上においても蒸発量と自由浸出面の設定区分においても同様の課題がある。この課題に対し，境界面上における圧力水頭，流量を考慮した収束判定ロジックを考案し，あらかじめ水位固定と流量固定の区分設定が未確定な場合でも境界面上で地山特性を反映した連続的流量分布となる計算方法を新たに開発した。また，掘削に伴う解析モデルにおける要素や節点を除外し，境界条件対象箇所やその境界値を掘削過程の水圧変化や計算の安定性を考慮して設定可能な計算方法を考案し，その適用性，有効性を示した。

ここでの提案のポイントは，従来の自由浸出点の判定基準に流量を加味し，圧力固定，流量固定を使い分けることで自然な境界流出を表現できる。

類似した一例を下図に示す。これは重力式ダムの上流断面における基礎岩盤浸透流解析の境界条件などを示したものである。ドレーンは基礎岩盤から H_D ほど上方にあり自由に流出可能となっている。このような条件で解析を行う場合，ドレーン部の節点の圧力水頭が H_D を超えた時点で流出を許す条件，言い換えると自由浸出点の判定基準の大気圧（圧力水頭 0m）の基準を H_D にシフトすることでドレーンの位置を考慮した解析が可能となる。

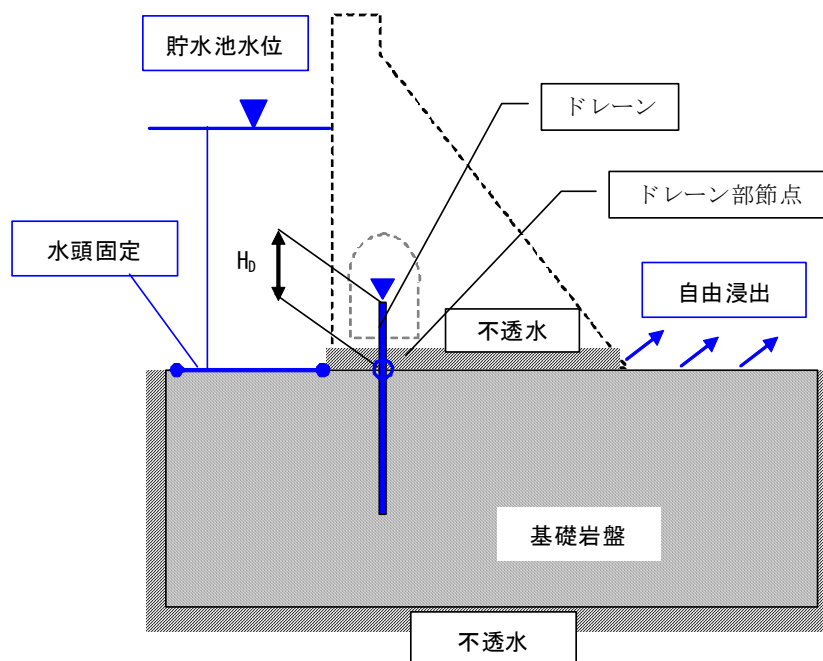


図 3-26 重力式ダム基礎岩盤の浸透流解析時の境界条件設定

4. 岩盤の不飽和浸透パラメータ測定方法の研究

4.1 研究の構成

本章における研究の構成を図 4-1 に示す。岩盤の不飽和浸透パラメータの測定事例は少なく、また、測定方法に定まった方法がある状態ではない。一方、土壌や砂など未固結土壌・地盤の不飽和浸透パラメータは測定事例も多く、測定方法も定められた方法が存在する。このため、既存の知見の多い未固結土に対しての測定方法や解析の適用性を確認し、その知見を岩石の不飽和浸透パラメータ評価に展開した。

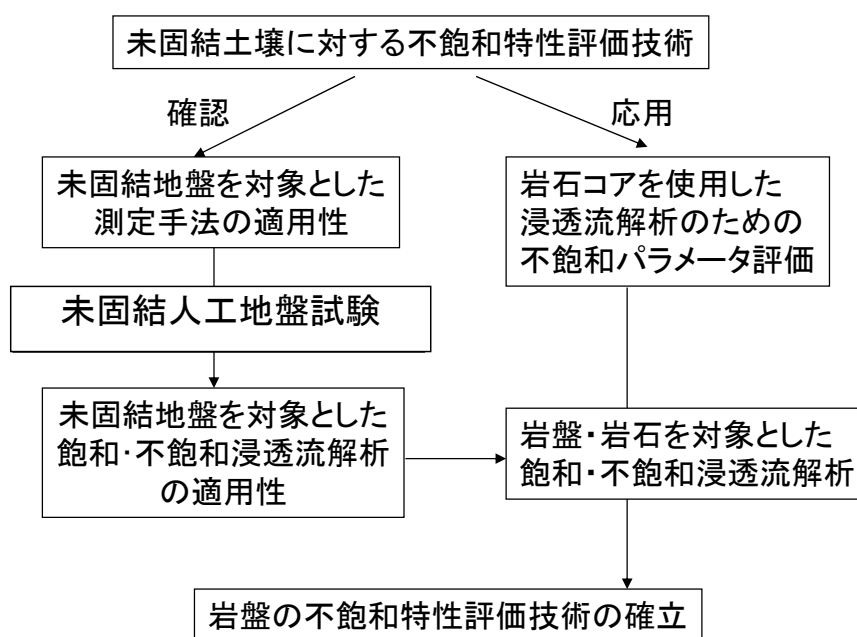


図 4-1 本章における研究の構成

4.2 人工地盤試験における不飽和特性の評価

試験・計測は、人工地盤盛り立て後4ヶ月にわたり実施し、ADRおよびテンシオメータは連続モニタリング、TDRおよび孔間レーダは任意時刻において計測を実施した。試験の途中、地盤内の飽和状態を変化させる目的で、地盤上方からの注水に伴う飽和状態（体積含水率）の時間的・空間的变化を計測した。

4.2.1 試験の目的背景

岩盤内に空洞を掘削した際、その周辺岩盤には不飽和領域が発生する可能性が考えられる。この不飽和領域の広がりや量を定量的に評価することは、石油・天然ガスの地下備蓄の安全性評価、空気侵入に伴う岩盤中の地下水の地球化学的特性の変化を把握する上で必要である。

著者らは、岩盤空洞周辺の不飽和領域の広がりを持積含水率分布から把握する目的で、電磁波伝搬特性を利用した計測機器の適用性を比較検討した。この検討では、岩盤と同様に電磁波伝搬特性が含水率に依存し、飽和・不飽和状態の制御が容易で均質性が高く、物性値が把握しやすい人工の砂地盤を用いることとした。

電磁波伝搬特性を利用した計測方法は種々提案され、測定機器も市販されている。ここでは電磁波伝搬特性を利用した計測機器として ADR(Amplitude Domain Reflectometry), TDR(Time Domain Reflectometry), 孔間レーダを検討対象とし、従来型の土壌水分計測器としてテンシオメータを用いて各計測機器の比較検討を実施した。また川砂の飽和透水係数、水分特性曲線等のパラメータを室内試験で求め、3次元浸透流解析を実施して、解析結果と計測結果の比較を実施した。

4.2.2 試験概要

(1) 試験レイアウト

試験は図 4-3 に示す砂で盛り立てた人工地盤を対象に実施した。砂は遮水製のシート（ブルーシート）の上に盛り立て、雨による上方からの水分侵入に対しては、適時、シートで覆い試験を実施し、できるだけ他からの水分の浸入が無い条件とした。人工地盤構築状況を図 4-2 に示す。孔間レーダ計測のため、岩盤空洞周辺でのボーリング孔を模擬して人工地盤内に 3 本の塩ビ管（φ 60mm×L6m）を平行に配置した。

ADR, テンシオメータは奥行き方向に 4 点, TDR は奥行き方向に 6 点, 孔間レーダは塩ビ管内を移動させ平行測線で奥行き方向に 0.25m ピッチで計測した。計測機器の配置は図 4-2 (a), (b), (c) に示す。盛り立てた人工地盤での測定状況を図 4-4 に示す。

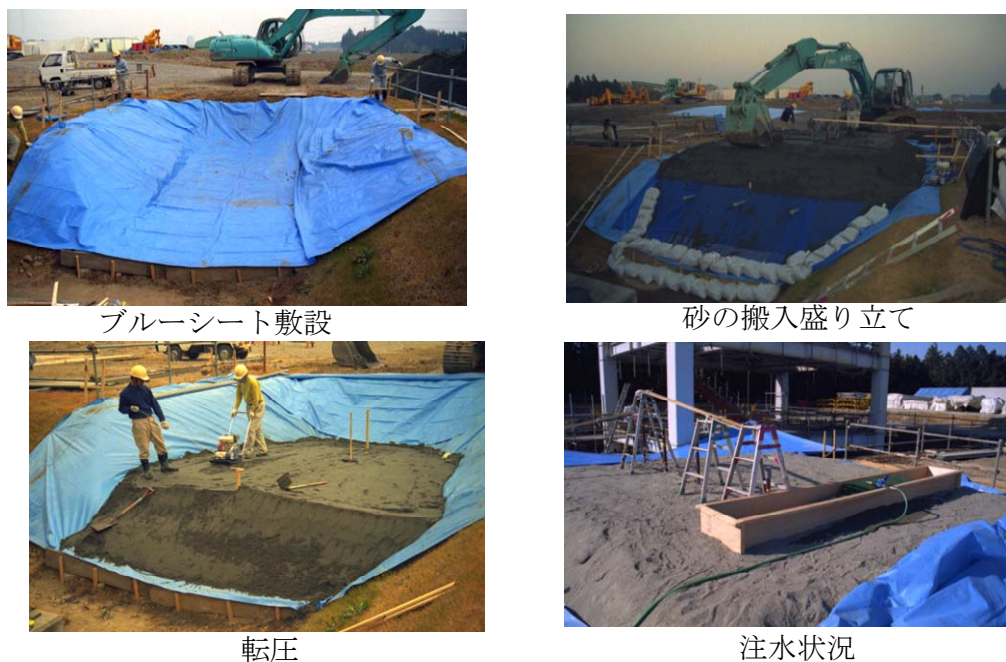
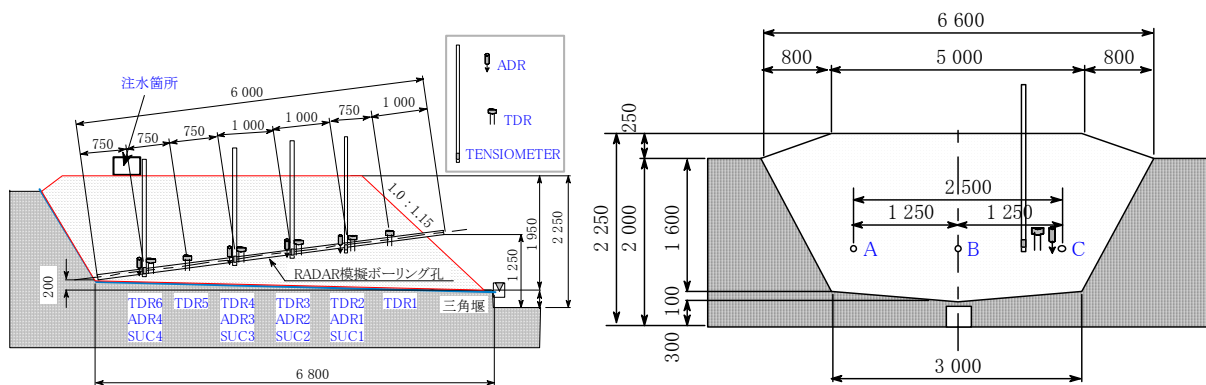
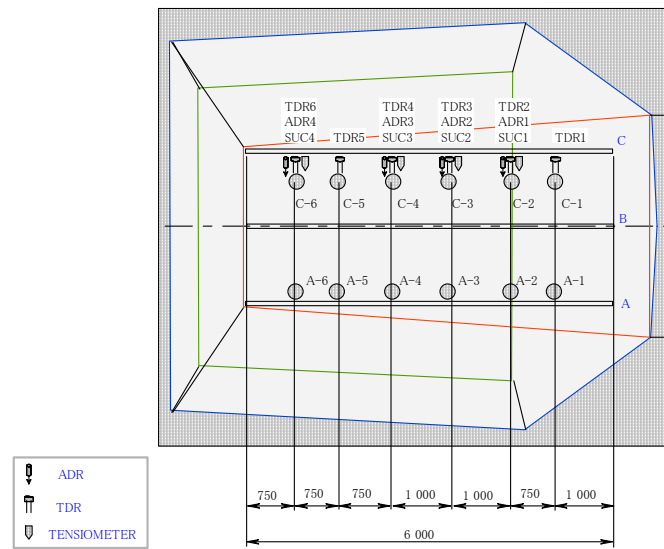


図 4-2 人工地盤構築状況



(a) 縦断面図 (b) 横断面図



(c) 平面図

図 4-3 人工地盤の形状，計器設置位置



図 4-4 人工地盤での測定状況

(2) 使用した砂の物性

使用した砂は市販の川砂で、その砂の基礎物性を把握するため、原位置で締め固めた試料の含水量、乾燥密度試験、飽和透水試験、pF 試験、粒度試験を実施した。表 4-1 に各試験から得られた川砂の基本物性、図 4-5 に不飽和特性を示す。

間隙率（＝飽和体積含水率 θ_s ）と乾燥密度は、原位置で採取した試料での計測結果である。飽和透水係数測定、pF 曲線測定は、原位置試料から計測された乾燥密度を参考に室内で詰めた試料を用いて試験した結果である。水分特性曲線は van Genuchten 式（VG 式）でカーブフィットした結果をパラメータ θ_r 、 α 、 n として示した。

表 4-1 川砂の基本物性

間隙率 θ_s (%) (飽和体積含水率)	41.6
最小体積含水率 θ_r (%)	7.2
飽和透水係数 k_s (m/s)	1.5×10^{-4}
乾燥密度 ρ_d	1.5
水分特性曲線パラメータ: α (cm^{-1})	0.056
水分特性曲線パラメータ: n	2.91
平均粒径(mm)	0.57
均等係数 U_c (D_{60}/D_{10})	6.5
盛り立て時の含水比 w (%)	11.8

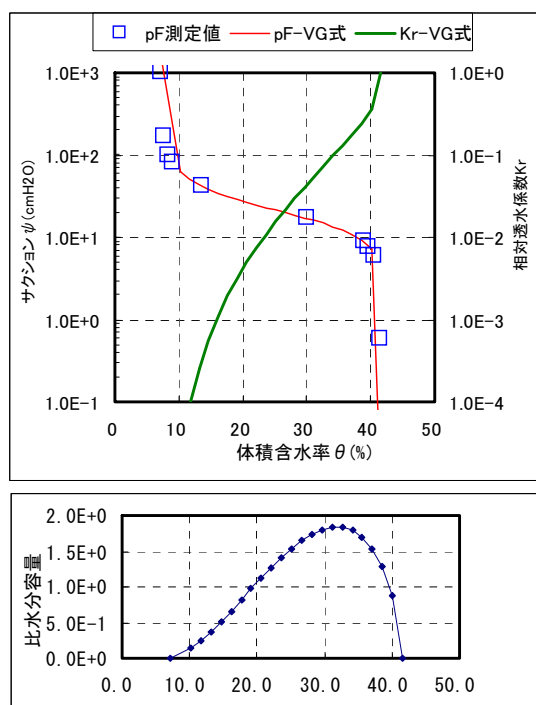


図 4-5 川砂の p F 試験結果と V G 式で表現した相対透水係数と比水分容量

(3) 使用した計測機器の諸元

使用した計測機器の諸元を表 4-2 に示す。

表 4-2 計測機器の諸元

ADR		THETA Probe : ML2	
メーカー		(ΔT デバイス社／英国製)	
測定範囲		0～100%vol	
寸法		φ40×172 mm (ピン長 60mm)	
重量		350g (ケーブル 5m 付き)	
安定時間		約 10 秒	
TDR			
プローブ・メーカー		ダイヤコンサルタント製	
測定装置		TDR ケーブルテスト	
メーカー		SONY-TEKTRONIX	
機種		1502B	
周波数		1.75GHz	
Cross-hole RADAR			
メーカー		川崎地質・ハザマ共同製作	
周波数		パルス式 150MHz	
プローブ形状		φ45mm×L 900mm	
Tensiometer			
メーカー		サンケイ理化 (株)	
入力圧力		0～±1000H ₂ Ocm	



図 4-6 使用したセンサーと設置状況

4.2.3 測定値からの体積含水率の推定方法

(1) ADR (Amplitude Domain Reflectometry)

ADR は、高周波の電気パルスが地盤中のプローブを通過して往復する際の送電線のインピーダンスを反映した電圧測定から体積含水率を推定する。比誘電率 ε_r と ADR の出力電圧 V の関係は次式(4-1)で示される。

$$\sqrt{\varepsilon_r} = 1 + 6.19V - 9.72V^2 + 24.35V^3 - 30.84V^4 + 14.73V^5 \quad (4-1)$$

土壌地盤では、比誘電率 ε_r と体積含水率 θ は Topp 2) の経験式により次式(4-2)で示される。

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_r^3 - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_r^2 - 0.029 \cdot \varepsilon_r - 0.053 \quad (4-2)$$

従って ADR の出力電圧 V から(4-1) (4-2)式を介して体積含水率 θ を推定する。

(2) TDR

TDR は地盤中のプローブに沿って伝搬する反射波の伝搬時間から電磁波の伝搬速度 v を算定し、次式(4-3)の関係から比誘電率 ε_r を算定し、さらに上記(4-1)式又はキャリブレーションによる比誘電率 ε_r と体積含水率 θ の関係から体積含水率を推定する。

$$V = c_0 / \sqrt{\varepsilon_r} \quad (4-3)$$

ここで c_0 : 真空中の電磁波伝搬速度 (2.997×10⁸m/sec)

今回は別途キャリブレーションを実施し次の 3 次式(4-4)により体積含水率 θ を推定した。

$$\theta = 5.0 \times 10^{-6} \varepsilon_r^3 - 7.0 \times 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 0.0343 \cdot \varepsilon_r - 0.0864 \quad (4-4)$$

(3) 孔間レーダ

孔間レーダは電磁波の発信から受信までの伝搬時間と 2 点間の距離から電磁波の伝搬時間をもとめ上記(4-3)式より比誘電率を推定しさらに Topp の経験式(4-2)により体積含水率を推定した。

4.2.4 計測結果

(1) 計測結果の概要

図 4-7 に計測期間を通じたモニタリング結果を示す。計測データは、上から時間降雨量、外気温、注水量、累積注水量、テンシオメータによる圧力水頭、ADR による体積含水率である。体積含水率のグラフ中に TDR、孔間レーダ計測結果も示す。

図 4-7 の注水量で示されるように、試験は人工地盤造成後、砂中の水分分布が落ち着くまで 70 日間放置した後、約 6L 毎分程度の注水を 9 日間実施した。この結果、テンシオメータの計測結果のうち SUC1,SUC2,SUC3 については温度変化に起因すると思われる圧力水頭の変動がみられる。砂中の体積含水率は注水箇所に近い人工地盤奥側(孔口からの深度の深い側)から上昇している。

図 4-8 に各時間断面の各種計測による体積含水率分布を示す。図中、計測地点を孔口からの深度(m)としているが、これは図 4-3 (a)に示す RADAR 模擬ボーリング孔の口元(図中で右端)からの模擬ボーリング孔に沿った距離を示している。注水前には奥行き方向にほぼ一様であった体積

含水率は、注水に伴い奥側から上昇している。注水停止に伴い人工地盤手前側から体積含水率が減少している。

図 4-9 にテンシオメータ (SUC2,SUC3,SUC4) で計測された圧力水頭 (圧力水頭が負の値の場合はサクション) と図 4-5 に示した水分特性曲線 ($\theta - \phi$) から推定 (中島誠ほか 1997, Topp,G.C.et.al 1989) された体積含水率の非定常変化を示す。SUC1 についてはサクション値のばらつきが大きかったため省略した。SUC2,SUC3 についても図 4-9 に示すようにサクション値のばらつきによる体積含水率の変動が見られる。ここでは同一地点での ADR, TDR, 孔間レーダ (RADAR) での体積含水率の推定値も示している。TDR, 孔間レーダの計測は連続的なものではないが、注水前、注水による飽和時等の体積含水率の変化傾向は調和的变化傾向を示している。しかしその絶対値は必ずしも一致していない。この原因については後の箇所で述べる。

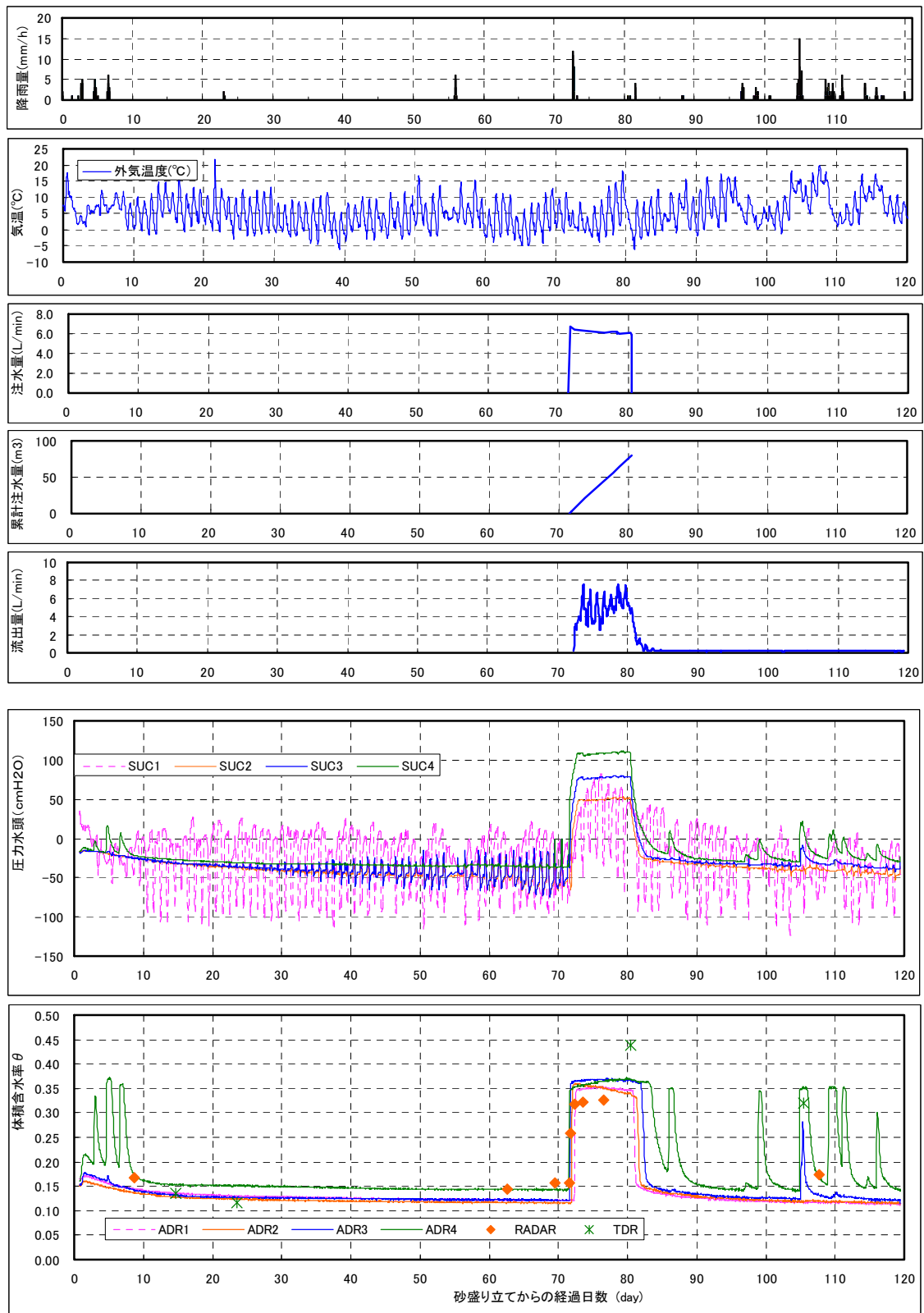


図 4-7 計測期間を通じて計測された項目

(体積含水率のグラフで示される RADAR,TDR は孔口から 3.75m ポイントの値を示す)

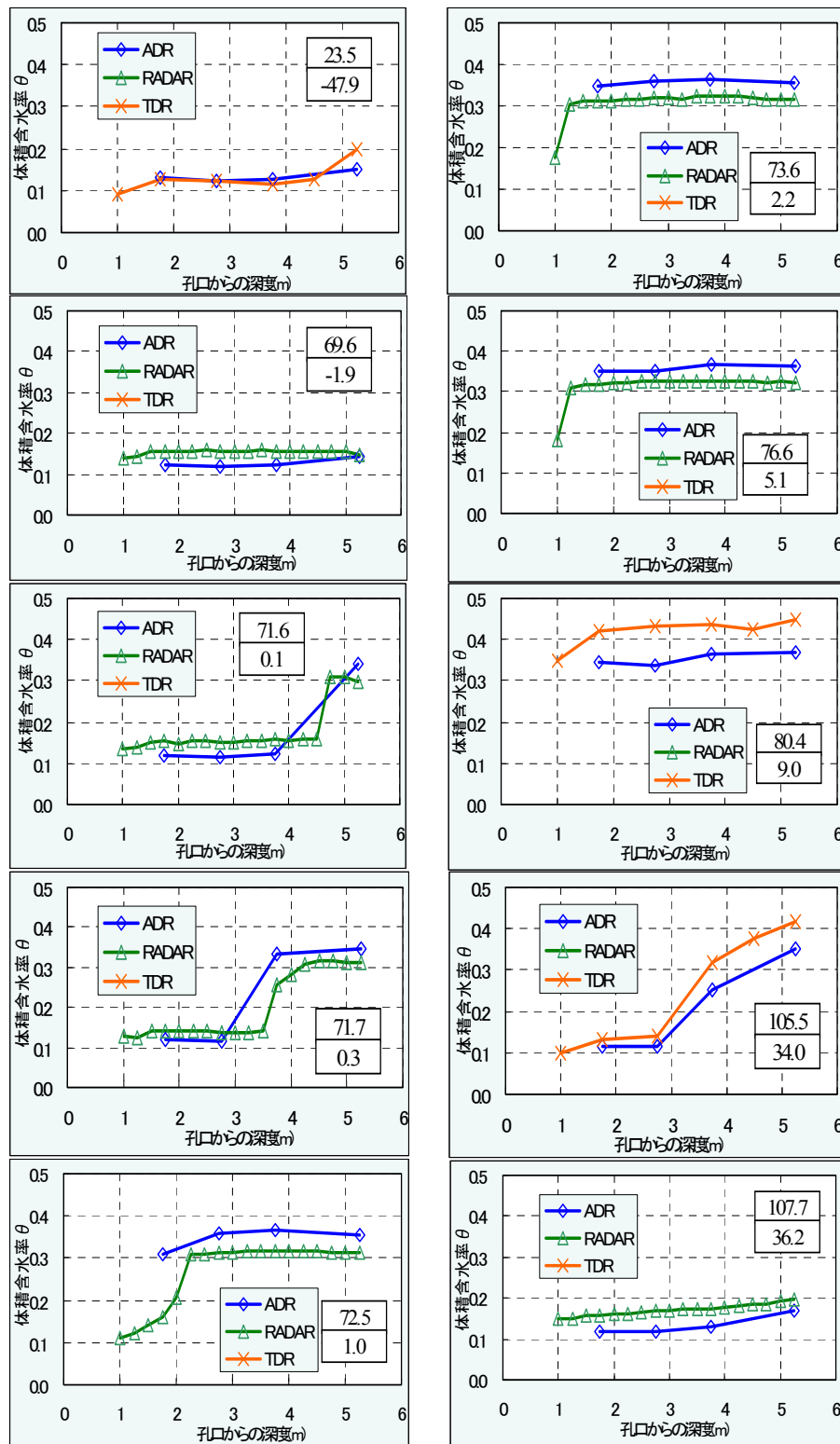


図 4-8 ADR, RADAR, TDR で計測された体積含水率分布の比較

(図中 2 段の枠内の上段は人工地盤造成からの経過日数,
下段は注水を開始した時点からの経過日数)

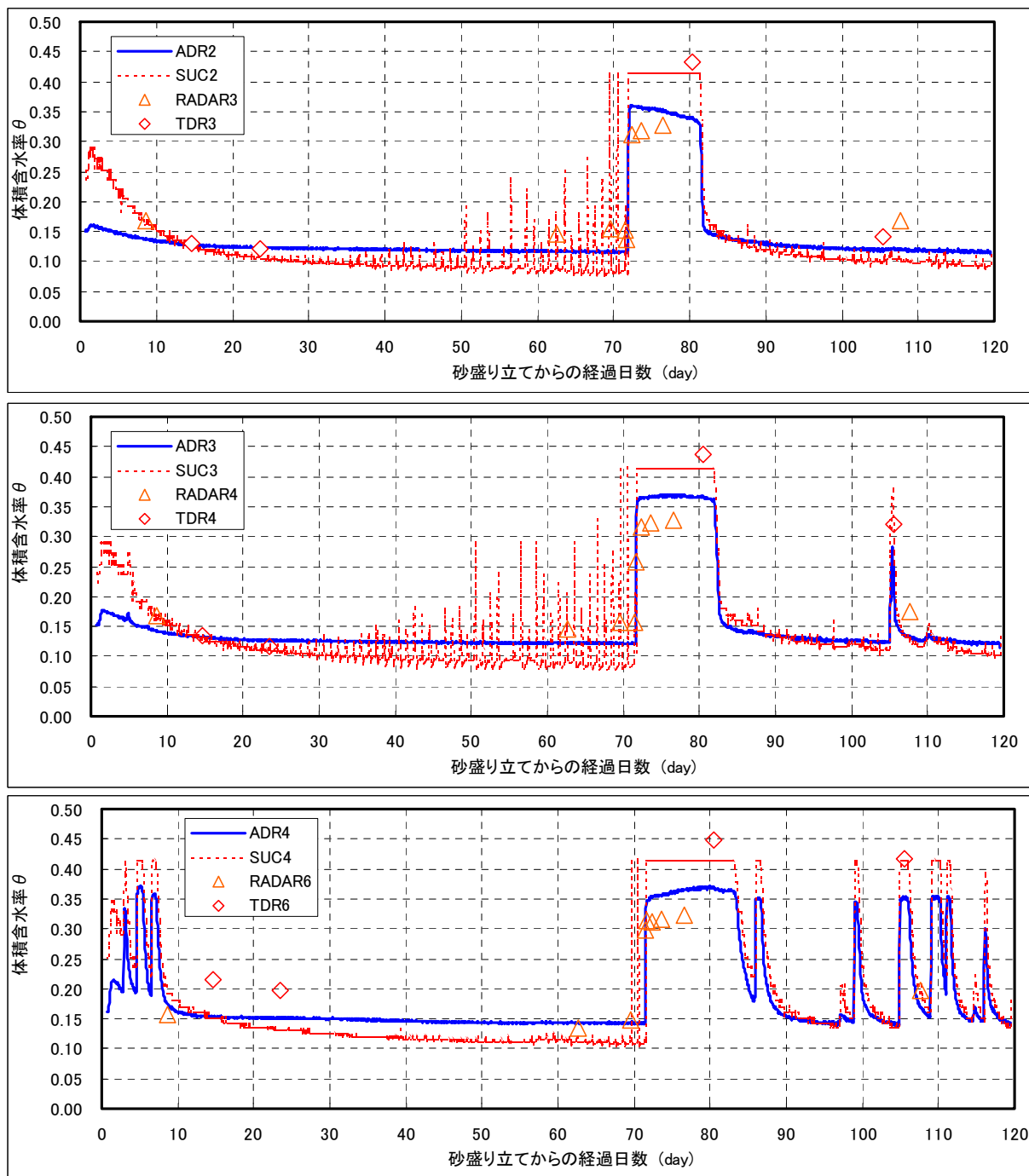


図 4-9 テンシオメータで計測されたサクションから推定した体積含水率と

他の計器により推定された体積含水率

(2) 計測機器による体積含水率推定結果の比較

はじめに電磁波伝搬特性を用いた計器による計測結果の比較を行う。図 4-7 の注水後 0.1 日、0.3 日および 34.0 日を見ると、ADR、TDR、孔間レーダは、注水・排水に対して同じような体積含水率の変化挙動を示している。図 4-7 に示される注水後 5.1 日および 9.0 日の ADR での体積含水率の変化のないことから、水分が行き渡ったと考えられる。この時の体積含水率をみると、TDR、ADR、孔間レーダの順に高い体積含水率を示している。表 4-1 に示す飽和体積含水率は 41.6% であり、注水後 5.1 日、9.0 日ではほぼ飽和状態にあると考えられ、電磁波特性を用いた計測機器の中で TDR の計測結果が最も砂の飽和体積含水率に近い値を示している。

孔間レーダの示す体積含水率は注水前は他の 2 者よりも大きい値を示し、注水中は他の 2 者よりも小さい値を示す。注水終了後は他の 2 者よりも大きい値を示す。これは孔間レーダでの計測は孔間隔 1.25m 又は 2.5m の電磁波伝搬速度を計測して体積含水率を推定するため単に計測 2 点間を直線で結んだパス以外の影響を反映していることが考えられる。

テンシオメータから推定した体積含水率の非定常変化は ADR による非定常変化とよく一致している。注水終了後の 85 日から 120 日にかけての SUC3、SUC4 で見られるパルス的な体積含水率の上昇は降雨にともない人工地盤を覆っていた防水用のシートの隙間から降雨がを侵入したことを示していると考えられるが、これらに関しても ADR、TDR と非常によく一致した変化傾向を示し、テンシオメータが土壌水分計と呼ばれていることを裏付けるデータといえる。

注水に伴いほぼ飽和に達したとみられる 72 日から 81 日にかけて、テンシオメータによる体積含水率は図 4-5 の水分特性曲線 ($\theta-\psi$) に対応して 41.6% で頭打ちとなっている。これは、サクシオンからの体積含水率推定の際は水分特性曲線で飽和体積含水率が決定される圧力水頭が 0cm (正值) 以上では、飽和状態つまり体積含水率は飽和体積含水率 θ_s で一定値としたためである。

(3) 体積含水率の推定結果のまとめ

ADR、TDR、孔間レーダ (RADAR)、テンシオメータによる体積含水率の推定結果のまとめとして、飽和に近い状態での四者の比較から考えられることを示しておく。飽和に近い状態で体積含水率の推定結果を比較すると、TDR、テンシオメータ、ADR、孔間レーダ (RADAR) の順 (先の物ほど大きい) で体積含水率が大きく示される傾向にある。体積含水率の推定方法は先の章で示したが、TDR は今回使用した砂を用いたキャリブレーションカーブを用いて比誘電率から体積含水率を推定、テンシオメータは今回使用した砂の水分特性曲線 (サクシオンと体積含水率の関係を示す曲線) を用いてサクシオンから体積含水率を推定、ADR と孔間レーダは TOPP の式を用いて比誘電率から体積含水率を推定した。この推定式の違いが、結果の違いに現れたと考えられる。今回使用した砂と注水した水の比誘電率と体積含水率の関係式は、TOPP の経験式よりも同じ比誘電率に対してより大きな体積含水率を示すような傾向を有していたと考えられる。表現を変えると、同じ体積含水率でも比誘電率が小さい傾向を有していると考えられる。このため TOPP の式を用いた ADR と孔間レーダの推定結果は、TDR・テンシオメータよりも小さい体積含水率を推定したと考えられる。また孔間レーダは ADR よりも計測部が大きく、ADR より広い範囲の比誘電率の影響を受けているため、飽和度の低い箇所の比誘電率に引かれ体積含水率の推定値が小さくなったと考えられる。

4.2.5 浸透流解析

(1) 解析の概要

この試験のシミュレーションを実施するため 3 次元飽和－不飽和浸透流解析を実施した。

人工地盤は左右対称のため B 孔を含む鉛直断面を対称面として，その片側を解析対象とした。

図 4-10 に解析領域の概要を示す。図中には模擬ボーリング孔位置を示すが，解析モデルには直接反映させていない。解析の境界条件は，対称面および図 4-10 では隠れている側面と底面は不透水境界，上面と前面は自由浸出境界，上面の注水箇所は定流量境界とした。砂地盤は等方・均質を仮定し，表 4-1 に示す物性値を用いた。

非定常解析は，以下に示す 3 期間を対象に実施した。

第 1 期間：砂を盛り立ててから注水直前までの 70 日間初期条件は砂一様に各地点での体積含水率をサンプリング計測結果に準じ，体積含水率 0.16 となるサクション水頭 30cm を設定した。

第 2 期間：注水開始してから 35 時間初期条件は第 1 期間の 70 日目の結果を設定した。

第 3 期間：注水を停止してから 360 時間

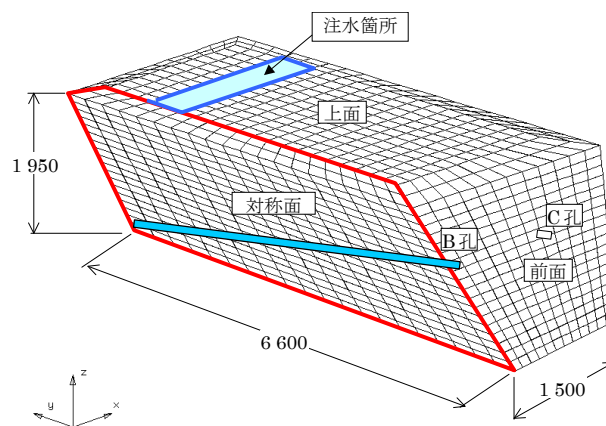


図 4-10 解析対象領域と要素分割

(2) 解析結果

図 4-11 に第 2 期間の解析結果，図 4-12 に第 3 期間の解析結果を示す。この図は対称面内における体積含水率のコンタとダルシー流速ベクトルを示している。

注水前は，体積含水率は底部の一部だけで大きく，上方では体積含水率が 15% にも満たない低い値でほぼ一様な分布をしている。注水により注水箇所の水分が増加し鉛直下方に体積含水率の大きい領域が広がっている。この鉛直柱状の体積含水率の高い部分を通じて水分が底部に供給され，次第に底部から体積含水率の大きい領域が上昇していく状況がこの解析結果から見て取れる。体積含水率の大きい領域の上昇に伴い前面の斜面の飽和域も浸出面も上昇し，斜面のより上方から浸出が生じている状況が注水より 24 時間，35 時間後の解析結果のベクトルの分布から理解される。

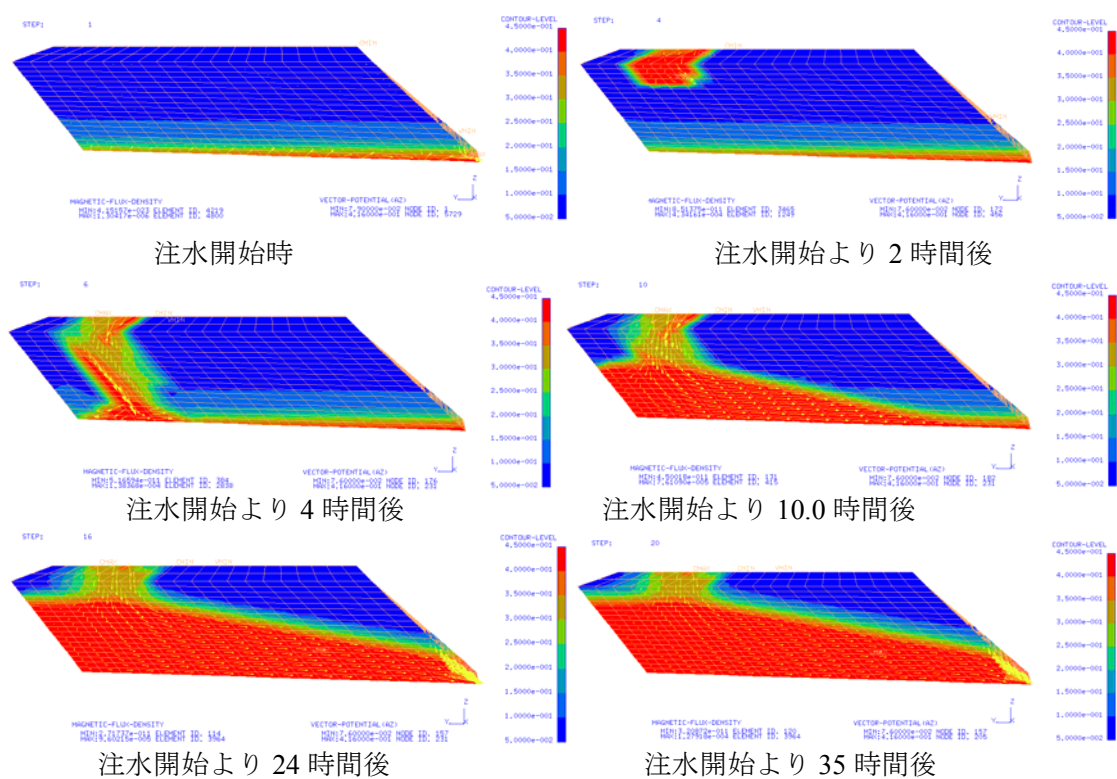


図 4-11 第 2 期間の体積含水率の分布の変化

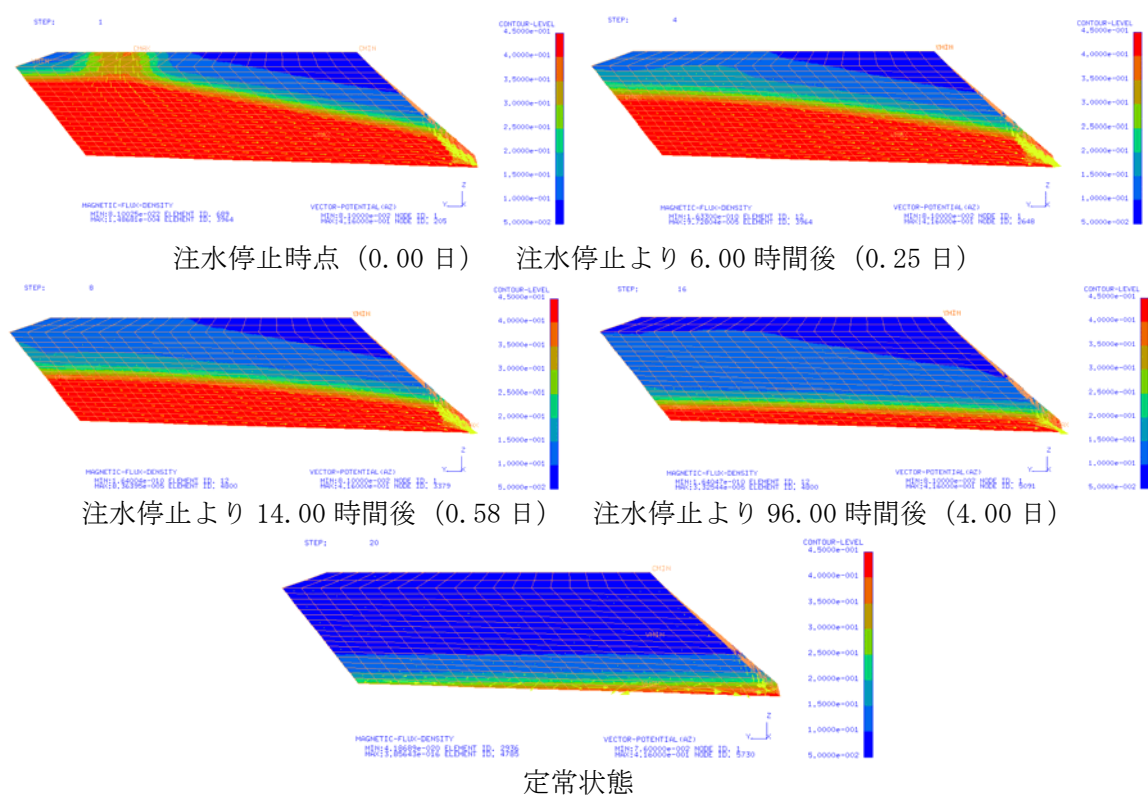


図 4-12 第 3 期間の体積含水率の分布

(3) 解析と実測値

図 4-13, 図 4-14 に上記解析と実際に計測されたテンシオメータ SUC3,4 による圧力水頭（負の値の場合、その絶対値がサクションに該当）と ADR3,4 による体積含水率の比較結果を示す。図 4-13 は注水開始後、図 4-14 は注水終了後を対象にしている。計測と解析はすべて定量的に一致していないものの、圧力水頭変化に対して体積含水率が急激に上昇する傾向や、注水終了後圧力水頭は速やかに低減するのに対し体積含水率は遅れて低減する傾向等、非定常の変化特性、カーブの傾向等はよく再現されている。

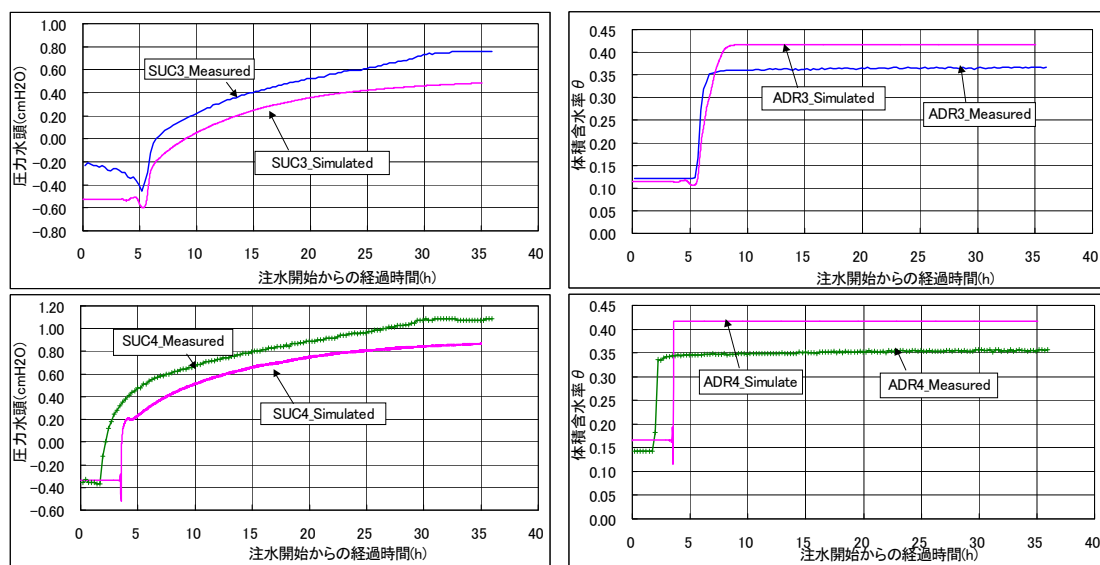


図 4-13 テンシオメータ SUC3,4 による圧力水頭の比較

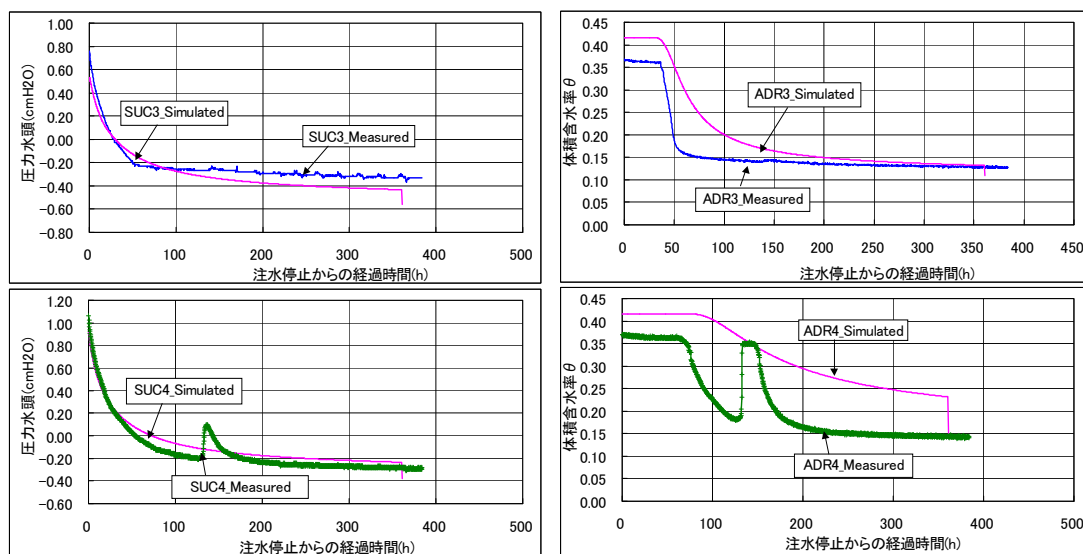


図 4-14 ADR3,4 による体積含水率の比較

4.2.6 本節のまとめ

各計器による計測結果は散水開始・停止に伴い調和的体積含水率の増加・減少を示した。また体積含水率の定量的比較では同一箇所の計測結果において計器により多少の違いが認められ、計測機器や計測原理の違いが影響したものと考えられた。テンシオメータによる原位置でのサクシオン計測結果を室内試験で得られた水分特性曲線等のパラメータから体積含水率に変換しADR,TDR,孔間レーダーとの比較を実施した。非定常の変化特性は、テンシオメータによる計測結果とADR,TDRとは非常に良い一致を示し両者の有効性を確認することができた。定量的にみて各計測、シミュレーションは厳密に一致するには至らないものの、各種計測機器およびシミュレーションは地盤内の体積含水率を計測・評価するための有効なツールとして利用しうることを確認した。

4.3 岩盤の不飽和浸透パラメータ測定方法

4.3.1 はじめに

放射性廃棄物の地層処分や液化石油ガスの地下貯蔵における地下空洞は、地下空洞を確保するだけでなく、空洞内に埋設した物質の漏えい抑止・遅延性能や石油ガスで充填後の空洞周辺岩盤の遮水性能や気密性能が求められる。これら性能には、空洞掘削の工事期間や空洞開放時における地下空洞周辺岩盤内の不飽和領域の把握や空洞壁面の水分管理や制御が求められる。放射性廃棄物の地層処分における不飽和領域の発生は、地下深部の岩盤に空気が侵入することによる酸化還元フロントの形成・移動が物質移行特性を変化させ地層処分システムの安定性能に影響を与える可能性が示唆（吉田英一ほか2003）されている。また、周辺岩盤が粘土分を含む岩盤の場合には飽和・不飽和の繰り返しによるスレーキング等による岩盤の劣化（土木学会1987，中田英二ほか2006）やそれに伴う新たな物質移行経路の発生が考えられる。液化石油ガスの地下貯蔵における水封式地下岩盤貯槽においては不飽和領域の発生による水みちの形成とガスの漏洩による水封システム機能の低下が想定される（大竹健司1998）。地下空洞周辺岩盤内不飽和領域の把握や制御には掘削に伴う不飽和領域の発生可能性やその広がりを事前に予測することが望まれるが、上記観点で不飽和領域を意識した岩盤物性の評価や解析事例は少ない。そこで本節では、空洞掘削直後からの空洞への地下水流出と、その結果生じる空洞周辺の不飽和領域の発生可能性やその広がりを予測するための、岩盤の不飽和特性の評価方法と空洞周辺の浸透流解析方法を提案する。

4.3.2 岩石の不飽和パラメータ

岩盤を対象とした不飽和パラメータ検討の基礎的知見を得るため、岩盤内の亀裂は検討から除外し、亀裂のない岩石を対象に検討を進める。はじめに、岩石に関して測定された既往の事例を整理し、次に均質な砂岩試料を対象に排水過程における不飽和パラメータに関して室内試験による検討結果を示す。ここで、土壌等に対してよく適用されるvan Genuchten式(van Genuchten 1980,以降VG式、式に関しては次節で示す)の岩石の不飽和パラメータとしての適用性を一つの着眼点としたため、不飽和パラメータの多くをVG式で表現した。岩盤内の亀裂に関してはその形状、形態が多岐にわたるため、今後の課題、不均質性の検討として位置づける。

(1) 岩石の不飽和パラメータ測定の実状

岩石の不飽和パラメータ測定の実状として、文献に示された測定事例を表4-3に示す。ここでは、土壌の不飽和パラメータを整理分類した事例（西垣誠ほか1993, Carsel, R, et.al 1988）に倣い、岩石の不飽和特性をVG式（下記の式(2)～(5)）のパラメータ α , n (m) で整理した。 m と n は式(5)の関係にあり、不飽和特性は実質、二つのパラメータ α , n で表現され、水分特性曲線が与えられると比透水係数も決定される。この、比透水係数の水分特性曲線への従属性がVG式の特徴で、便利に利用される一因であるが、著者らはこの従属性の妥当性確認を一つの着目点とした。そこで、この表ではそれぞれ独立に評価することとし、水分特性曲線に対しては α , n_1 , m_1 , 比透水係数には n_2 , m_2 として示した。表中、 n_2 , m_2 に対して“ $=n_1$ ”, “ $=m_1$ ”と示しているのは、水分特性曲線と比透水係数で n (m) が共通 ($n_1=n_2$, $m_1=m_2$) として測定された事例に該当する。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \quad (4-5)$$

$$Se = \left\{ 1 + |\alpha \psi|^{n_1} \right\}^{-m_1} \quad (4-6)$$

$$\psi = \frac{1}{\alpha} \left(1 - Se^{-1/m_1} \right)^{1/n_1} \quad (4-6')$$

$$k_r = Se^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(1 - Se^{1/m_2} \right)^{m_2} \right\}^2 \quad (4-7)$$

$$m_i = 1 - \frac{1}{n_i}, \quad (0 < m_i < 1, n_i > 1, i = 1, 2) \quad (4-8)$$

ここで、 Se : 有効飽和度[-], ψ : サクシヨン（水頭）[m], θ_{sat} : 飽和体積含水率[-], θ_r : 最小体積含水率[-]

表 4-3で示す対象岩石の最小体積含水率 θ_r はいずれも0である。 $\theta_r=0$ の場合、有効飽和度と飽和度は等しく、以下で扱う θ_r はすべて0であるため有効飽和度も飽和度という記載で統一した。泥岩 1 は、水分特性曲線は遠心力法、比透水係数は瞬時水分計測法により測定され、水分特性曲線、比透水係数の実験式が提示されている。しかし、サクシヨン測定の限界から適用範囲が飽和度 80%までと記されて（西垣誠ほか 1982）いる。

泥岩 2～泥岩 7（堤和大ほか 1994, Pasquiou, A.et.al 1997.）、安山岩 1（渡辺邦夫ほか 1994）、花崗岩 1, 2（堤和大ほか 1994）は不飽和状態の岩石コアの透水量を蒸発量測定と岩石コア内部の飽和度分布測定を実施し、水分特性曲線が与えられると比透水係数も得られるという VG 式の利用し、逆解析的手法により VG 式のパラメータを同定することで水分特性曲線と比透水係数を測定する方法である。

粘土質岩 1（Pasquiou, A.et.al 1997）と花崗岩 3（Frieg, B. and Vomvoris, S. 1994）は飽和度に応じたサクシヨンをサイクロメータにより測定した結果が示されている。比透水係数は、粘土質岩 1 では測定を試みた報告が示されているが使用した試料の問題点が示され、花崗岩 3 では参考文献に記載がなく、粘土質岩 1 と花崗岩 3 については水分特性曲線のパラメータだけを示した。

砂岩 1（雨宮清ほか 1998 および佐藤稔紀ほか 1998）は水分特性曲線，比透水係数をそれぞれ測定したもので，次項にてその測定法等を示す。

泥岩 1（飽和度 0.8 以下は実験式からの外挿），粘土質岩 1，花崗岩 3 に関しては提示された測定結果から著者にて VG 式のパラメータを同定した結果を示し，泥岩 1，花崗岩 3 に対するフィッティング結果を図 4-15～図 4-17 に示す。

その他の測定事例としては，粘土質岩や凝灰岩を対象に，岩石の乾燥湿潤の伴う変形特性から間隙中のサクションを算定し，水分特性曲線を推定する試み（Soe, A el.al 2009）の報告もなされている。

泥岩 2～泥岩 7 などの，水分特性曲線と比透水係数でパラメータが共通という VG 式の特徴を活用した方法は比較的簡便な測定・推定方法であるがこれら事例では実際に水分特性曲線を測定しておらず，この VG 式適用性の確認が必要と考えられる。泥岩 1 については独立に VG 式のパラメータ n_1 と n_2 が得られ，両者の値は一致しないが近い値を示し，泥岩 1 には水分特性と比透水係数が共通のパラメータで表現可能性を示唆した結果となっている。

水分特性曲線に関しては，既往の土壤に適用された測定方法では保水性の高い岩石に関してはサクション測定の限界がある。一方，サイクロメータは高いサクション値を測定できるとしているが，間隙の相対湿度を測定し化学ポテンシャルに換算する方法で，飽和度が高く，間隙中の水が毛細管力で保持されている状態には適さないと考えられる。

以上のように岩石の測定された不飽和パラメータ測定事例を示したが，岩石内のサクション計測，VG 式適用確認の必要性などの課題が存在する。

表 4-3 既存の岩石の不飽和浸透特性

パラメータ 岩種 \	間隙率 %	飽和透水係数	水分特性曲線			比透水係数		参考 文献
		k_{sat}	α	n_1	m_1	n_2	m_2	
		m/s	m ⁻¹	—	—	—	—	
泥岩1	58	1.7E-09	0.300	1.08	0.074	1.15	0.130	西垣1982
泥岩2	30	1.0E-09	0.300	1.67	0.400	= n_1	= m_1	堤1994
泥岩3	—	—	0.200	1.67	0.400	= n_1	= m_1	
泥岩4	20	1.6E-12	0.008	2.44	0.590	= n_1	= m_1	
泥岩5	—	1.1E-12	0.004	1.75	0.430	= n_1	= m_1	
泥岩6	36.5	1.0E-09	0.800	3.33	0.700	= n_1	= m_1	
泥岩7	—	—	0.800	2.00	0.500	= n_1	= m_1	
粘土質岩1	22.5	5.0E-14	0.00035	1.7	0.412	—	—	Pasquiou 1997
粘土質岩2	15-20	2.0E-13	0.00018	3.50	0.714	—	—	Soe 2009
砂岩1	15	1.0E-10	0.010	1.24	0.192	3.00	0.667	雨宮1998, 佐藤1998
凝灰岩	45-50	9.9E-08	0.018	14.0	0.929	—	—	Soe 2009
安山岩1	10.4	1.0E-11	0.060	3.57	0.720	= n_1	= m_1	渡辺1994
花崗岩1	0.82	1.25E-12	0.010	2.26	0.558	= n_1	= m_1	堤1994
花崗岩2	0.67	—	0.014	2.09	0.522	= n_1	= m_1	
花崗岩3	1.006	1.0E-13	0.035	1.55	0.355	—	—	Frieg 1994

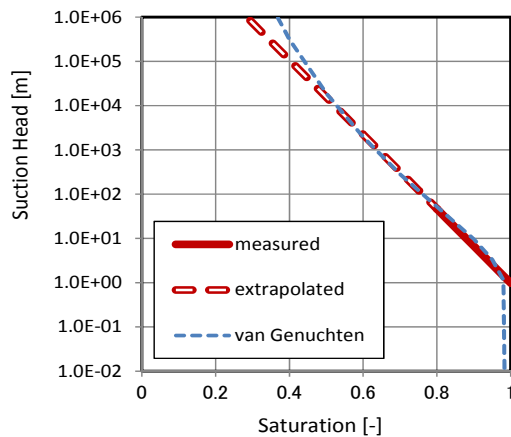


図 4-15 泥岩 1 の水分特性曲線

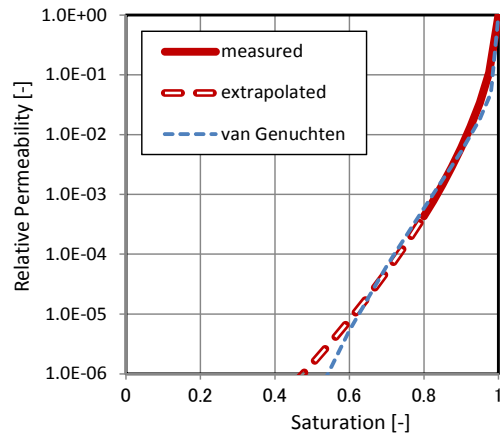


図 4-16 泥岩 1 の比透水係数

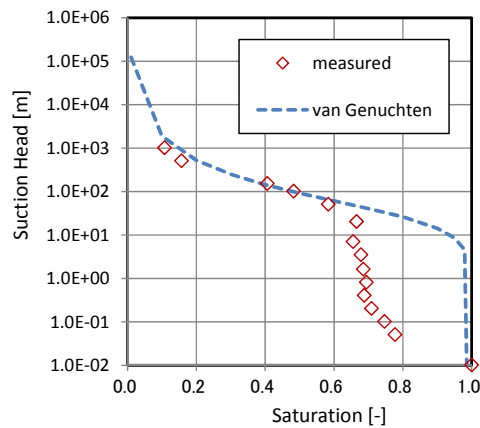


図 4-17 花崗岩 3 の水分特性曲線

(2) 岩石の水分特性曲線の測定

本検討では、岩石の不飽和パラメータとして、始めに水分特性曲線を測定し、続いて、測定された水分特性曲線を利用し、別途実施する不飽和状態を含む試験から比透水係数を推定することとした。岩石試料は粒状体として土壌の延長上にあると考えられ、均質性の高い白浜砂岩²⁷⁾を用いた。水分特性曲線は従来土壌を対象に実施されている土柱法、加圧板法（図4-20）とより大きいサクシオンを対象とするサイクロメータ法（塩沢昌1991，中野政詩ほか1995）（図4-21）を用いて体積含水率とサクシオンの関係をプロットすることで測定した。土柱法，加圧板法ではφ50mm×H10mmの岩片3個，サイクロメータ法ではφ8mm×H3mmの岩片3個を用いた。サイクロメータ法でのサクシオンはWESCOR社製サンプルチャンバC-52-SFを用いて計測した。図4-18に水分特性曲線の上記3手法を用いて測定した結果を示す。図中□印で示すのが土柱法，加圧板法の測定結果，○印で示すのがサイクロメータ法による結果である。それぞれに3個の試料を用いて測定したが3個のデータはほぼ同じ値を示し，白浜砂岩の均質性とともに入測定法の再現性の高さを示している。また，図からわかるように3種類の測定で連続性のある曲線が想定される測定値となっている。

曲線はVG式でカーブフィットさせた結果である。

また、図4-19に示す水銀圧入により測定された白浜砂岩の間隙径分布から次式にて水の毛管圧を算定した結果も図4-18に示している。飽和度の高い部分では他の測定結果を近いサクションを示すが、飽和度が低い部分では両者の開きが大きくなっている。飽和度の高い状態では、水分は主に液相で存在し、間隙中では表面張力による毛管力の影響が大きく、飽和度の低い状態では水蒸気として存在する水分が多く、水分と岩石の間には毛管力以外の化学的な要因による吸引力により間隙中に水分が保持されていることを示唆していると考えられる。

$$P = \frac{2\sigma \cos \theta}{R} \quad (4-9)$$

ここで、 R ：細孔半径、 σ ：水の表面張力（72mN/m）、 θ ：水の接触角（8DEG）、 P ：サクション

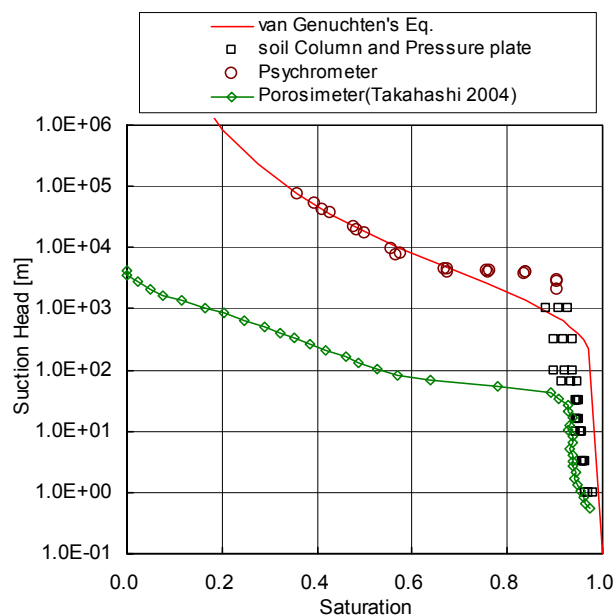


図 4-18 砂岩の水分特性曲線

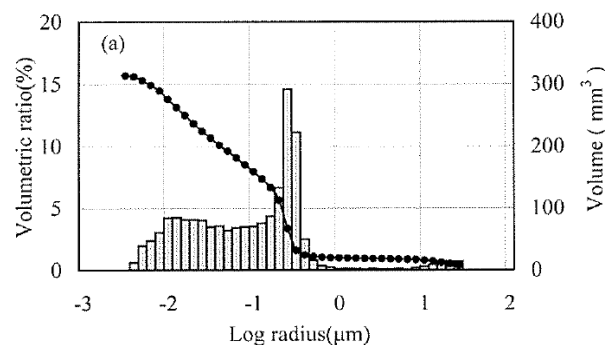


図 4-19 水銀圧入により測定された白浜砂岩の間隙径分布（高橋，林 2004）

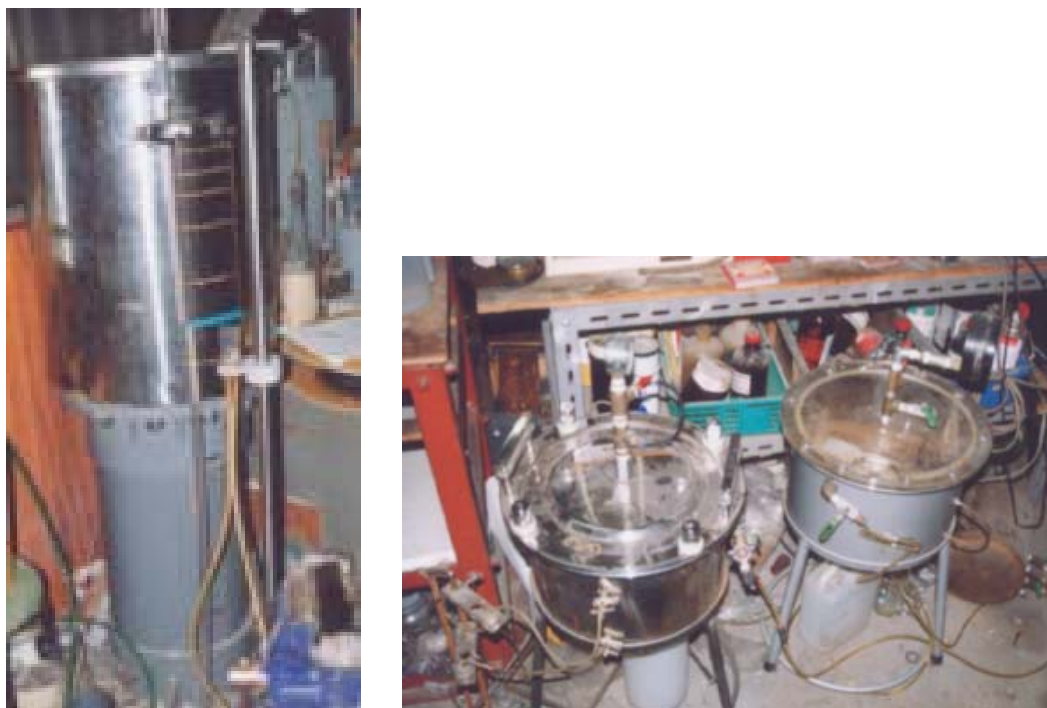
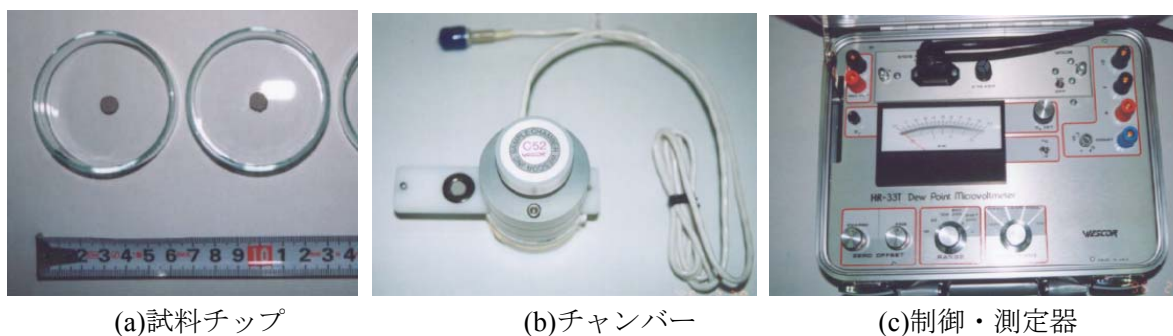


図 4-20 土柱法と加圧板法の試験装置



(a)試料チップ

(b)チャンバー

(c)制御・測定器

図 4-21 サイクロメータ法での測定概要

(3) 比透水係数の測定

比透水係数を推定する以下の 2 種類の試験を実施した。

a) 試験 1

飽和した白浜砂岩の角柱（図 4-22，75mm×75mm×300mm，飽和透水係数 1×10^{-10} m/s，間隙率 0.15）に，テンシオメータ（T-1～T-3），サイクロメータ（Psy-1～Psy-6）を設置し，一面を大気解放（自由蒸発面），他の面をシールし 1 次元非定常流れにおけるサクション分布と蒸発量を測定する。テンシオメータは，ポーラスカップ内側に充填している水と外側の間隙水との連続性により間隙水に作用する毛管力をポーラスカップ内側の水圧測定による把握するもので，ここではφ6mm のポーラスカップに圧力トランスデューサのついた製品（サンケイ理化製 SK-5500）を用い

た。サイクロメータのセンサは WESCOR 社製 PST-55-30 を用いた。センサの設置方法を図 4-23 に示すように、ポーラスカップと岩石の隙間は飽和した珪砂を充填した。いずれも密閉性を確保するためエポキシ系接着剤でシールした。試料は一面を除きゴム系の樹脂でシールし、シールした五つの面を不透水とし、シールしていない一面から水分が蒸発するようにした。試料は電子天秤上に水平に設置（図 4-24）し、質量減少量から蒸発量を算定した。次に 1 次元のモデルとした非定常不飽和浸透流解析でサクション分布・変化を計算する。解析において水分特性曲線は前述の測定結果を VG 式でカーブフィッティング ($\alpha=0.01$, $n_1=1.237$) したものをを用いた。通常 VG 式では、水分特性曲線と比透水係数でパラメータ n は共通な値を用いるが、ここではそれぞれ独立（水分特性曲線： n_1 、比透水係数： n_2 ）に設定（櫛原昇 1999, 雨宮清ほか 1998 および佐藤稔紀ほか 1998）した。ここで比対透水係数は式(4-7)に示す VG 式を用い、テンシオメータ T-1, T-2, T-3 により測定されるサクションの非定常変化にマッチするパラメータ n_2 を求めた。

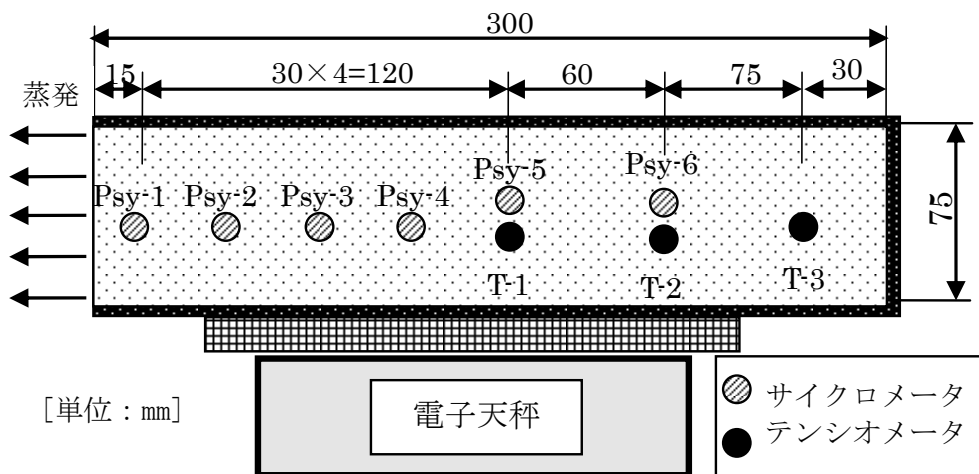


図 4-22 試験 1 の概要

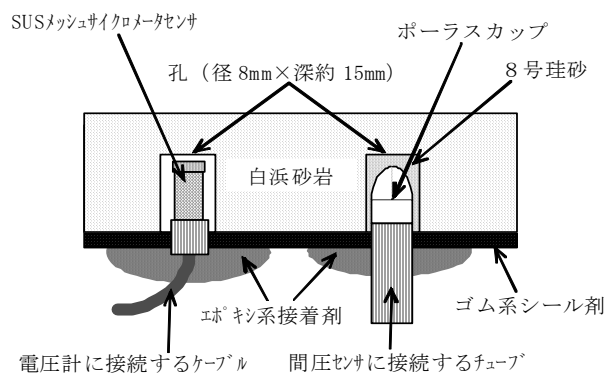
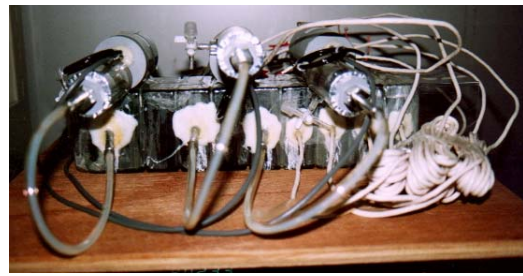


図 4-23 試験 1 の概要（センサーの設置状況）



(a)岩石柱（シール前）



(b)センサ設置状況



(c)試験全景

図 4-24 試験 1 の概要写真

b) 試験 2

堤ら（1994）の提案した試験法である。この試験は飽和した白浜砂岩コア（図 4-25，図 4-26， $\phi 50\text{mm} \times H107\text{mm}$ ）の側面をシールし，下端は定水位，上端は大気解放とし定常状態における大気解放面からの蒸発量（図 4-27）とコア内の体積含水率分布を測定する試験である。一方，コア内の水分移動を 1 次元の定常流れとし，蒸発量・定水位を境界条件として 1 次元の定常不飽和浸透流解析を実施し，測定された体積含水率の鉛直分布にフィットする水分特性曲線・比透水係数曲線を最適化手法の一つであるマルカート法（渡部力 1993）により同定する。堤らは水分特性曲線・比透水係数曲線を VG 式を適用し同時に同定したが，ここでは試験 1 と同じ水分特性曲線を用い，比透水係数曲線は水分特性曲線とは独立に VG 式の関数型のみを適用して最適化手法を用いて推定する。

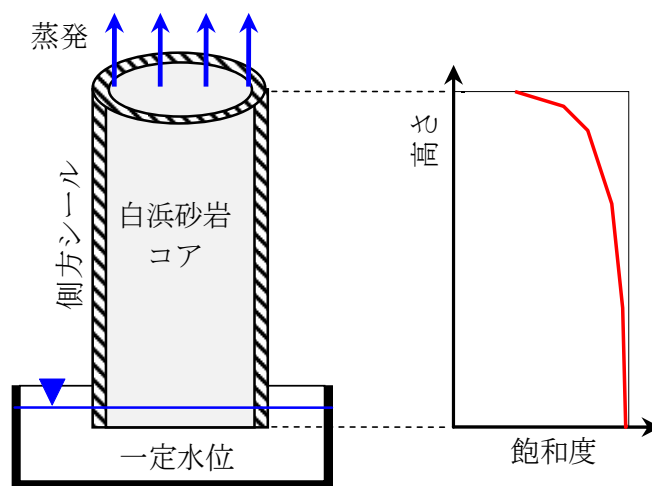


図 4-25 試験 2 の概要 ²¹⁾

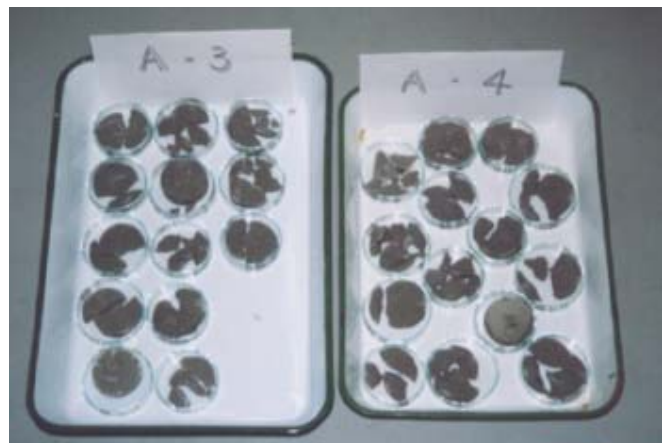


図 4-26 コアと含水比測定分割状況



図 4-27 蒸発量測定状況

c) 試験結果：試験 1

試験 1 の結果を図 4-28、図 4-29 に示す。

図 4-28 は、試料端部からの蒸発量を供試体の質量減少から算定した結果と解析に適用するために蒸発量変化を近似した曲線である。

図 4-29 は、供試体内に設置した 3 個のテンシオメータによるサクション測定結果と比透水係数の van Genuchten 式のパラメータ n_2 に関する感度解析的なフィッティング結果である。

比透水係数のパラメータ n_2 を 1.5～5.0 の範囲で変化させたパラメータスタディにより測定されたサクションの再現性を比較、この結果、最適なパラメータ $n_2=3.0$ を得た。測定結果と解析結果はサクションの非定常変化および試料内の分布ともに調和的で、現象を適切に表現できる比透水係数が得られたと考えられる。さらにこのサクションの非定常変化や分布の解析と測定の整合性から、試験 1 で実施している小型のテンシオメータを岩石内に岩石と細粒の珪砂で密着するように設置する方法で岩石内のサクション変化を定量的に測定できることが示されたと考えられる。

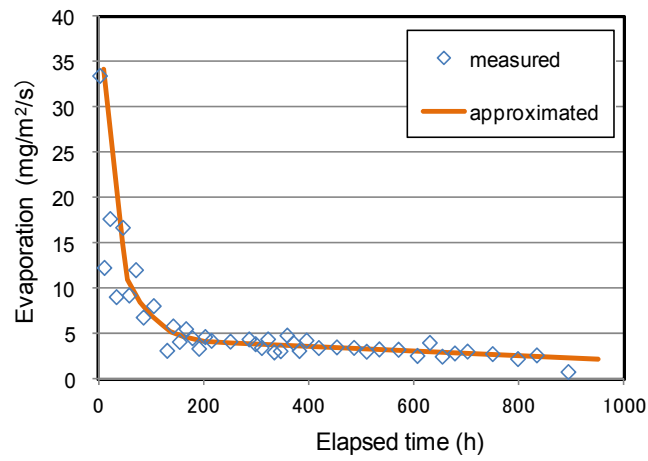


図 4-28 測定された蒸発量

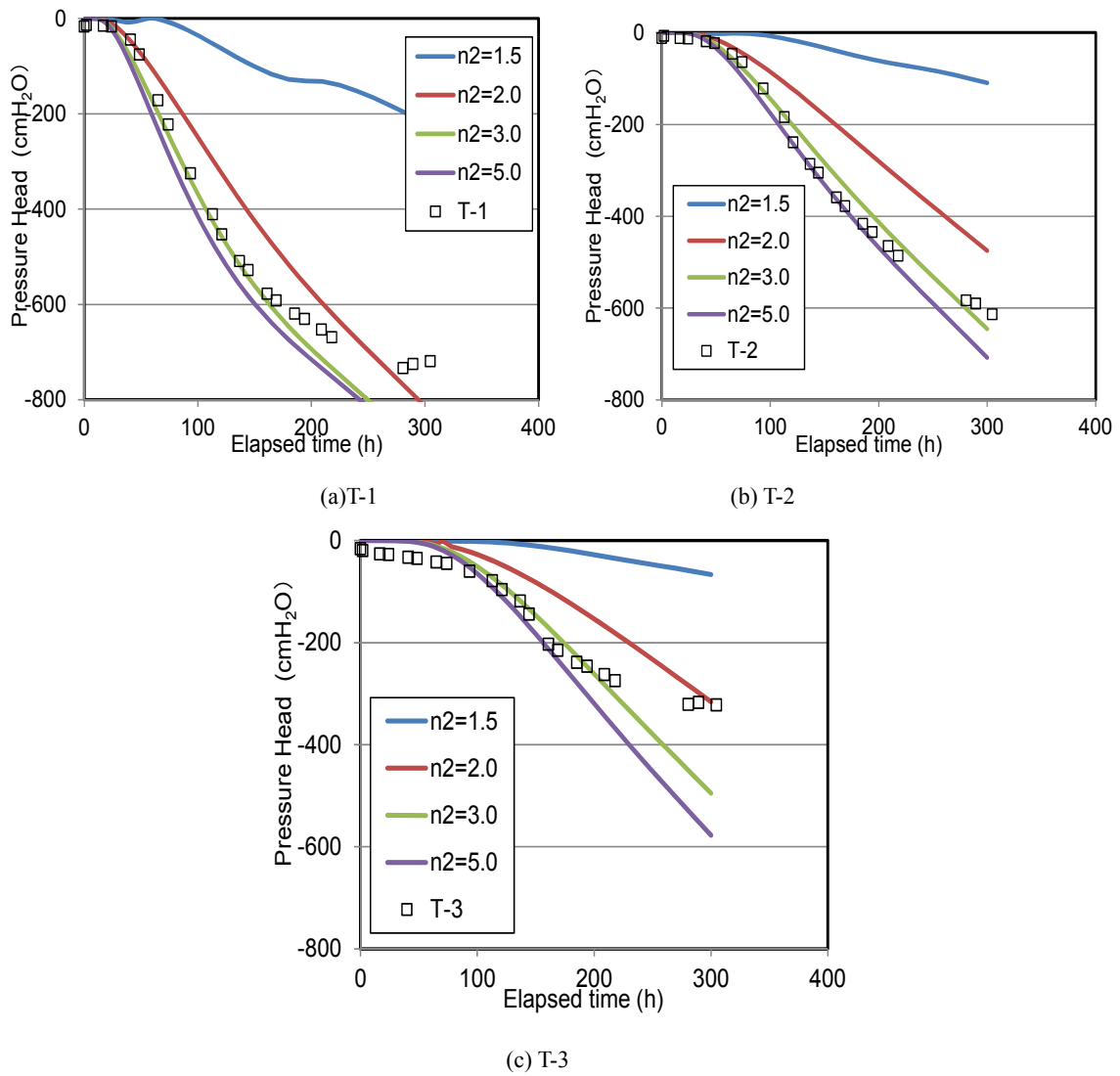


図 4-29 測定されたサクションと解析結果

d) 試験結果：試験 2

図4-30に体積含水率のフィッティング結果と、比透水係数のパラメータ n_2 を変化させた際の飽和度を与える影響を示す。図示された結果は $n_2=3.652$ であるが、図4-30(b)に示されるように $n_2=3\sim5$ で変化させても飽和度分布の変化は比較的小さい。この結果は試験1のサクシジョンの非定常変化に対するフィッティングにより得られた結果と同じであり両者の試験は整合性のある結果を与えたことを示唆している。

水分特性曲線を VG 式でフィッティングして得た n_1 を比透水係数に $n_2=1.237$ をとして適用すると図 4-30(b)から推察されるように実際に測定された飽和度分布を表現することが難しいことがわかる。このことから、通常その利便性より利用される水分特性曲線から一義的に比透水係数が得られるとする VG 式は、少なくとも今回用いた白浜砂岩に対しては適用できないと考えられる。

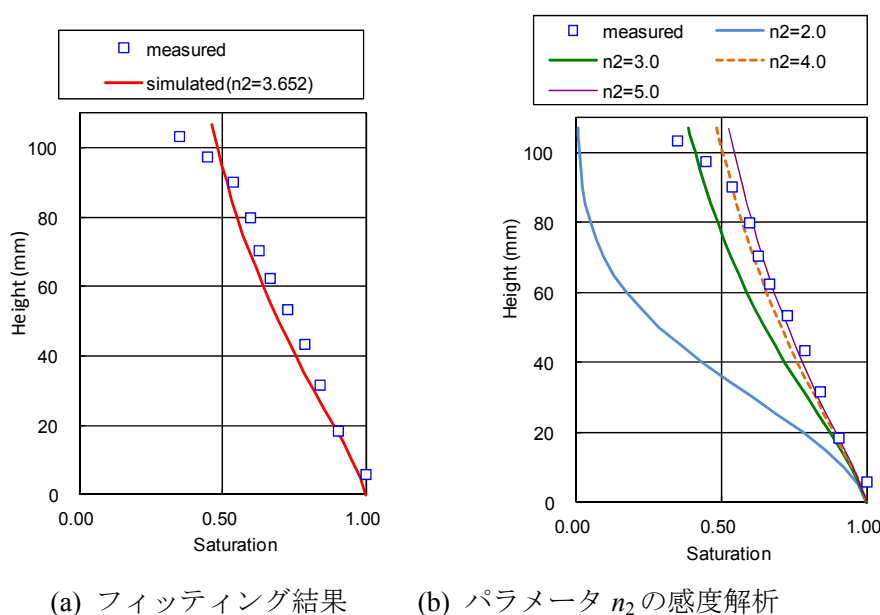


図 4-30 測定されたサクシジョンと解析結果

4.3.3 本節のまとめ

白浜砂岩の水分特性曲線を3種類の方法で測定（図4-18，図4-31(a)Suction(measured)し，VG式で曲線近似した水分特性（図4-31(a)Suction(vanGenuchten)）を利用して比透水係数を同定した。水分特性曲線の測定では測定原理の異なる3種類の測定方法を適用したが，図4-18，図4-31(a)に示されるように連続的な測定値が得られ，今回適用した測定手法の実用性を確認することができる。

比透水係数に関しては，2種類の排水過程の試験を行い，水分特性曲線を表現するパラメータ n_1 とは独立に比透水係数を表現するパラメータ n_2 として定め，結果的に $n_2=3\sim5$ という結果を得た。図4-31(a)にはこの中間の $n_2=4$ の曲線と，水分特性曲線から与えられる比透水係数（ $n_2=1.237$ ）を合わせて示す。図中確認されるように飽和度0.5にておよそ4オーダーあまりの違いを示し，水分特性曲線と独立に比透水係数を設定する必要性が示唆される。

図4-32に上記一連の岩石の不飽和浸透パラメータ評価の流れを示す。

従来の不飽和浸透特性に関する研究は主に透水係数の大きい，液相としての水分移動を中心に

研究されている。一方、今回は透水係数の小さい岩石であり、蒸発量計測により流量を評価しているとおり、気相での水分移動を含めて比透水係数を評価している。不飽和状態における水分フラックスは図4-33に示すような要因、成分に分類される。このため、今回の試験評価が多孔質媒体中の水分移動のうち液相・気相を合わせて評価したことで、従来主に行われてきた液相を対象とした比透水係数よりも大きな比透水係数となったと考えられる。

今回の試験からは $n_2=3\sim5$ という結果としたが、VG 式のパラメータ n_2 と比透水係数の関係として図 4-31(b)に示されるように、比透水係数は $n_2=3\sim5$ においての差は $n_2=2$, $n_2=1.237$ との差より小さく解析結果への影響が小さく、 n_2 が 3 より大きい場合には、VG 式の特徴として、比透水係数のパラメータ n_2 はある程度の幅で評価して差し支えないと考えられる。

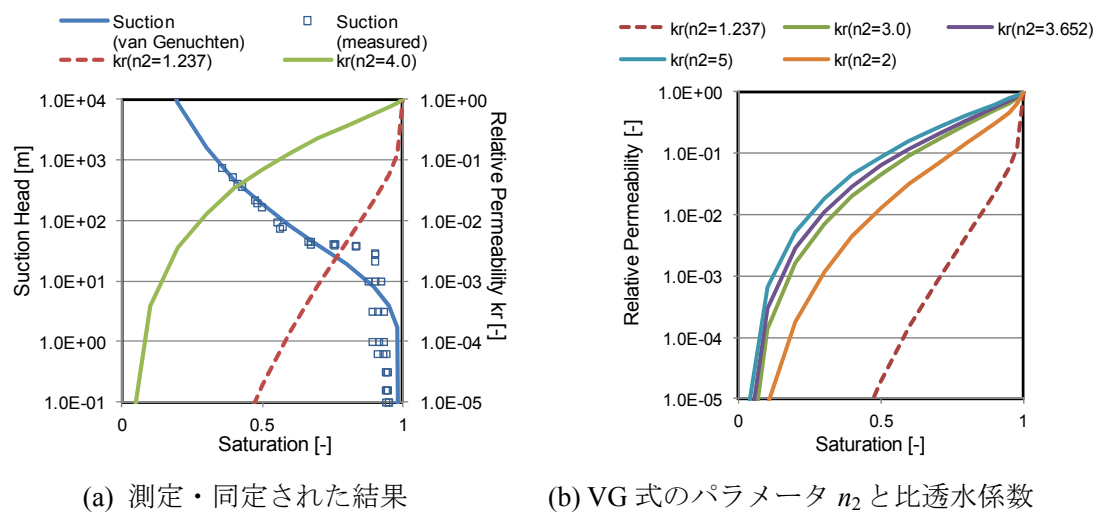


図 4-31 測定されたサクションと解析結果

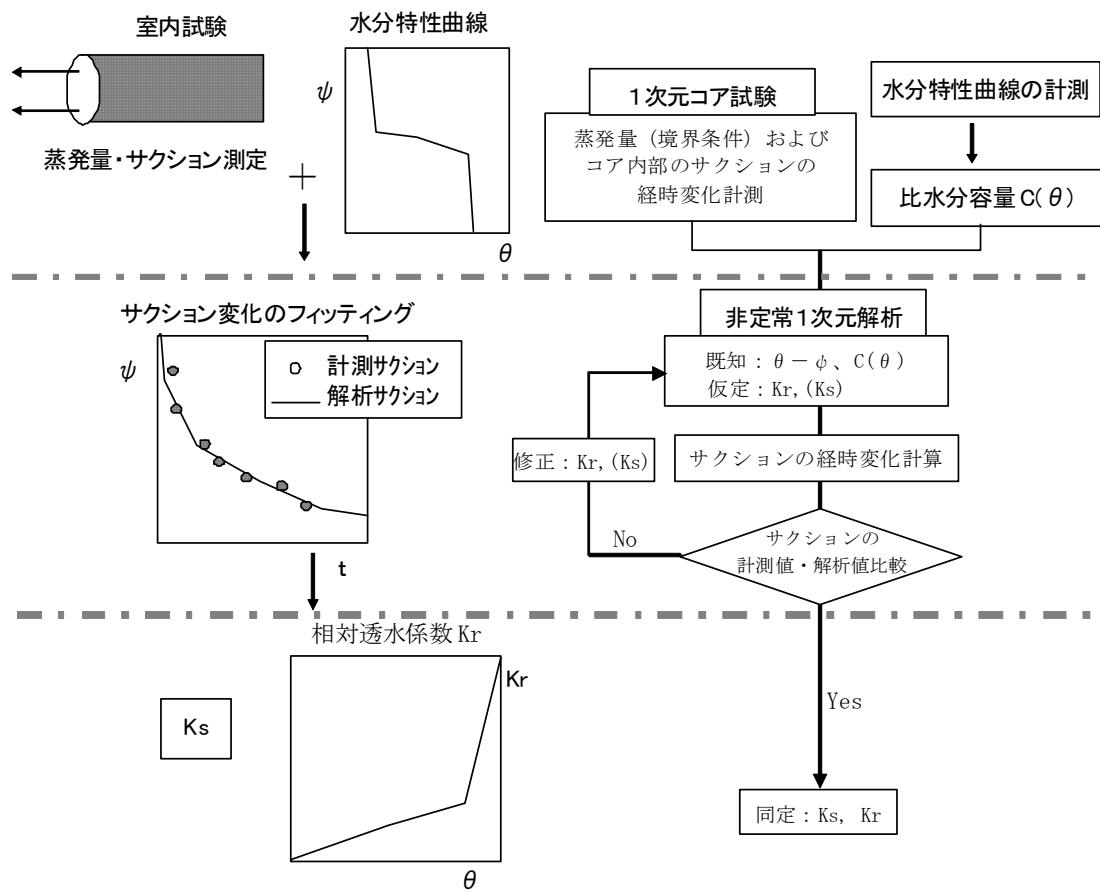


図 4-32 岩石の不飽和浸透パラメータ評価の流れ

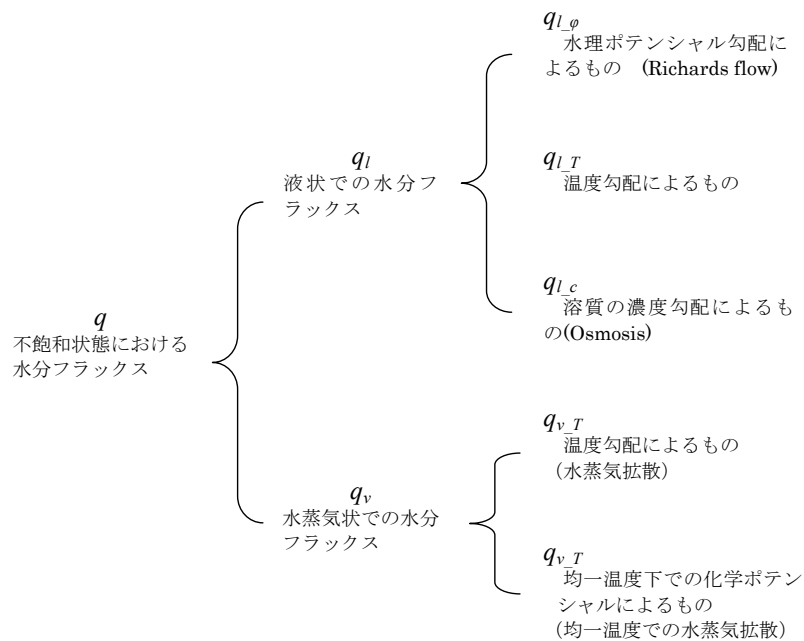


図 4-33 不飽和状態における水分フラックスの構成

4.4 第4章のまとめ

本章では、不飽和特性の測定、評価として、類のない人工砂地盤における測定原理方法の異なる不飽和挙動測定評価方法の適用性試験を行い適用性測定方法の整合性・適用性を確認した。また、この人工地盤試験の注水過程に対する浸透流解析を実施し、測定結果と調和的結果を得、飽和・不飽和解析手法の適用性を人工地盤規模にて確認した。

また、測定例の少ない岩石の不飽和浸透パラメータの測定を、砂岩試料を用いて行った。この測定の中で、砂岩試料の水分特性曲線をレンジの異なる三種類のサクション計測を組み合わせ測定し、岩石では初めてといえる広い範囲の水分特性曲線の測定に成功した。また、この水分特性曲線の二種類の測定項目の異なる排水試験に適用し比透水係数を逆解析的に測定し、二種類の試験でほぼ同じ結果を得た。

以上の検討より、水分分布の変化する不飽和地盤における不飽和浸透パラメータの評価方法の適用性と評価方法より信頼性の高いものとした。

5. 浸透流解析から地盤の沈下量を評価する解析システムの研究

わが国の大都市の多くは河口付近の沖積層上に存在し、地下水位が高くその地質は粘土層を有し軟弱であることが多い。従来このような都市部での掘削工事では掘削部の安全性確保とともに周辺地盤の地下水位への影響やそれに伴う地盤沈下対策が重視され、工事計画や仮設設計に際し、より高精度で迅速な対応が望まれている。

著者らは沈埋トンネル陸上接続部の開削工事に際し、各種対策工の影響・効果の評価をより効率的に実施すべく、浸透流解析を中心として各種地下水対策の影響や効果の評価をすると共に、浸透流解析に際して構築した水理地質構想モデルのデータセットを利用して 3 次元的地質構造を考慮した地盤沈下量を簡易に推定するシステムを開発する研究について示す

5.1 沈下量評価システム

5.1.1 システム概要

本システムは市販の地下水流動シミュレーションソフト MODFLOW (USGS : 米国地質調査所) をベースに施工対象エリアの地質構造モデルを作成し、各種地下水対策を反映した地下水流動シミュレーションを実施すると共に、作成したモデルデータや地下水流動シミュレーション結果のデータを市販の表計算ソフト (Microsoft Excel) に展開し、モデル各要素の沈下量を算定、鉛直方向に各要素の沈下量を足し合わせることで地表沈下量を簡易手法により算定するものである。

MODFLOW は、米国地質調査所により開発された公開プログラム MODFLOW に、プリ・ポスト機能を付加しパッケージとして商用化したものである。

MODFLOW は、ダルシーの法則を仮定した水の質量保存則を有限差分法に基づいて数值的に解く 3 次元の地下水流動解析プログラムである。差分法のため、モデル形状の表現は格子状の制約を受け、FEM のように自由のモデル形状を反映することは難しい。一方で容易に要素分割、結合が可能であり作業効率は高い。また、モデル内での井戸の設定や透水係数などの物性値の設定も容易で迅速な対応が可能である。

このシステムのオリジナリティーとしては、市販の MODFLOW と表計算ソフトを利用し、地下水解析から沈下量算定までを簡易に評価できるようにする考え方、MODFLOW データ構造を理解し沈下量算定に必要なデータを表計算ソフトへ展開できるインターフェイスの開発、表計算ソフト内での沈下量算定ロジックにある。

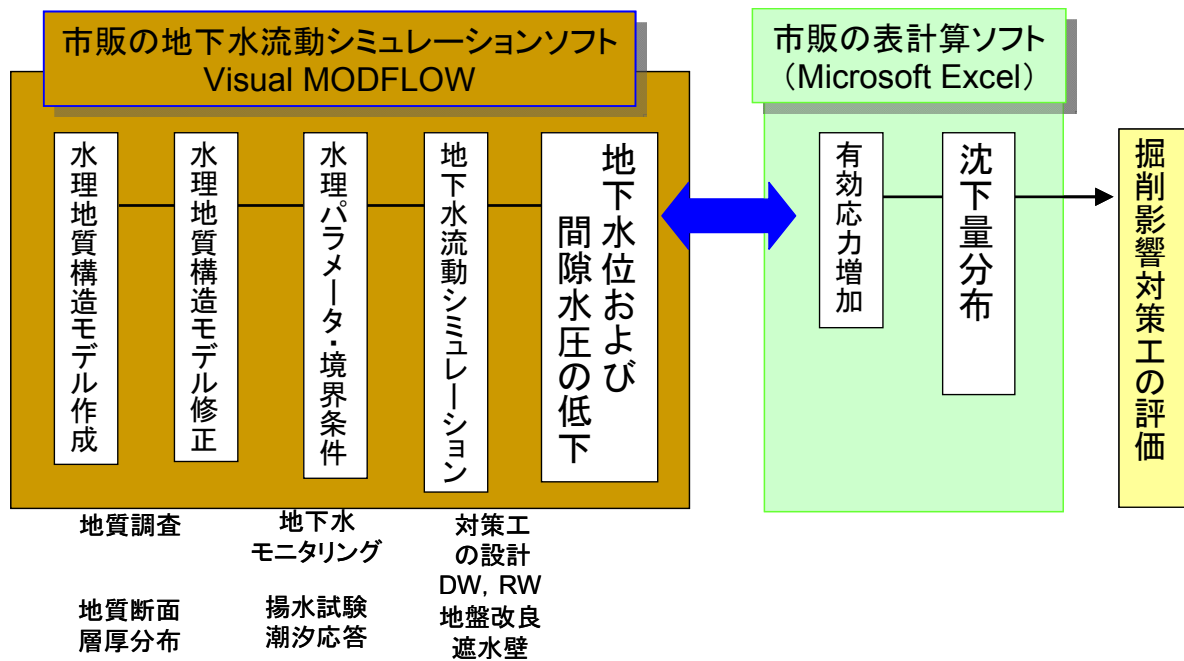


図 5-1 システムのフロー

5.1.2 沈下量算定手法

沈下量は、地下水位低下に伴う有効応力の増分から、各要素の変形特性値、層厚から各要素の沈下量を独立に算定する。沈下量は 式(1)により算定する。式(1)では粘土の沈下量算定で使用される体積圧縮係数 m_v を示している。本システムでは、粘土のほか砂質土の沈下量も考慮できるように、物性区分で砂質土を識別し、砂質土に対しては体積圧縮係数の代わりに、変形係数や N -値に応じて設定可能な砂の圧力-間隙比曲線（道路公団 1988）から体積圧縮係数 m_v 相当値（変形係数の逆数、圧縮指数 C_c と初期圧力より与えられる体積圧縮係数（石原研而 1988））を設定できるようにしている。

$$S = m_v \cdot H \cdot \Delta p \quad (5-1)$$

ここで、 S ：沈下量， m_v ：各要素の体積圧縮係数， H ：各要素の高さ（層厚）， Δp ：有効応力の増分である。地表面での沈下量は柱状に鉛直方向に連なる各要素の沈下量の総和として次式で与えられる。

$$S = \sum_i S_i = \sum_i m_{vj} \cdot H_j \cdot dp_j \quad (5-2)$$

この算定イメージを図 5-2 に示す。この沈下量算定システムでは沈下に伴う水平方向への変形は考慮しておらず鉛直方向だけの沈下変形を扱う。このため簡易沈下量推定システムと称す。

本システムの妥当性に関しては、3次元で評価が容易で他方法との沈下量算定結果比較の可能なモデルを想定し、本システムを適用、その計算上の妥当性を確認（Imai 2004）している。

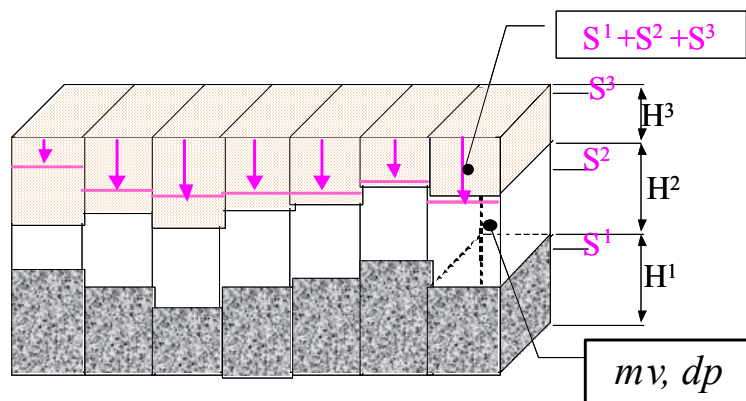


図 5-2 沈下量算定イメージ

5.1.3 沈下量算定表計算ファイル

沈下量算定表計算ファイルを図 5-3 に示す。当ファイルは下記 5 枚のワークシート

- ①使用手順を示すシート
- ②物性値を入力するシート（図 5-4 に砂質土の圧縮特性）
- ③MODFLOW からのデータを貼り付け計算するシート
- ④地表面沈下計算のためデータを並べ替えるシート
- ⑤砂の圧力-間隙比曲線のデータシート

から構成される。

必要な物性値は物性区分番号、水中重量、 N -値、体積圧縮係数である。沈下量算定は物性値の入力、MODFLOW からのデータ抽出・貼り付け、データの並び替えにより、地表面沈下量分布として表面沈下並び替えシートに沈下量評価地点の x, y 座標と算定された沈下量が与えられ、必要に応じ沈下量コンタや測線上の沈下量分布として利用できる。

対策工の検討は、開削状態の継続期間を考慮して定常解における沈下量算定を基本としている。

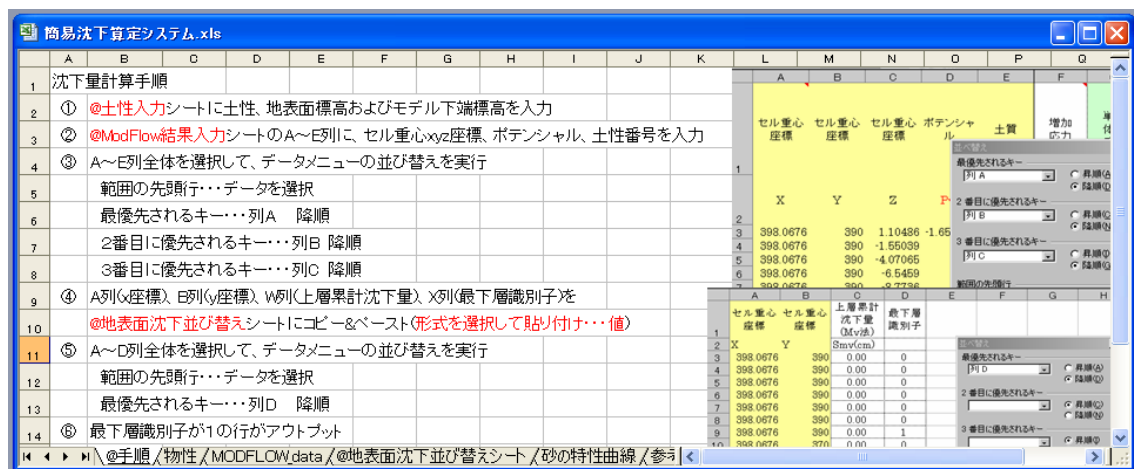


図 5-3 簡易沈下算定システムファイル

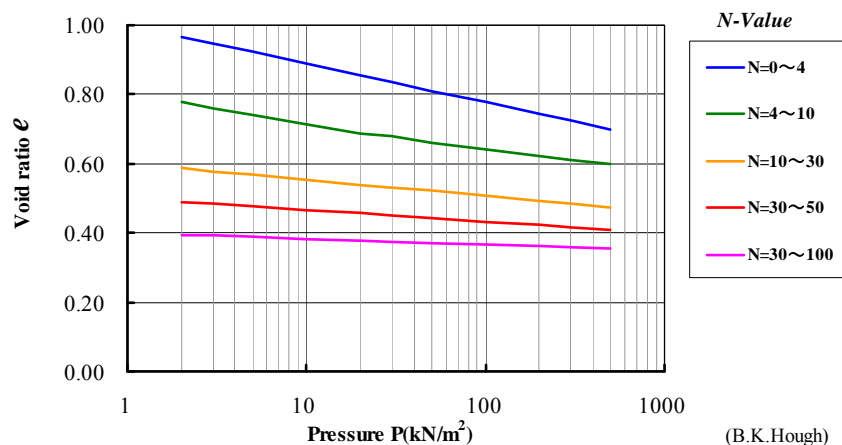


図 5-4 砂質土に適用する圧力と間隙比の関係（日本道路公団 1998）

5.2 沈下量算定システムの作動確認

沈下量算定システムの作動の妥当性を確認するため、解析結果の評価が容易なモデルを設定し、当システムを適用し、得られる解の妥当性を吟味した。図 5-5 に使用した例題の概要を示す。

例題は、領域形状と透水係数が同じで体積圧縮係数の異なる隣接する二つの領域（soil-1, soil-2）で形成される地盤を対象とする。領域 soil-2 の体積圧縮係数 m_v は領域 soil-1 の 2 倍の値とする。

図 5-5 (b) に示すように初期に地表面まであった水位が、その右端で 10m 水位低下した際の地盤沈下量を算定するものである。この例題では、①水位低下に応じた沈下量が算定されること、②物性値の違いが反映されていること、③算定された沈下量が妥当な値であることを確認する。

図 5-5 (c) は沈下量算定結果として、地表面沈下量の平面的分布を示す。沈下量は 10cm 間隔のコンタで示され、地下水位低下量に応じた沈下量分布を示し、また領域 soil-2 は領域 soil-1 の 2 倍の沈下量となって妥当な算定結果を示している。

図 5-5 (d) は各領域（領域 soil-1 では $y=15\text{m}$ 、領域 soil-2 では $y=45\text{m}$ ）における x 方向の沈下量分布を示している。グラフの■、○印は MODFLOW の解析モデルグリッドの中心位置（評価点）を示している。領域右端部に着目すると、水位低下量 10m（ $\approx 100\text{kN/m}^2$ ）、層厚 50m、体積圧縮係数（領域 soil-1 では $m_v=0.0001\text{m}^2/\text{kN}$ 、領域 soil-2 では $m_v=0.0002\text{m}^2/\text{kN}$ ）となり、前述の式(1)に代入し領域 soil-1 では沈下量 100cm、領域 soil-2 では 50cm と計算される。これらは、図 5-4 (d) に示す沈下量算定システムにより算定された結果と一致する。このことは、開発した沈下量算定システムが、水位変化による有効応力増加量を考慮し、有効応力増加量に応じた沈下量の評価し、物性区分を認識して体積圧縮係数設定に応じた正しい沈下量を算定することが確認される。このことから、開発したシステムが、少なくとも設定した例題に関して妥当な算定結果を示すことが確認される。

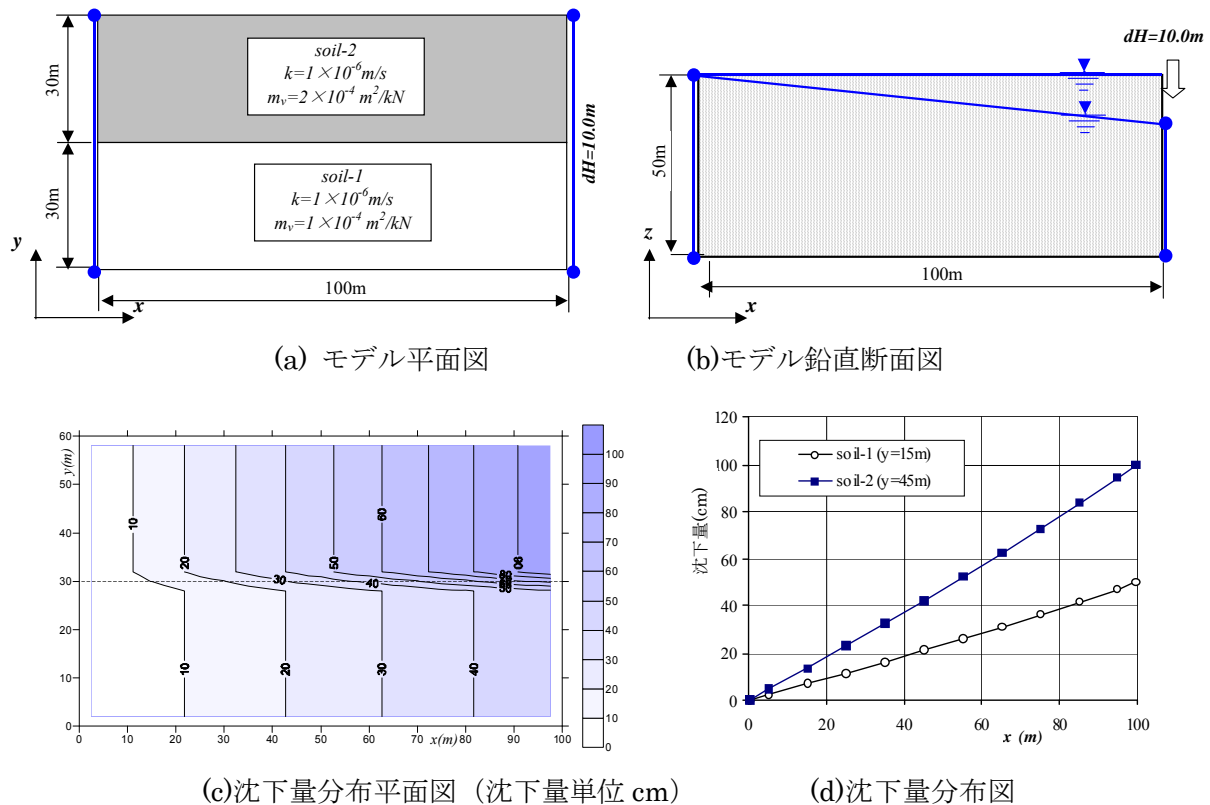


図 5-5 例題モデルの形状・算定結果

5.3 適用サイトの概要

5.3.1 工事概要

本工事は、新若戸道路（港湾整備事業 1,181m）のうち若松側沈埋函接続部に位置する陸上トンネル区間 120m の 2 連ボックスカルバート（幅約 36m、高さ約 11m）を開削トンネル形式で構築する工事である。開削工事は、護岸部から約 150m、幅約 40m、深さ約 15～20m の掘削となる。図 5-6 にサイトの平面図を示す。図中○は揚水井、◎は観測井、▼は注水井、■は層別沈下計設置位置を示す。

5.3.2 地質

図 5-7 に地質断面図を示す。現地は海岸に隣接した埋立地で、地質は下位から基盤礫岩 (Icg)、基盤風化部 (W-Icg)、洪積砂礫層 (Dsg)、沖積粘土層 (Ac)、細砂下層 (As2, As3)、細砂上層 (As1) および表土・埋土からなる。基盤風化部 (W-Icg) および洪積砂礫層 (Dsg) は被圧地下水を有し、護岸から約 200m 程度沖合の海水と通じ、海水位より高い位置で水位変動²⁾ している。基盤礫岩には破碎帯が存在し、掘削時の揚水量、地下水位低下量の予測・把握を難しくしている。

表 5-1 に地質区分と物性値を示す。

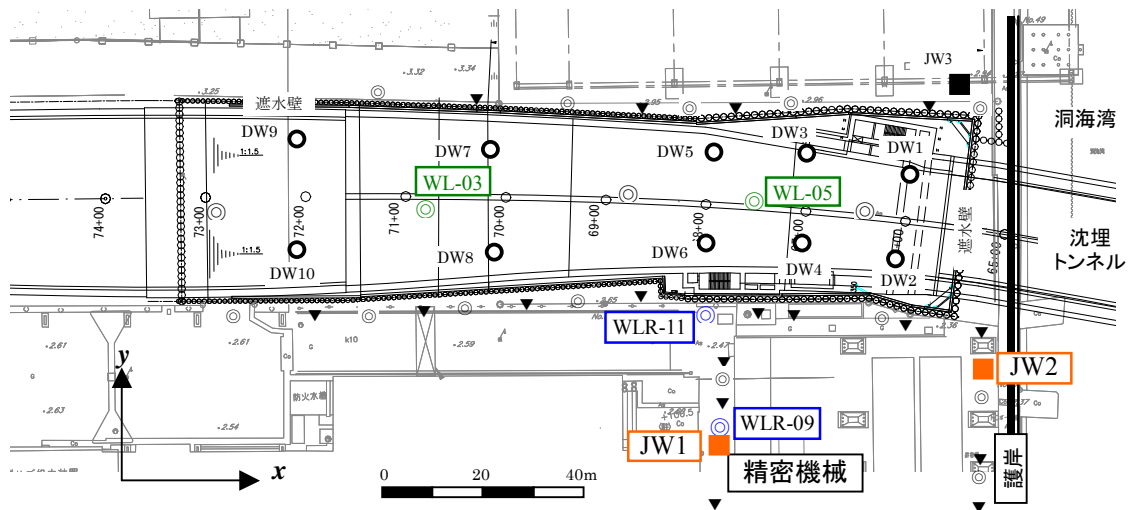


図 5-6 対象サイトの平面図

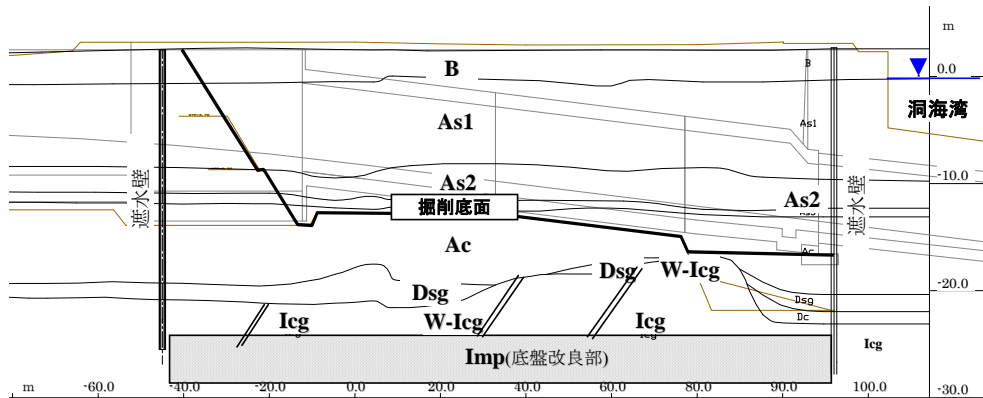


図 5-7 対象サイトの地質構造

表 5-1 地質区分と物性値

物性区分 番号	土質	記号	透水係数 (m/s)	水中密度 (g/cm ³)	N値	変形係数 (kN/m ²)	m _v (m ² /kN)
1	埋め土	B	1.0E-05	1.0	35	1.0E+04	-
2	細砂上層	As1	7.0E-06	0.9	22	1.1E+04	-
3	細砂下層	As2,3	4.0E-06	0.9	10	1.1E+04	-
4	沖積粘土層	Ac	1.0E-09	0.6	6	6.0E+03	2.0E-04
5	砂礫層	Dsg	1.0E-05	1.0	28	1.1E+04	-
6	風化基盤礫岩	W-Icg	5.0E-05	1.5	50	9.0E+04	-
7	基盤礫岩	Icg	5.5E-06	1.5	50	2.5E+06	-
8	遮水壁	RW	1.0E-10	2.0	50	2.5E+06	-
9	破碎帯	DZ	5.5E-06	1.2	50	9.0E+04	-
10	洪積粘土層	Dc	1.0E-09	0.7	28	1.1E+04	-
13	底盤改良部	Imp	5.0E-07	1.0	50	1.1E+04	-

5.3.3 本工事で必要な対策検討課題

図 5-7 の断面に示すように掘削底部は粘土層 (Ac) にあり、粘土層の下には透水性の高い洪積砂礫層 (今井ほか 2004)があり、砂礫層の被圧水による粘土層の盤ぶくれ対策が必要となる。対策としてはこの被圧水を井戸により排水して圧力低下することとしている。一方、この開削部に隣接し、精密機械基礎や天井クレーン基礎を有する工場が存在、被圧水の排水に伴う地盤沈下を生じると精密機械での生産やクレーンの作動に影響を与える。このため、排水に伴う掘削部に隣接する周辺の地盤沈下予測とその対策が必要となる。また、基盤岩は風化部、破碎帯を有し、上面の形状は図に示すように不規則であり透水性状が把握し難い。また、基盤上にある砂礫層の基盤形状の影響で不規則な分布をしており同様に透水係数設定が難しい。

5.4 対策工の検討

5.4.1 対策工

主な対策工としては①掘削部の盤ぶくれ対策としてディープウェル設置の検討、②掘削部揚水による周辺地盤の沈下対策がある。ここでは、掘削内安定化のための水位低下が確保された状態で周辺に与える沈下の影響とそれを抑制するための対策工の比較結果を示す。比較は開発したシステムで算定した沈下量分布として示す。

主な対策工としては

①底盤全面の透水性を低下させる底盤改良

②遮水壁根入長を長くするカーテングラウト

(精密機械側だけに施工、図 5-6 の中紙面下側)

③リチャージウェル外周部の地下水保持

を検討し、①②③の組み合わせやそれぞれの設置位置、数量の変化に関して多くの検討を実施した。

5.4.2 地盤沈下量推定結果

各対策工の沈下量への影響評価結果に先立ち、対策工を実施しない場合の表層面の沈下量分布コンタを図 5-8 に示す。図 5-8 に示す a-a'断面での沈下量分布を図 5-8 に示す。

沈下量の算定に際しては、表 5-1 に示すパラメータを設定して。粘土層の体積圧縮係数は、室内圧密試験結果から $m_v=2 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{kN}$ を設定している。基盤岩等はほとんど変形をしないとして非常に小さい値を設定している。埋め土、細砂層、砂礫層は表 5-1 に示す変形係数の逆数を体積圧縮係数に相当する変形パラメータとして設定している。

図 5-8 では掘削部を中心に沈下量が大きく、離れるにつれて沈下量は小さくなる。掘削部に接した箇所では 14cm 程度の沈下量となっている。海側の沈下量は海からの地下水の供給により沈下量は陸側より小さくなっている。

図 5-9 の a-a'断面での沈下量分布では、①無対策での沈下分布、②無対策で粘土層だけの沈下量を示した分布、③底盤全面を深さ 5m で透水係数を $5 \times 10^{-7} \text{m/s}$ を目標に改良したケース、④遮水壁の根入れ長をカーテングラウトにより伸ばしたケース、⑤底盤改良に加え掘削部外周にリチャージ (井戸 17 本、平均間隔約 25m、注水量 $28.8 \text{m}^3/\text{day}$) をしたケースでの推定結果を示す。

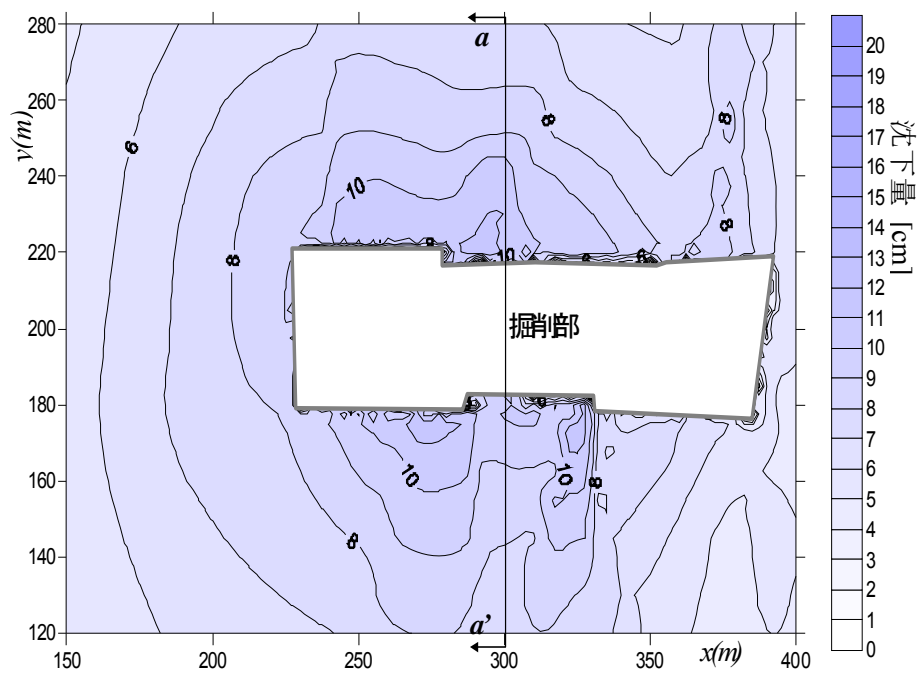


図 5-8 対策工を実施しない場合の表層面の沈下量分布コンタ

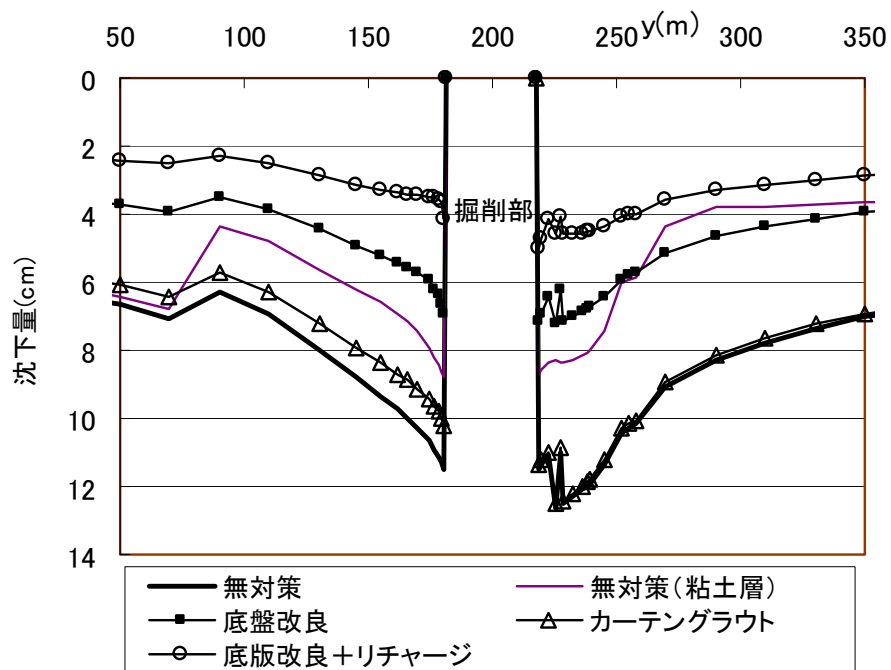


図 5-9 a-a' 断面での沈下量分布

5.5 計測値とシミュレーション結果

実際の工事は先の結果を参考に、底盤改良に加え掘削部外周にリチャージをすることとした。

掘削内には粘土層下部被圧砂礫層を対象に 10 本のディープウェルを設置し揚水した。以下に対策工実績と測定された地下水位、層別沈下計による地表、砂層（上）、砂層（下）、粘土層における沈下量を示す。また、合わせて揚水、注水実績を地下水シミュレーションに反映し、開発したシステムでの沈下量算定結果を実測値と合わせて示し考察する。

5.5.1 揚水・注水実績

揚水量と注水量の実績を図 5-10 に示す。また、注水量の揚水量に対する比率（右軸）を合わせて示す。注水量は初期に揚水量の 1/5 程度であるが、時間の経過と共にその比率は低下している。これは目詰まりによると考えられる。

5.5.2 計測値とシミュレーション

揚水量と注水量の実績をシミュレーションに反映させ、解析的に揚水量と注水量による地下水シミュレーションを実施し、その結果から開発したシステムによる沈下量の算定と実際の沈下量との対比を実施した。以下に、実測された地下水位とシミュレーションによる地下水位の比較、実測された沈下量とシミュレーション・簡易沈下量算定システムによる沈下量の比較結果を示す。

(1) 地下水位

地下水の実測値とシミュレーション（解析）結果の比較例を図 5-11 に示す。WL-03, WL-05 は掘削部の揚水している砂礫層の水位、WLR-09 と WLR-11 は掘削部外側の精密機械のある付近での砂礫層の水位である。また解析で、対策前とは底盤改良までの段階で潮汐応答などから同定した各地層の透水係数を設定した解析結果、対策後は底盤改良後に揚水試験を実施し設定した透水係数を適用した解析での結果である。水位変化傾向はある程度、解析により表現されているが、WL-05 を除き 1m～6m と水位が異なっている。対策前に同定した透水係数での解析と対策後同定した透水係数設定では後者のほうが実測に近く、より底盤改良の影響を反映した透水係数設定ができていたことが示唆される。

WLR-09 と WLR-11 は掘削部外側の精密機械付近にあり水位低下による地盤沈下が懸念される注目観測点である。解析との対比では WLR-09 は解析の水位低下が実測値よりも大きく、WLR-11 は実測値の水位低下が解析よりも大きく、水位予測に関しては WLR-09 では安全サイドの予測、WLR-11 では危険サイドの予測であったといえる。

(2) 沈下量

沈下量は図 5-6 に示す JW1, JW2 に設置された層別沈下計で測定され、JW1, JW2 とともに図 5-12 に示す 4 つの深度、地表および砂層・粘土層の中央での鉛直変位を示している。その測定結果を図 5-13、図 5-14 に示す。各測定点間の沈下量の差は 2 点間の層厚の変化を示している。

JW1 を見ると粘土層の沈下が大きい、また粘土層と砂下層との差も大きく、粘土層の沈下の寄与が大きいものと考えられる。

JW2 では地表と砂上層の差が大きく、大半が埋土層の沈下量と思われる。揚水は粘土層の下で行っているため埋土層の沈下は揚水以外の要因(局所的に変形しやすい土質の存在など)による影響が大きいと考えられる。

図 5-16、図 5-17 には開発したシステムの算定方法を非定常な水位低下に応用し、沈下量の経

時変化を算定した結果を実測値と共に示す。今回開発した沈下量算定システムは定常の地下水シミュレーション結果から沈下量を算定する目的で開発し、非定常現象への適用には現象的にやや無理があるが、その適用性を知るため適用した。

算定結果は実測値と比較し、およそ2倍の大きな値を示している。これは、揚水初期に大きく沈下量が発生していることから、表層の埋め土、細砂層の水位低下に伴う沈下量を大きく算定していることに原因がある。つまり埋め土、細砂層に設定した変形のパラメータ（表 5-1 に示す変形係数の逆数）が大きすぎたことを示唆している。

この変形係数は山留めの水平方向の変位量計算に適用したものであり、確認が必要であるが鉛直方向の変形係数が水平方向よりも大きい可能性が考えられる。

粘土層についてもやや沈下量推定システムによる沈下量が大きくなっている。粘土層に対し非定常の水位低下量（有効応力増分）に線形関係とする沈下量算定には今後検討の余地があると考えられる。

図 5-17 には、地下水シミュレーションによる粘土層からの排水量と粘土層の体積減少が等しいと仮定して算定した沈下量と実測値の対比を示す。図 5-15、図 5-16 に示した体積圧縮係数から算定される沈下量よりも粘土層からの排水量に着目して算定した沈下量はより実測値に近い値を示している。地下水シミュレーションを利用した粘土層の沈下量算定方法としては有効な方法と考えられる。図 5-17 での JW1 に着目すると 50 日以降実測の沈下量は算定値よりも大きくなっている。この一つの要因としては地下水シミュレーションに設定した粘土層の非定常水収支に関わるパラメータの影響が考えられる。このため、粘土層の比貯留係数を確認するため図 5-17 に示した当初の比貯留係数 $S_s=2.4 \times 10^{-4}$ の結果を合わせて図 5-18 に示す。図から明らかなようにより実測に近い沈下量を示し、地下水シミュレーションの水収支から沈下量を算定する際には比貯留係数の設定が算定結果に影響することが理解される。

本システムの実用に際しては上述のように体積圧縮係数や比貯留係数などのパラメータ設定が重要となる。これらパラメータの設定に際しては、揚水初期における沈下量測定値から体積圧縮係数を見直すなど、実用に際しての適切なリスク回避措置が必要と考えられる。

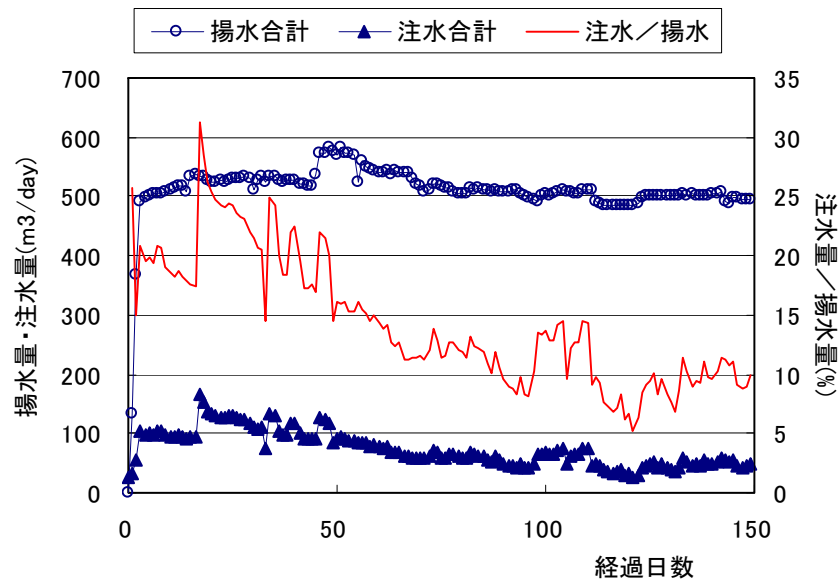


図 5-10 全揚水・注水量と注水／揚水の比率

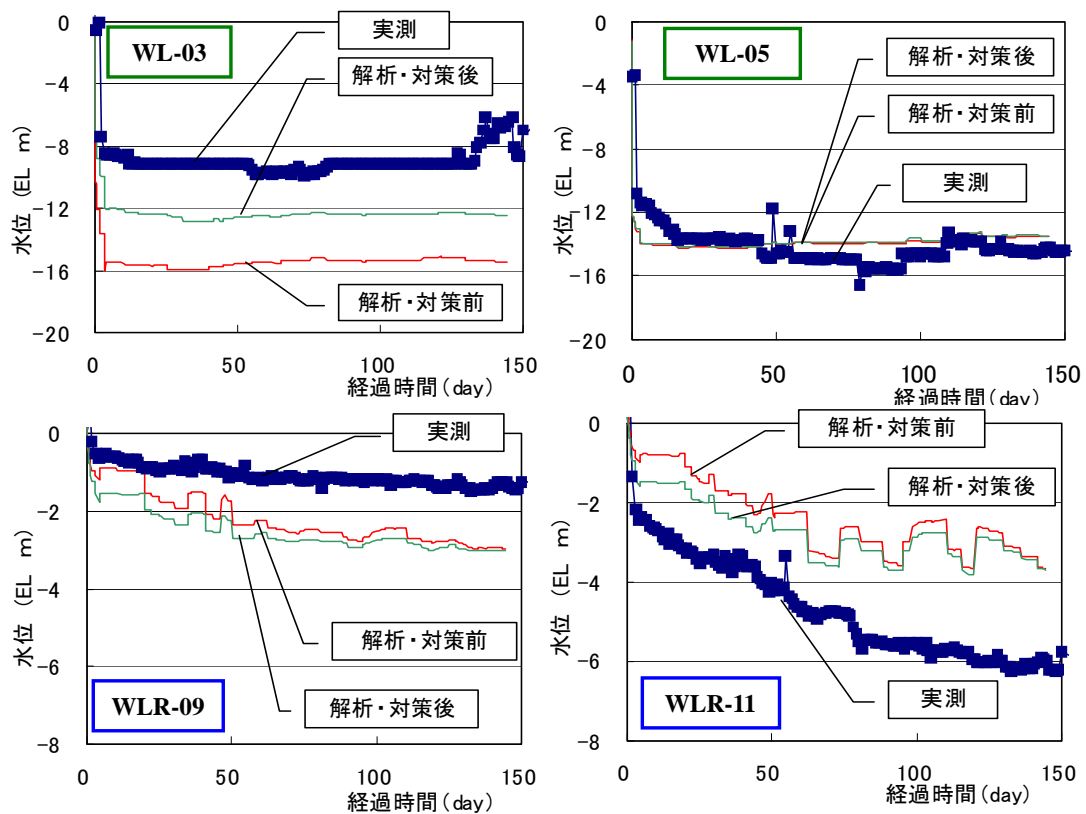


図 5-11 地下水の実績と解析

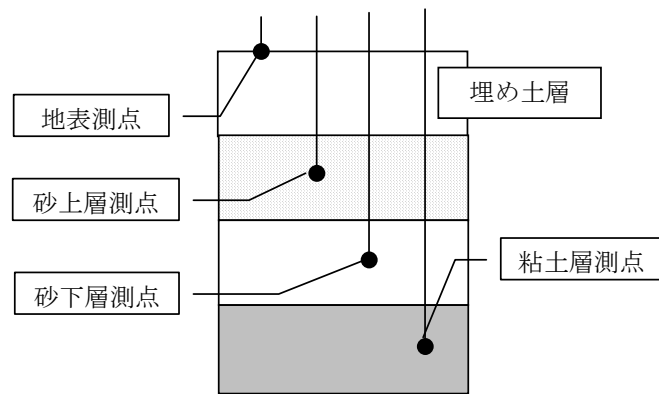


図 5-12 層別沈下計設置位置概要

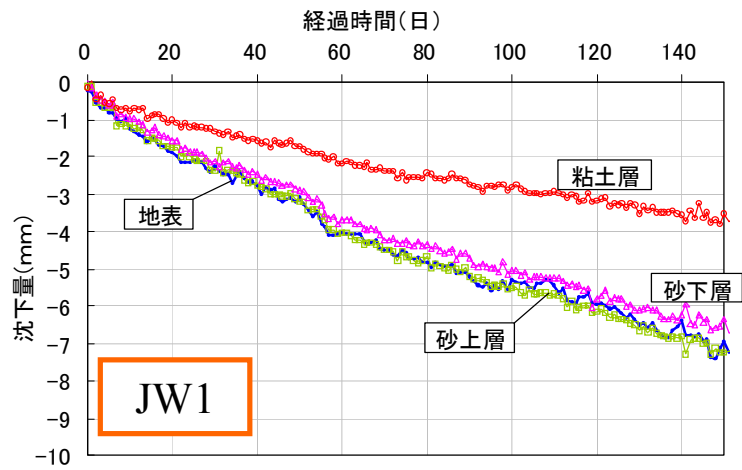


図 5-13 JW1 での沈下量測定結果

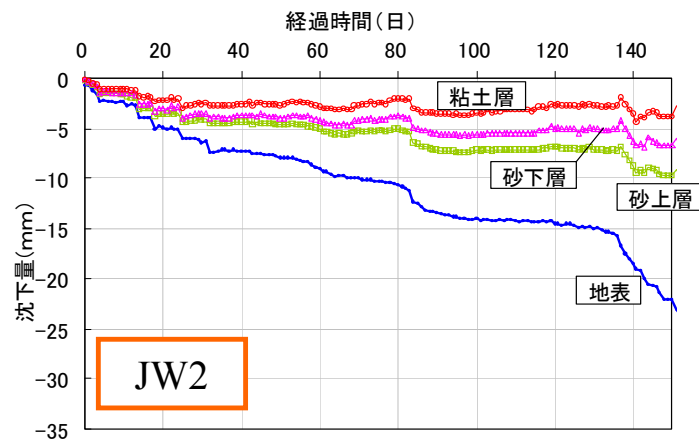


図 5-14 JW2 での沈下量測定結果

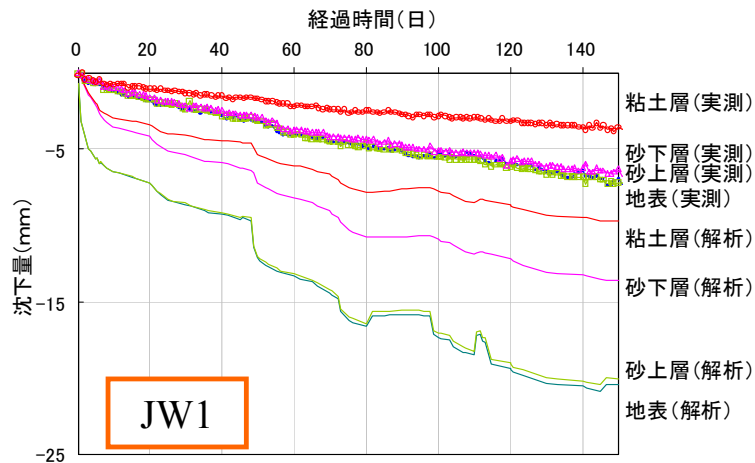


図 5-15 JW1 での沈下量とシステム算定結果

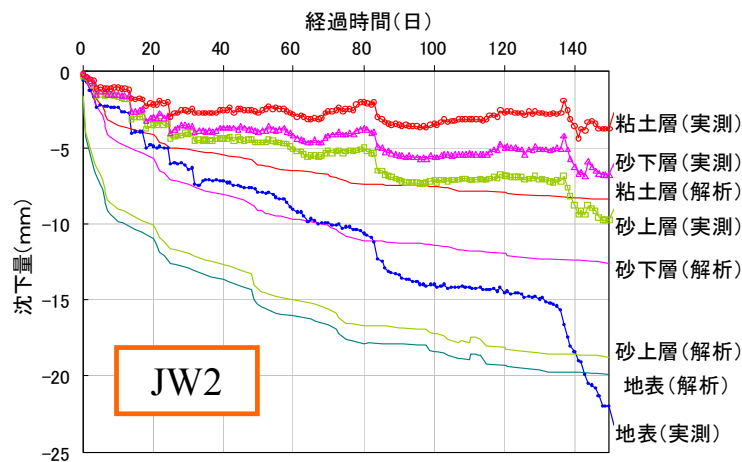


図 5-16 JW2 での沈下量とシステム算定結果

5.6 第5章のまとめ

海岸に隣接する開削トンネル工事に際して、掘削底盤安定のための地下水揚水計画と揚水に伴う周辺への水位低下、地盤沈下の影響を抑える対策について地下水シミュレーションを中心に検討した。ここでは、作業の効率化、対策工選定・意志決定の迅速さを目的に地下水シミュレーションのために構築したモデルデータを地盤の沈下量算定に適用することを試みた。

対策工検討のプロセスにおいては開発したシステムが有効に機能し、対策工の検討、評価を効率的に進めることができた。初期の水理地質モデル構築には地質調査結果からのモデル化、原位置での水位観測結果との対比によるモデルやパラメータの修正に時間を要したが、各対策工の効果評価に際しては整備したシステムが機能し、所期の目的が達せられた。

沈下量算定システムの算定結果の妥当性に関しては、算定結果が実測値よりも大きく、やや過大評価している傾向がみられた。この原因としては、①本システムは本来定常状態で沈下量を算定するシステムであり、対象とした実測の沈下量は非定常過程にあること、②設定した変形パラメータの誤差などが挙げられる。

図 5-17 に地下水シミュレーションの粘土層からの排水量から沈下量を算定した結果を示しているが、これは図 5-15、図 5-16 で示される沈下量よりも実測に近い値を示す。これは、今後当システムの改良として、粘土層に関しては排水量のデータを反映させて沈下量を算定すると、非定常過程へも精度良く展開できる可能性の示唆と考えられる。

図 5-18 には JW1 での比貯留係数を変化させた場合の沈下量の変化を示す。比貯留係数は地盤の変形性に関わる水理定数であり、水理解析から沈下量を推定する再には比貯留係数は重要なパラメータであることがわかる。

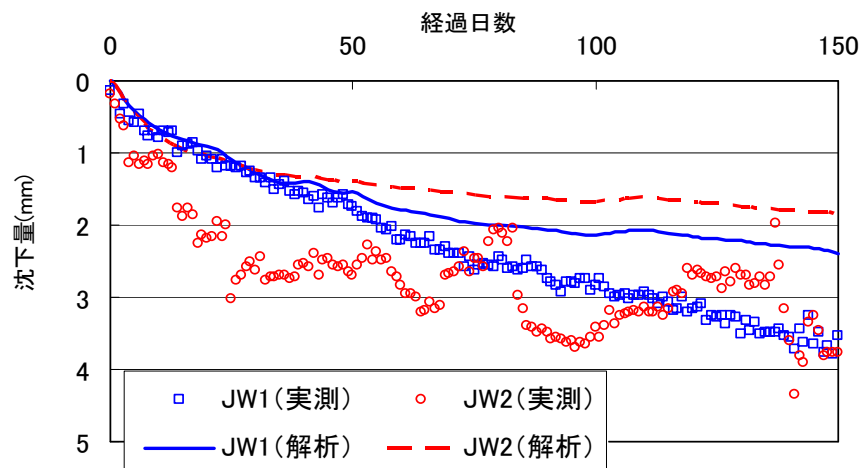


図 5-17 粘土層からの排水量から算定した沈下量

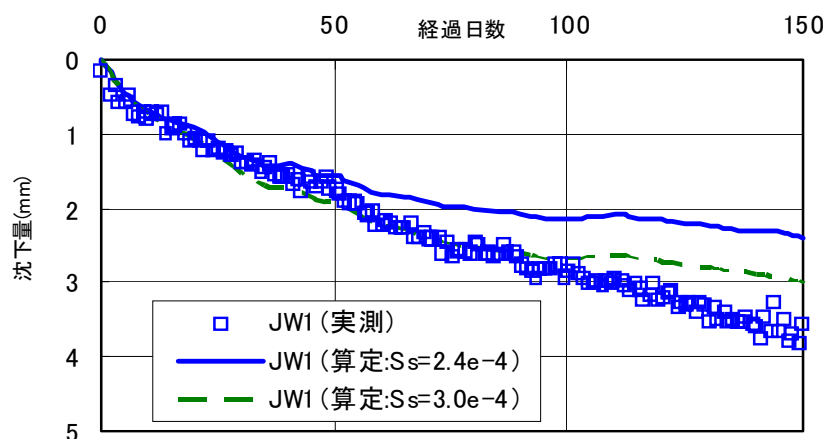


図 5-18 JW1 での比貯留係数を変化させた場合の沈下量の変化

6. 長期地質環境変遷に対応した広域地下水流動解析方法の研究

本研究においては、最終的に放射性廃棄物の地層処分の将来的な安全性を評価に利用しうる長期地質環境変遷を考慮した広域地下水流動解析方法の開発を目標とし、2段階の研究により解析方法の開発を実施した。第1段階として、300×300×300メートルスケールの領域において、立坑掘削に伴う3次元的で非定常に変化する地下水挙動の解析を実施し、対象領域の解析評価に資する調査および解析モデル構築に関わる一連の方法論に関して検討し、さらに本開発のベース技術である浸透流解析の改良とその適用による地下水流動解析を実施する。第2段階として、地形や地質構造の変遷の地下水流動特性に与える影響を浸透流解析により評価可能な方法論、システムについて検討し、解析システムとして具現化し、その適用性を提示する。

6.1 立坑掘削影響試験への浸透流解析の適用

広域地下水流動の長期的変遷を評価する解析方法の適用性を確認するために、同じような長期的地下水挙動を対象とすることは、一般的には難しい。一つの方法として、古水文学（paleohydrogeology）的方法により、過去から現在に至る古環境を推定し、この変遷を解析的に表現すること解析方法の適用性を確認する可能性が考えられるが、そのための知見の蓄積や少なからず推定が必要となる。そのため、ここでは、短期ではあるが、長期的変遷として代表的な過去の海水準変動と同様な100m程度の地下水位変動の場で、空間スケールのにも広域地下水流動場で想定される地形地質的に不均質性の高い場を対象に解析と地下水挙動の測定値を利用して、時間的、空間的な縮約スケールでの地下水流動挙動を捕らえることで長期変遷の評価方法の適用性を確認することとする。

地下水流動が非定常に変化し、また、立坑掘削に伴う排水に伴う地下水流動への影響環境での地下水挙動を解析的に評価するとともに、掘削に伴う間隙水圧等を測定し、解析結果と測定値を比較することにより、解析手法の適用性を確認する。

6.1.1 立坑掘削影響試験の概要

立坑掘削影響試験は、内径6m、深度150mの立坑を掘削し、立坑掘削の周辺岩盤に与える水理学的、力学的影響を定量的に評価するための実規模試験である。

試験立坑は、仕上がり内径6m、仕上がり深度150mで、厚さ40cmのコンクリート覆工が施工されている。覆工背面には、排水マットが設置され、岩盤から立坑への浸出は許容され、浸出した湧水は回収され、湧水量は適時測定されている。本試験立坑には、仕上がり内径4.5m、長さ20mの第一・第二計測坑道が設けられている（図6-1）。岩盤は発破工法を用いた1.2m毎のショートステップ工法により施工される。工期は1年半にわたった（柳澤ほか1992）。

試験は、図6-1に示す標高300m前後の丘陵部にある鉾山敷地内の平面的に300m×300mの範囲を対象に実施されたものである。試験サイト中央には、鉾山で使用される既存の調査立坑・坑道が存在している。図中の等高線の数値は標高(m)を示す。図6-2に、試験立坑、調査立坑・坑道の地下における位置関係を地質構造とともに示す。立坑は深さ約135mで、その底部から東方向

に坑道が伸びている。本試験で新たに掘削する立坑は既存立坑の北東に位置する。試験サイト外周、内部には図中に TH1～TH8, SN4 と示される 9 本のボーリング孔があり、それぞれの中には MP システムと称される複数のパッカーがついたケーシングが設置されており、パッカー区間の間隙水圧測定が可能であり、この測定を立坑の掘削前より掘削中と、継続的に実施することにより、孔内深度方向の圧力水頭の分布およびその経時変化を把握できる。

試験サイトは、鉱山敷地であるために、地質構造の調査が既になされ、地質構造が事前に把握されているメリットがある。さらに、地質構造に関する既往の知見からこの場所には、結晶質岩、堆積岩、未固結層、断層、不整合面が存在し、広域を対象とした地下水流動解析に際して遭遇が想定される地質構造的要因を含んでいるため、広域を対象とした地下水流動解析のスケールダウンした試験対象地として適していると考えられる。

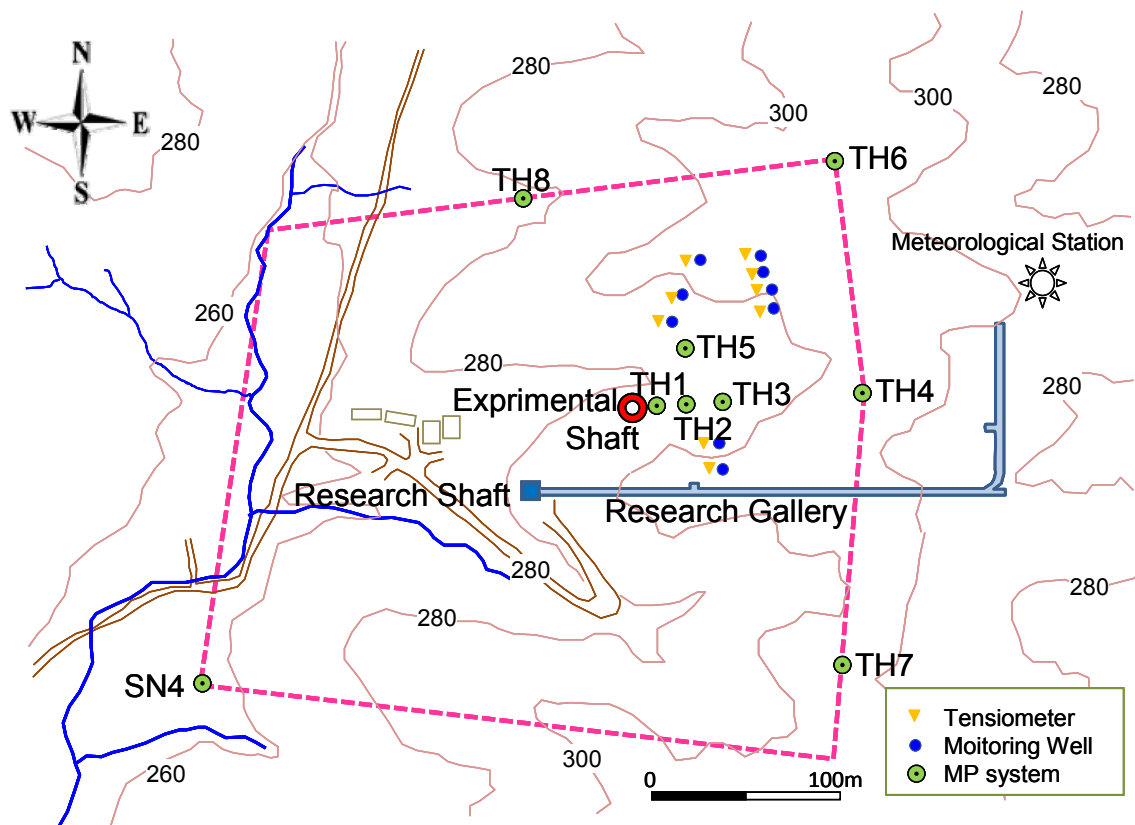


図 6-1 解析対象領域の平面図

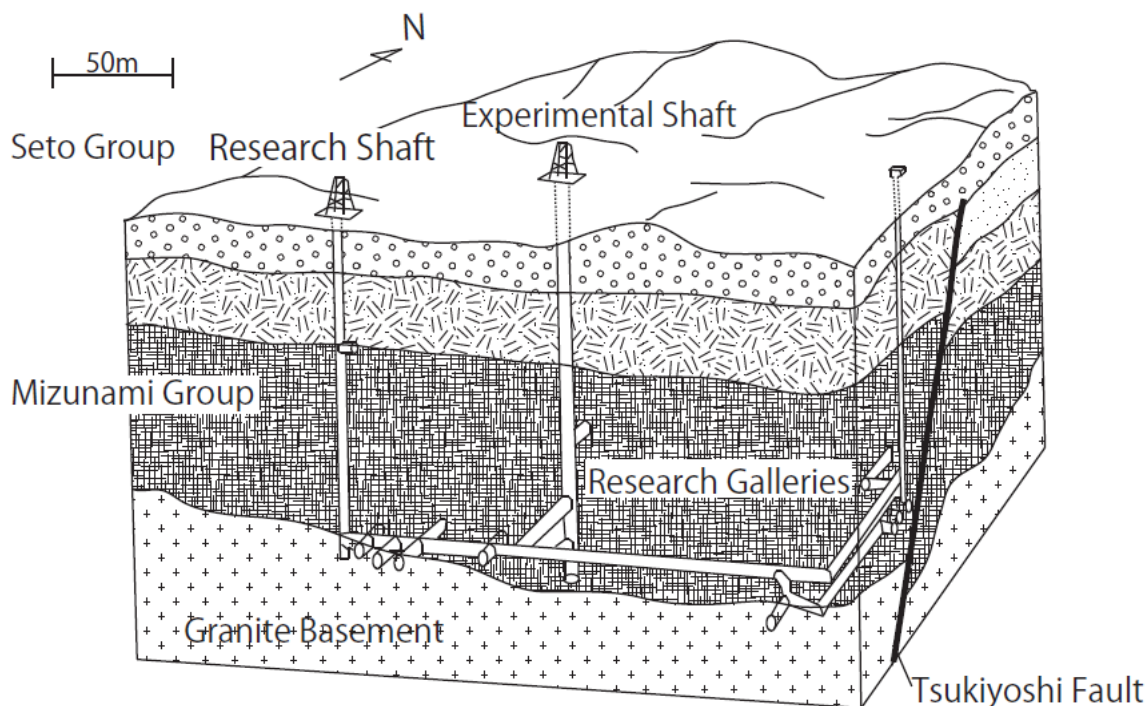


図 6-2 立坑・坑道の地下における位置関係と地質構造

6.1.2 水理地質構造の概要

本調査地域の地質（図 6-3）は、下位より花崗岩，風化花崗岩，礫岩，凝灰岩，砂岩，泥岩，未固結層からなる。花崗岩と風化花崗岩は，図 6-2 の Granite Basement，堆積岩層は瑞浪層群（Mizunami Group），未固結層は瀬戸層群（Seto Group）に相当する。

図 6-2，図 6-3 に示すように，本調査解析領域の中央部には東西系の月吉断層が発達している。断層は逆断層であり，花崗岩から泥岩までの地層を切っており，未固結層は切っていない。断層の走行傾斜は $N80^{\circ} E60^{\circ} S$ であり，落差はおよそ 30m である。

断層の北側と南側では分布する地層が異なる。北側には，下位より花崗岩，風化花崗岩，礫岩，凝灰岩，砂岩，泥岩，泥岩，未固結層の 7 層が分布する。南側には，未固結層の直下に分布する泥岩を除く 6 層の地層が分布する。

風化花崗岩とその上部の礫岩との間の不整合面は，本調査地域のほぼ中央部において最も低く，調査地域の北側および南側の協会に近くなるにつれ従い高くなっている。凝灰岩および砂岩・泥岩，泥岩は水平に堆積している。未固結層とその下位層との間の不整合面は水平である。

本調査解析領域の水理学的特性（透水係数分布特性）について，電気検層，岩芯観測等による岩相の垂直方向の堆積学的層相変化（粒度・固結度・分級度等の変化）の関連について検討し，その結果として，水理地質定特徴は以下のように要約される。

- ・ 花崗岩は，およそ透水係数 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ と低い透水性を示す。
- ・ 風化花崗岩は，水理地質学的には 2 層に分類される。下部層は透水係数 $5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ であり，上層部は断層の北側全体及び南側の断層付傍に分布して，透水係数 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ と高

い透水性を示す。

- ・ 礫岩は、断層の北側では風化花崗岩の上層部と同様に透水係数 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ と高い透水性を示す。南側では透水係数 $5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ とやや高い透水性を示す。
- ・ 凝灰岩は、透水係数 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ とやや低い透水性を示す。
- ・ 砂岩・泥岩は、断層の北側では透水係数 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ とやや低い透水性を示す。南側では、透水係数 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ と低い透水性を示す。
- ・ 泥岩は、透水係数 $5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ の透水性を示す。
- ・ 未固結層は、水理地質学的には 2 層に区分できる。下部層は瀬戸層群に相当し、透水係数 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ とやや高い透水性を示す。上層部は表土層に相当し、透水係数 $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ と高い透水性を示す。
- ・ 断層は、逆断層であること、断層年度を伴うこと、既存坑道からの試錐孔における間隙水圧が断層下盤と上盤とで 10m 以上異なることから難透水性であると考え、透水係数を周辺岩盤より低い $1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ と設定した。

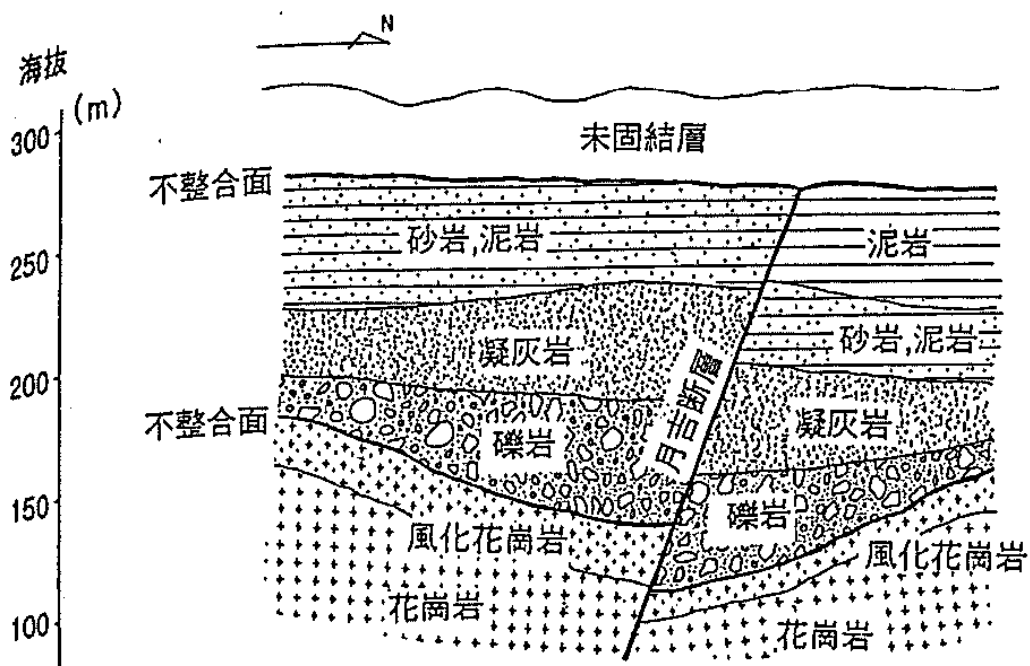
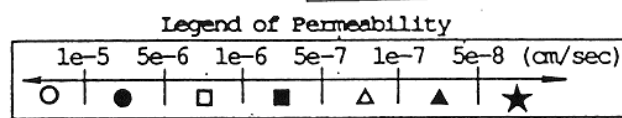
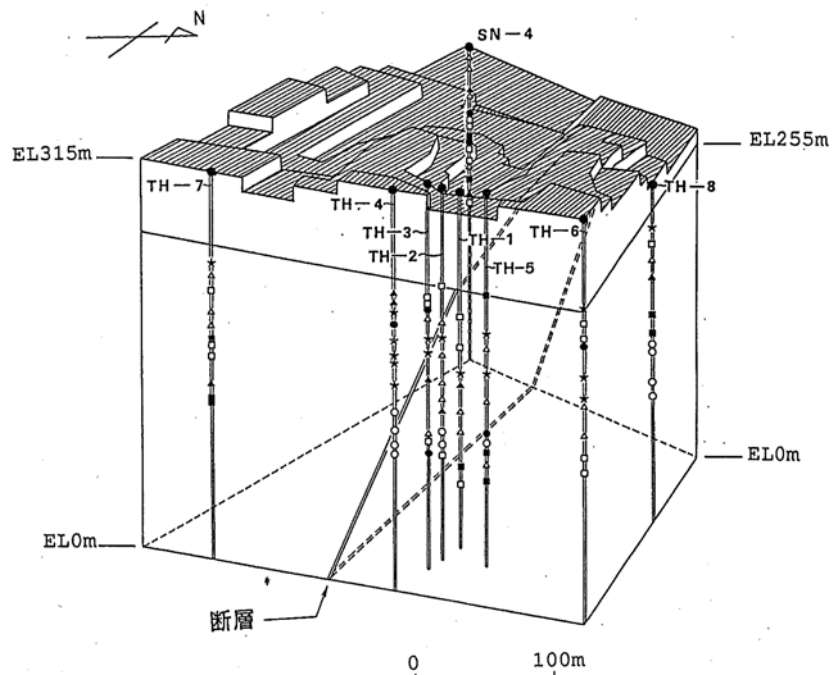


図 6-3 地質構造断面図

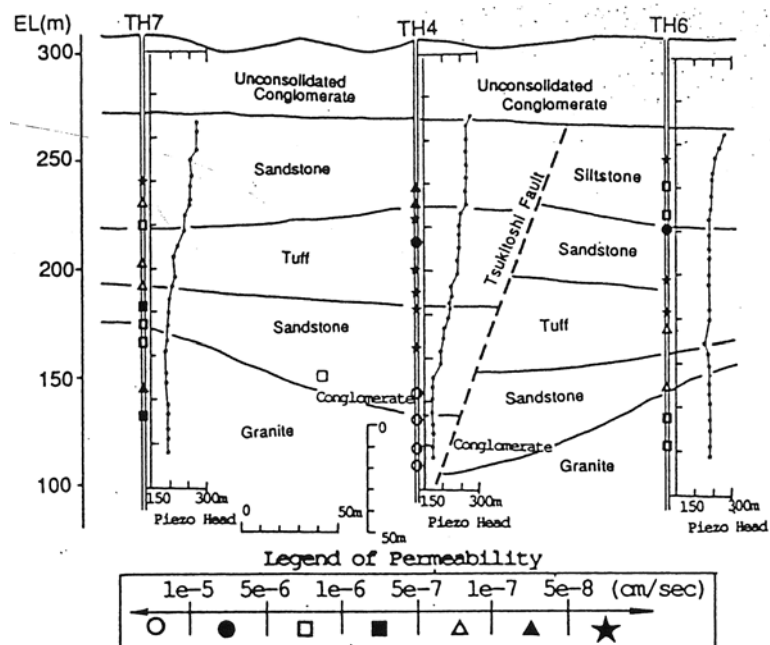
図 6-4(a)には本領域におけるボーリング孔、断層の地下における状況を鳥瞰図的に示している。ボーリング孔に沿って測定された透水係数の大きさを、 $5 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ より小さいものから $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ を超えるものまで凡例に示す 7 区分で示している。断層は 1 枚の平面形状を仮定してその想定位置を示している。図で示されるように、この断層は解析領域ほぼ中央に位置している。

図 6-4(b)には図 6-3 の地質区分の断面にてボーリング孔内での透水係数、全水頭分布を合わせて示している。透水係数は基盤花崗岩上部およびその上を不整合面を介して堆積している礫層部

で大きな値を示す。



(a) 3次元的なボーリング孔と断層の位置関係



(b) 領域東側における地質構造と係数，全水頭分布

図 6-4 ボーリング孔内での透水係数，全水頭分布と地質構造

6.1.3 モデル化

(1) 解析領域の設定

解析領域は、図 6-1 に示す実線で囲まれた約 300m 四方の調査区域とほぼ等しい範囲を設定した。この領域境界は、ボーリング孔 TH4,6~8,SN4 を含み、尾根線および谷線上に設定している。上田ら（1971）は円形暗渠の取水量に関して、地表面と下部不透水境界の異境のない深さとして暗渠深さの 2 倍以上としており、今回の解析領域の深さの設定は試験立坑深さの約 2 倍の標高 0m までとした。

(2) 要素分割

要素分割は地形形状、水理地質構造および透水係数分布、既存の調査立坑・坑道の位置・形状、試験立坑の位置・形状、MP システムによる間隙水圧観測用ボーリング孔（TH1~8, SN4）位置などを反映させて行った。解析対象とするモデルは水平方向の 1 層が 255 要素あり、モデル全体で 15 層からなる。この解析モデルは、1 次の六面体アイソパラメトリック要素（8 節点で構成）で構成され、全要素 3,133、全節点数 3,924 である（図 6-5）。

既存坑道は 3m×3m の正方形断面としその深さは 135m、横坑の長さ 163m とし、試験立坑は実際の立坑の断面積にちかい 5m×5m の正方形断面とし、その深さを 150m（EL137m~EL287m）とした。

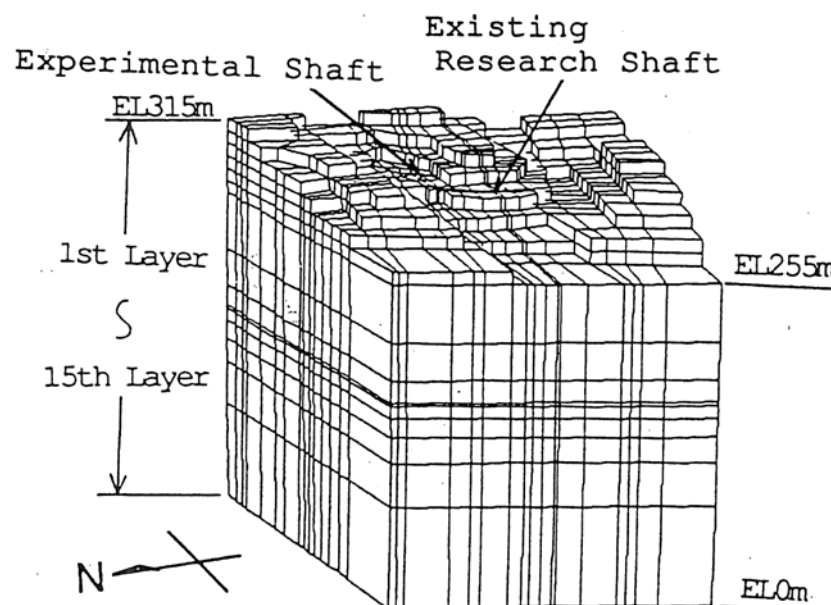


図 6-5 メッシュ分割図

(3) 水理地質構造モデル

本調査解析領域の地質調査による地質構造を基本として、水理学的特性を考慮し、図 6-6 に示す、水理地質構造モデルを構築した。本モデルでは、調査解析領域を 12 層に区分した。各層の水理定数は、表 6-1 に示す。不飽和特性に関しては、飽和土と相対透水係数・圧力水頭の関係を図

6-7 に示すように設定した。なお、有効間隙率は岩芯による物性試験に基づき設定した。比貯留係数は、DOMENICO ら（1965）を参考に未固結層と固結層という区分により設定した。

また、モデルの構築においては次の事項について留意した。

○地質構造モデルの各層は、基本的に水理地質構造モデルの各層と対応する。

○ただし、同一層内で水理学的特性が著しく異なる部分が存在する場合には、複数の層に区分する。

○地質構造モデル上異なる複数の地層でも、水理学的特性が同じ場合には、水理地質構造モデル上は1つの層とする。

表 6-1 水理地質区分に設定したパラメータ

区分名	透水係数 [m/s]		間隙率 [-]	比貯留係数[s ⁻¹]	地質
	case1	case2			
mat 1	1×10^{-9}	←	0.02	1×10^{-4}	花崗岩
mat 2	5×10^{-9}	←	0.1	1×10^{-4}	風化花崗岩
mat 3	1×10^{-8}	5×10^{-9}	0.3	1×10^{-4}	風化花崗岩・礫岩
mat 4	1×10^{-7}	←	0.3	1×10^{-4}	砂岩
mat 5	5×10^{-8}	$2,5 \times 10^{-8}$	0.3	1×10^{-4}	砂岩
mat 6	1×10^{-8}	←	0.3	1×10^{-4}	砂岩・凝灰岩
mat 7	1×10^{-8}	←	0.4	1×10^{-4}	凝灰岩
mat 8	5×10^{-8}	$2,5 \times 10^{-8}$	0.4	1×10^{-4}	砂岩・泥岩
mat 9	1×10^{-9}	←	0.4	1×10^{-4}	砂岩
mat 10	1×10^{-7}	5×10^{-8}	0.4	1×10^{-4}	未固結層（瀬戸層）
mat 11	1×10^{-6}	5×10^{-7}	0.5	1×10^{-3}	表土
mat 12	1×10^{-10}	←	0.3	1×10^{-4}	粘土を含む断層

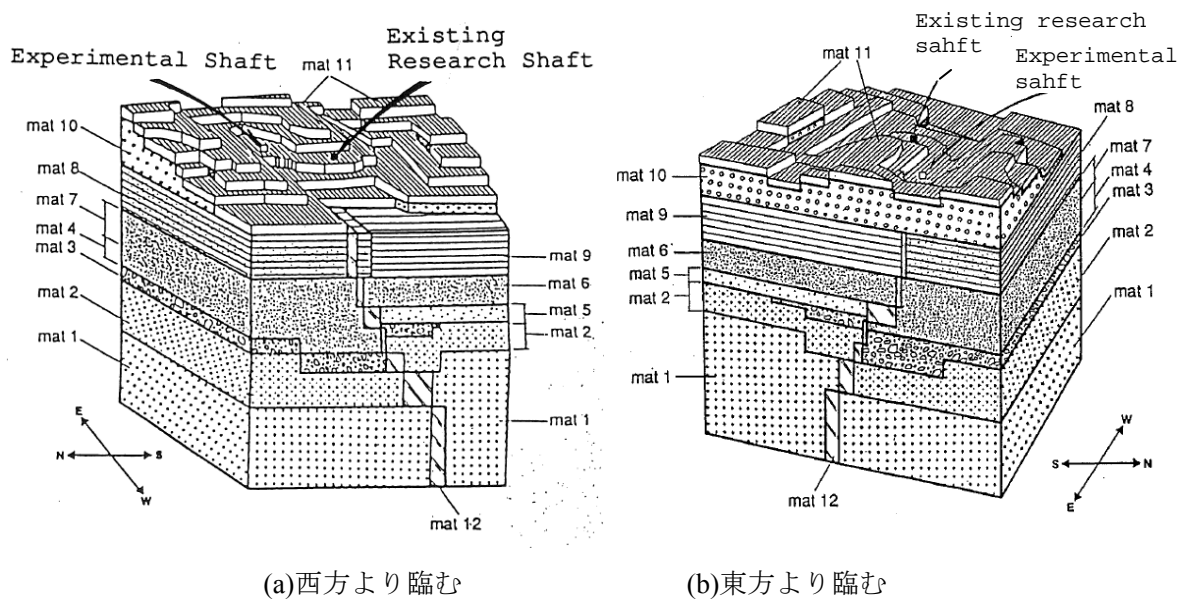


図 6-6 設定した不飽和浸透特性

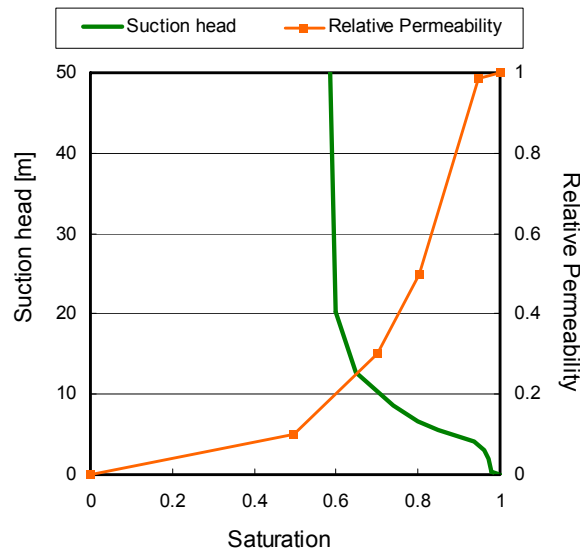


図 6-7 水理地質構造モデル

(4) 境界条件

設定した境界条件の概要を図 6-8 に示す。

上部境界条件は、1 年間にわたる河川流量観測，気象観測（降水量，蒸発量，風速など）からなる表層水理観測結果より水収支計算を実施し，この計算から得られた涵養量を参考に涵養量 0.5mm/day を設定した。また，モデル表面には自由浸出条件も設定し，谷部やモデルにて地表形状を示す階段状の付け根の凹部など，地下水面が表出し飽和となる部分では流出となる。

下部境界条件は流出入のない不透水境界条件とし，既存坑道による内部境界条件は自由浸出面条件とした。

側方境界条件は，側部境界上に存在するボーリング孔 TH4,6～8，SN4 で事前計測された深度方向の間隙水圧および地下水位観測データに基づき，ボーリング孔においては図 6-9 に示すように全水頭分布を設定し，これらボーリング孔における全水位分布を既知の水位固定境界条件として，側部鉛直断面での定常解析を実施，この結果による全水頭分布を側方水位固定境界条件とした。これら計測孔間の境界条件は，計測孔の設定した境界条件に基づき事前解析や境界条件を設定された計測孔間での線形補間により設定した。

(5) 初期条件

初期条件は，上記境界条件において既存坑道（既存立坑・横坑）のみを考慮した試験立坑掘削前の状態で定常解析を実施し，その解析結果を採用した。定常解析では不飽和特性の非線形に関する収束誤差を 1cm 以内として解析を実施した。

水収支に関しては図 6-10 に示す。初期条件の妥当性は掘削前の TH1～3，TH5 における全水頭および既存坑道内湧水量の実測値と定常解析結果対比により確認した。図 6-11 に全水頭の解析結果と実測値の対比を示す。既存坑道内の解析領域範囲に相当する湧水箇所からの湧水量の実測値は約 20L/min であり，定常解析結果では約 32.5L/min となっている。

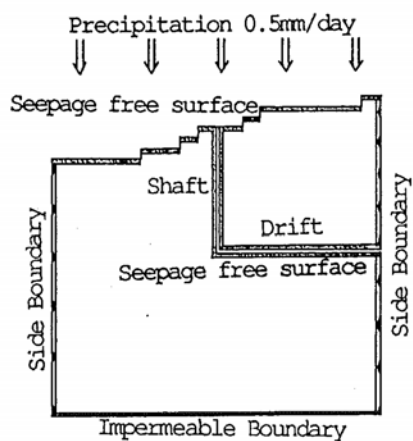


図 6-8 境界条件の概要

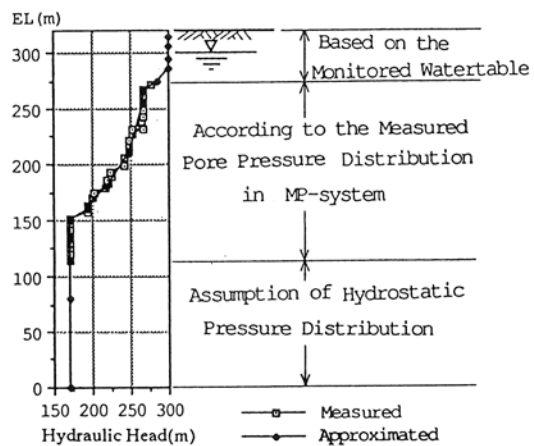


図 6-9 ボーリング孔部に設定した境界条件

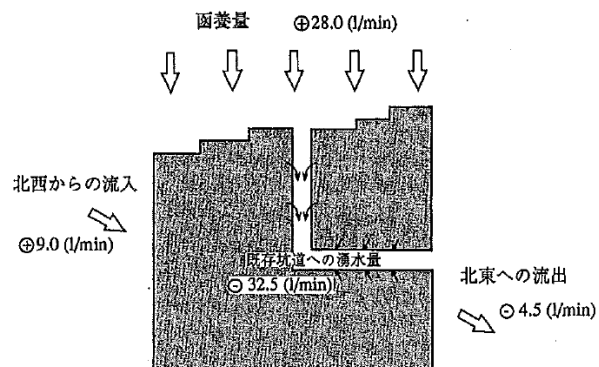


図 6-10 初期条件設定用定常解析結果からの水収支

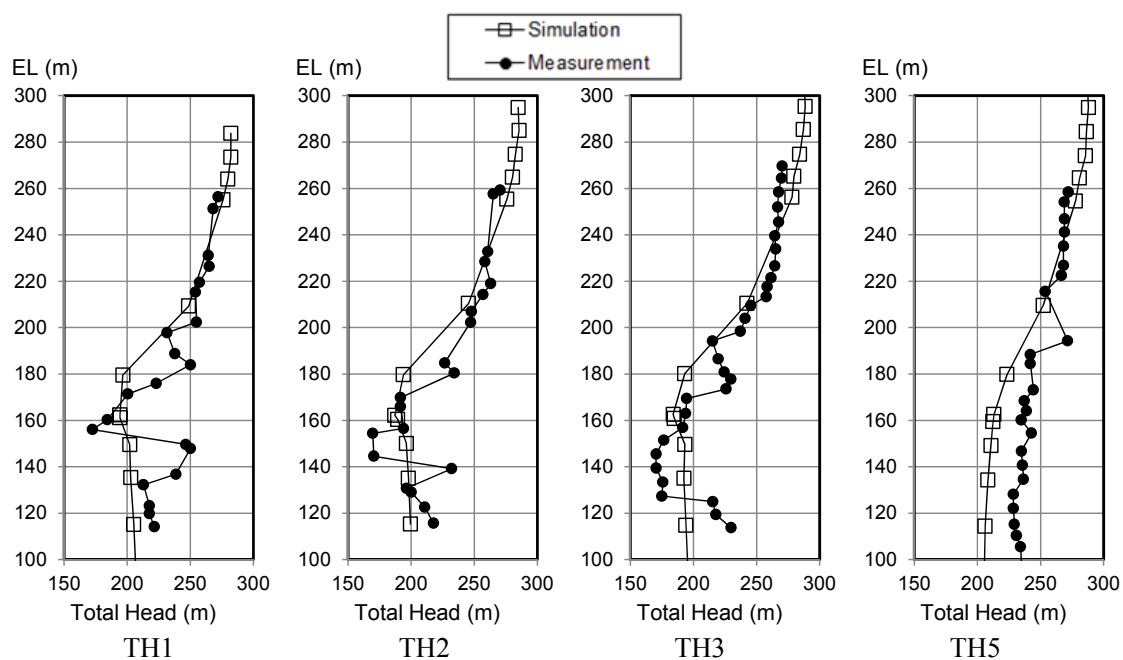


図 6-11 初期条件設定のための定常解析結果と測定値

(6) 試験立坑掘削行程のモデル化

試験立坑の掘削行程を図 6-12 に示す。掘削行程のモデル化は、掘削部に相当する要素を、掘削行程に従い（element line①～⑨）解析領域から適時除去することとした。また、掘削壁面に対しては自由浸出面の条件を与え、立坑底部に相当する節点に対しては、底部節点の全水頭値を掘削行程（excavation line）に沿うように時間とともに変化させることで掘削行程をモデル化した。解析は試験立坑掘削開始から 3 年間とした。

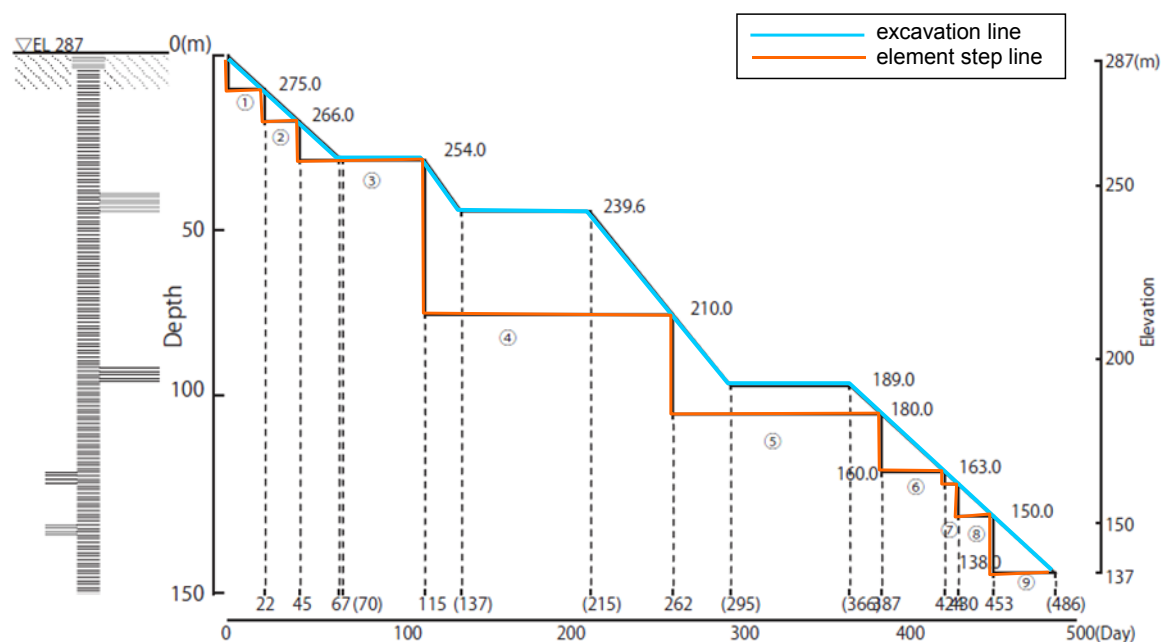


図 6-12 試験立坑形状、掘削工程と解析モデル要素分割の関係

6.1.4 解析結果

解析結果として、

- ①全体的な地下水流動傾向を示す、代表的な断面内の全水頭分布と地下水流速分布
- ②ボーリング孔内の全水頭分布の経時変化
- ③試験立坑および既存の調査立坑・坑道内への湧水量経時変化

を示す。

(1) 全水頭と地下水流速の分布

掘削終了時の地下水流動の状況として、EL135m（試験立坑部では GL-152m に相当し、試験立坑最終坑底部より-2m）における水平面の全水頭分布図と流線ベクトル分布図、試験立坑を含む東西方向鉛直断面における全水頭分布図を図 6-13 (a), (b), (c)に示す。

図 6-13 (a)(b)より、全体的には北西より南東への流れのトレンドがあり、試験立坑周辺では同心円状の分布や流速ベクトルから試験立坑部では周囲より低い全水頭となり、流れが集中している。また、立坑近傍で全水頭のコンタ線が密になっており、（動水勾配が大きく）、立坑近傍での

流速が大きくなっているのがわかる。

図 6-13 (c)は、試験立坑を含む東西鉛直断面における全水頭分布を示している。試験立坑底部では全水頭コンタ線が密になり、底部で動水勾配が大きくなり、底部への地下水流出が生じていることを示している。また、試験立坑上部では鉛直上方より立坑への流入が生じていることが全水頭のコンタ線形状から理解できる。

試験立坑を含む南北鉛直断面内での掘削直前、掘削終了時（掘削開始後 486 日）、掘削終了約 1 年半後（掘削開始後 1095 日）のピエゾ水頭コンタを図 6-14 に示す。図 6-14(b)(c)からわかるように、試験立坑掘削部は上に凸の形状を持つ全水頭分布を示している。これは同一水平面内では立坑周辺部は周辺岩盤より低い全水頭分布をしていることを示しており、周辺岩盤より試験立坑部に向かって地下水の流れが生じていることがわかる。また、試験立坑掘削開始直前と立坑掘削終了後 1 年半後の予測解析結果（図 6-14 (a),(c)）を比較すると、掘削影響の顕著な範囲は立坑より約 100m 以内であり、立坑より離れるほど掘削影響は小さくなることが予測解析結果で認められる。

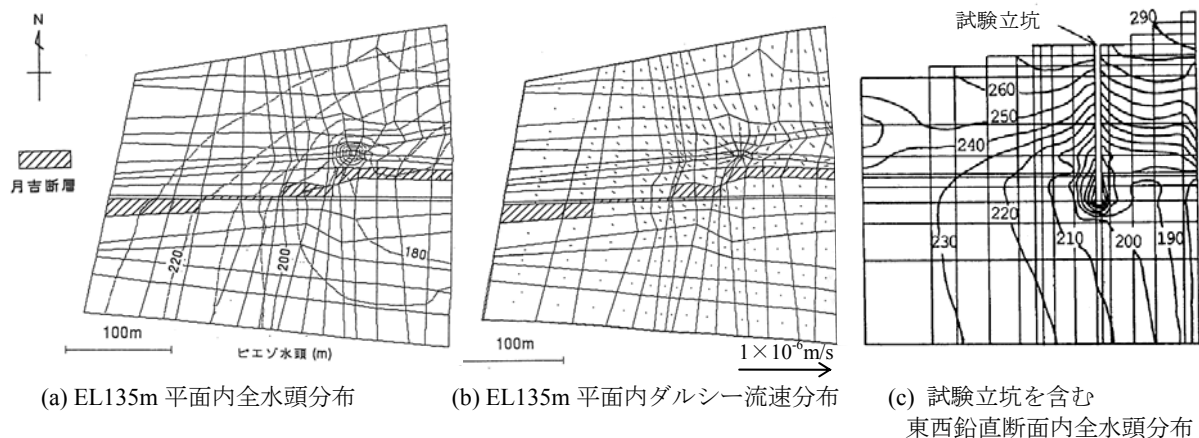


図 6-13 掘削終了時点の全水頭，ダルシー流速分布

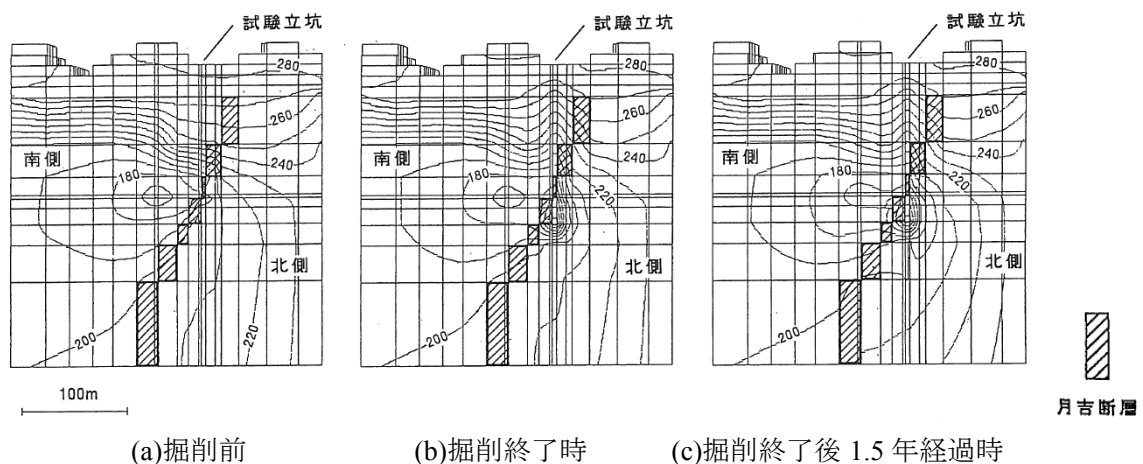


図 6-14 南北鉛直断面内全水頭分布図

(2) ボーリング孔内の全水頭分布の経時変化

ボーリング孔 TH1～3, TH5 での全水頭の深度方向の分布およびその変化予測結果を図 6-15 に示す。全水頭の予測は、掘削開始前の初期値と掘削開始後 67,137,295,486 日および掘削開始後 1095 日（3 年）経過時点である。試験立坑と TH1～3 は同一直線上にあり、TH1, 2, 3 の順で試験立坑に近い位置にある。

全水頭の低下量に着目して見ると、TH1～3 のいずれも EL135m（試験立坑部では GL-152m, 試験立坑最終坑底部より -2m）で最大の低下量を示している。TH1 では 35m, TH2 では 15m, TH3 では 5m の低下となっており、試験立坑に近いほど全水頭の低下量が大きくなっている。

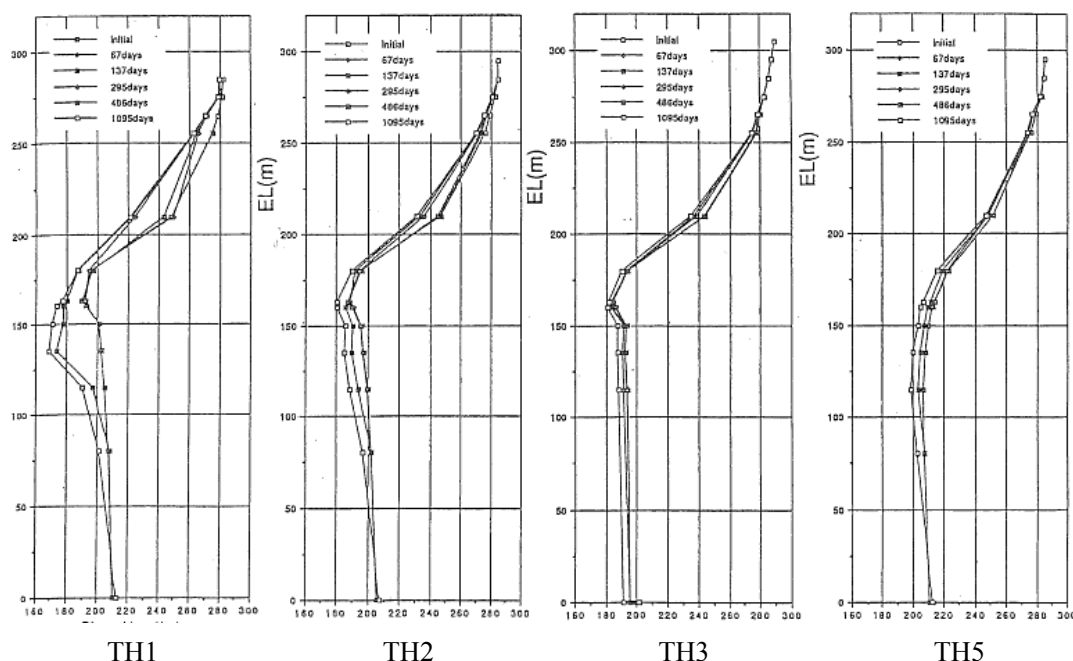


図 6-15 ボーリング孔内全水頭の深度方向分布の経時変化予測

(3) 試験立坑および既存の調査立坑・坑道内への湧水量

試験立坑内および既存坑道の生じる湧水量の非定常変化を図 6-16 に示す。ここで横軸は試験立坑掘削開始からの経過日数であり、縦軸は湧水量（ ℓ/min ）を示す。また、この図の下部に 150m 掘削する進捗状況（掘削工程）を示す。

試験立坑内への湧水量は、表層部未固結層に相当する GL-10m（EL277m）節点では掘削時は 8 ℓ/min で、その後徐々に減少し、約 200 日後には 4 ℓ/min の一定湧水量になると予想される。固結岩部 GL-20m（EL267m）、GL-30m（EL257m）、GL-75（EL212m）m における節点での湧水量は 3～5 ℓ/min で、徐々に現象し、約 100 日後には一定湧水量となる。図示していないが、固結岩部および断層部に相当する GL-105m（EL185m）から GL-135m（EL152m）の節点での湧水量は 1 ℓ/min と少ない。

立坑掘削終了時の底部に相当する GL-150m（EL137m）の節点では、比較的透水係数が高いこともあり 11 ℓ/min の湧水量が予測され、掘削終了後約 200 日後（掘削開始より約 700 日）には 10 ℓ/min で一定となる。

以上、地表 EL287m(GL0m)から試験立坑最高底部 EL137m (GL-150m) までの掘削行程に応じた総湧水量は、掘削とその休止による湧水量の増減が一部あるが、全体的には掘削に伴う増加をし、試験立坑掘削終了時点の総湧水量は最大の 30L/min となり、約 200 日後にほぼ一定湧水量は最大の 30L/min となり、約 200 日後にほぼ一定湧水量 28L/min になると予測される。

既存坑道内湧水量については、試験立坑掘削に伴う顕著な現象は認められず、長期にわたり徐徐に減少している。その減少量は試験立坑掘削前の流出量の 10%未満である。

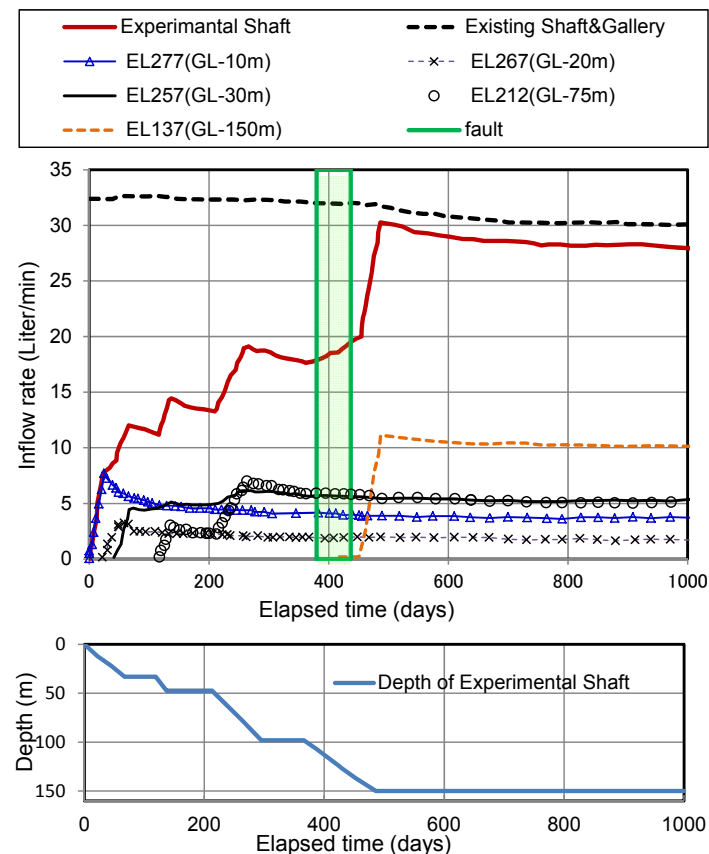


図 6-16 立坑内への湧水量の経時変化予測

6.1.5 解析と実測

試験立坑の掘削開始から掘削後まで約 1000 日間にわたり測定されたボーリング孔内で測定された間隙水圧（全水頭）および試験立坑と既存の調査立坑・坑道で測定されて湧水量と解析との比較を示す。

(1) ボーリング孔内の全水頭分布の変遷

はじめに、ボーリング孔内で測定された全水頭分布の変遷を図 6-17 に示す。ここでは、掘削前、掘削開始から 300 日経過時点、掘削終了時（掘削開始から 530 日経過時点＝掘削底部が GL-150m に到達した時点）を比較している。全体に掘削に伴い全水頭は低下している。掘削開始から 300 日経過時点と 530 日経過時点との差は大きくないが、TH1 の EL140m 付近、TH5 の EL200m 付近および EL170m 付近で全水頭の低下がやや顕著である。

図 6-18 に掘削開始から 300 日経過時点、図 6-19 に掘削開始から 530 日経過時点の全水頭分布の比較を示す。TH5 で実測値が解析結果より大きなピエゾ水頭になっている箇所があるが、両者の分布傾向は比較的良く一致している。

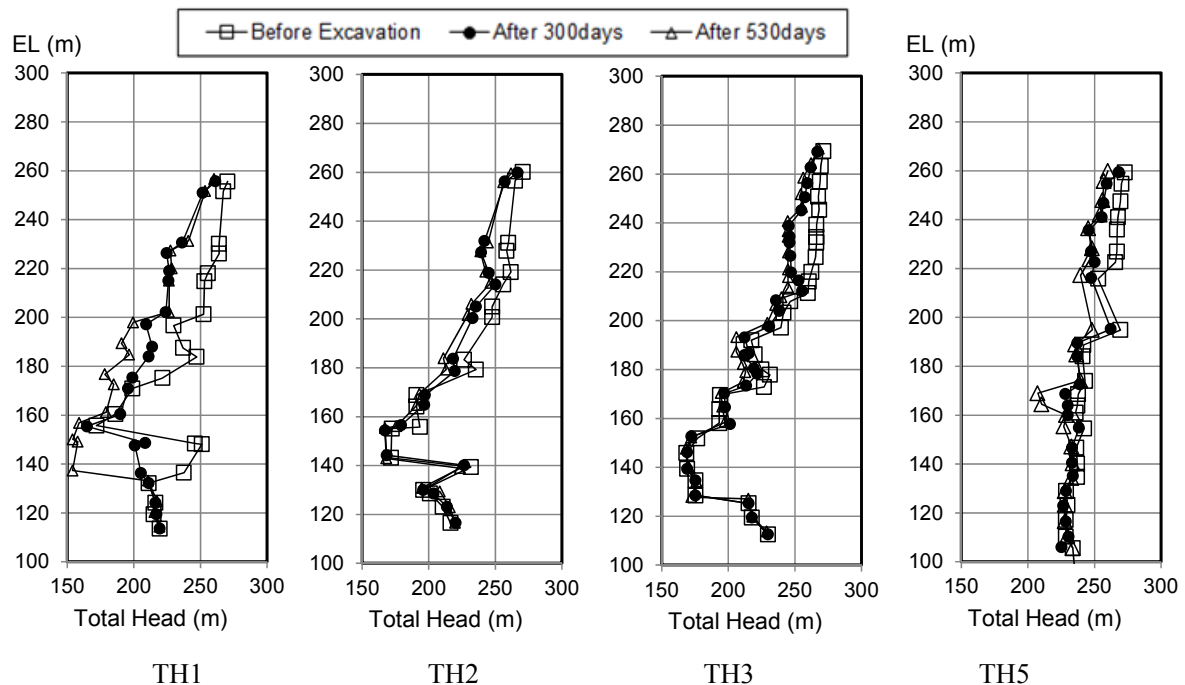


図 6-17 計測孔 TH1,2,3,5 における全水頭の掘削前と掘削後 300 日経過時点の比較

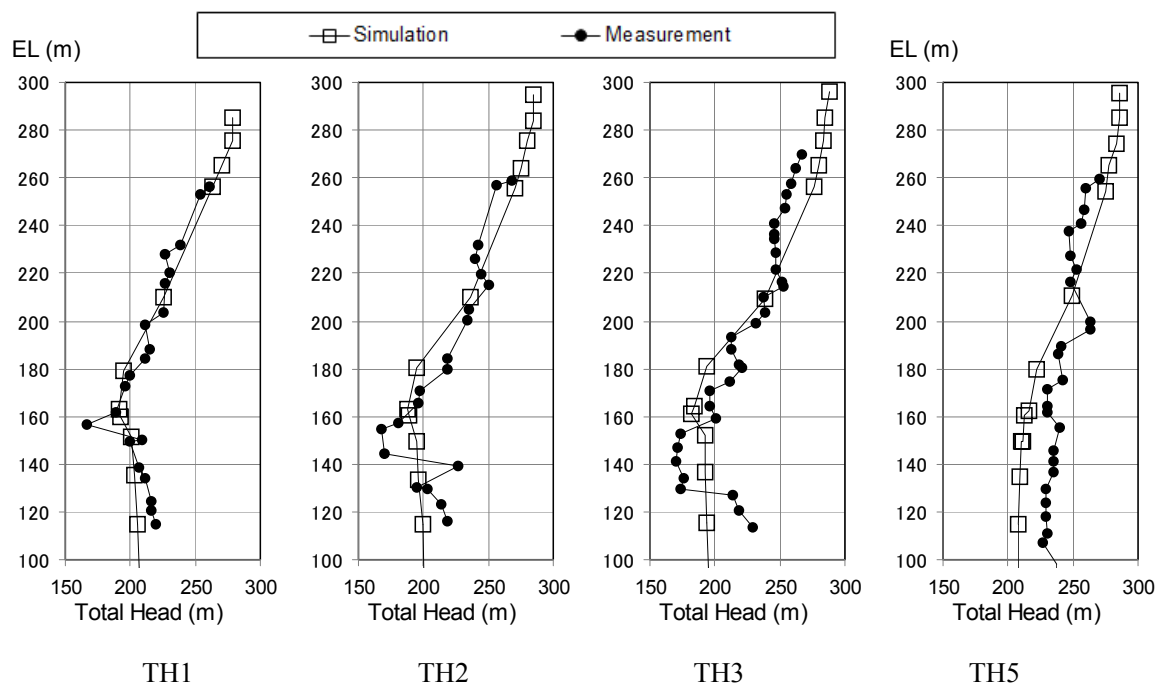


図 6-18 計測孔 TH1,2,3,5 における掘削開始後 300 日の全水頭分布の予測値と実測値の比較

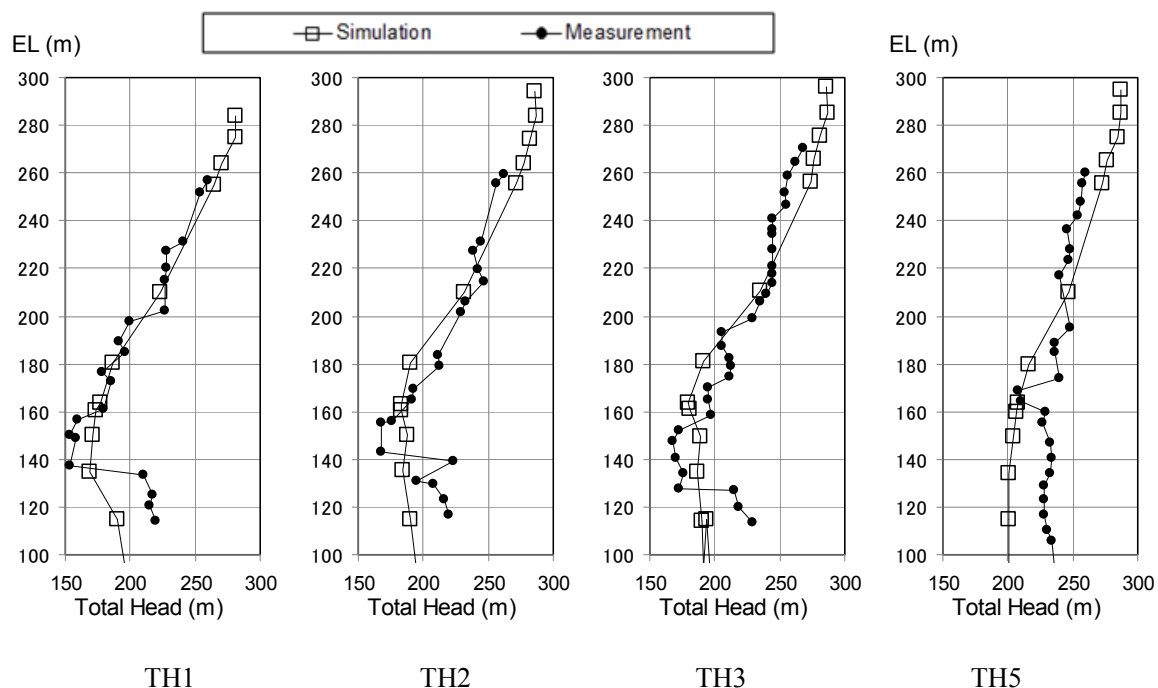
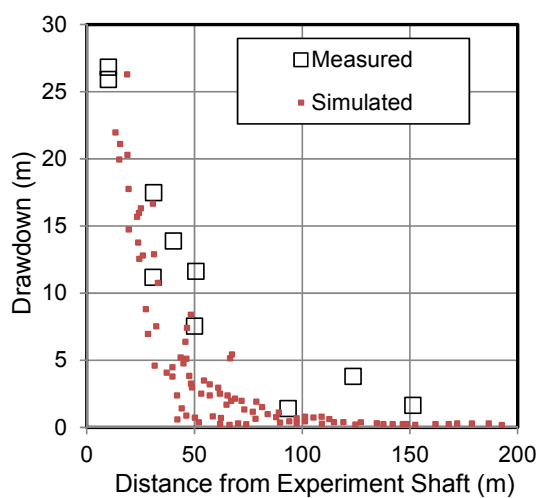


図 6-19 計測孔 TH1,2,3,5 における全水頭分布の予測値と実測値の比較
(掘削開始より 530 日後)

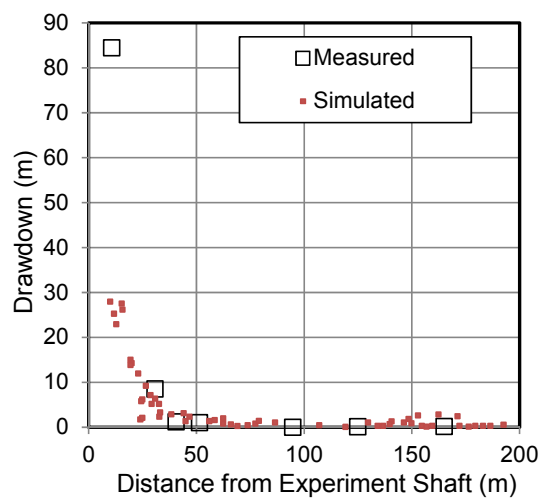
(2) 試験立坑からの距離と水頭低下量

EL210m 平面内および EL135m 平面内における解析モデル節点の試験立坑からの距離と掘削開始より 3 年後の水頭低下量の関係を図 6-20 に示す。

水頭の変化は試験立坑から離れるにつれて小さくなり、EL210m で 100m、EL135m で 50m 以上離れると水頭の変化はほとんどない。この傾向は、実測と解析結果とで同様な傾向がみられる。EL210m での実測は、試験立坑の近くで解析結果の水頭低下量よりも大きい傾向がみられる。



(a) EL210m 平面内



(b) EL135m 平面内

図 6-20 試験立坑からの距離と水頭低下量 (掘削開始より 3 年後)

(3) 代表点の全水頭の非定常変化

代表点として、水頭変化の大きい TH1 孔における EL210m, EL135m 付近の全水頭変化の実測と解析結果を比較する。図 6-21 の(a)(b)はそれぞれ、TH1 孔における EL210m, EL135m 付近の全水頭の非定常変化の実測と解析結果を比較して示している。解析では EL210m, EL135m に該当する節点が存在するが、実測では EL210m, EL135m にちょうど該当する測定データがないため、近い位置の測定値をそれぞれ 2 点示している。図中の破線は、試験立坑の掘削に伴い変化する立坑底部の位置を示している。

(a) EL210m 近傍では、試験立坑掘削に応じた全水頭の低下が実測および解析ともに同傾向で認められる。300 日以降、解析結果は実測よりも水位低下が大きな傾向がみられるが、全体により一致をしている。

(b)EL135m では、4.5m 離れた個所の実測値が異なった挙動を示している。EL136.7m の測定点では掘削に伴い掘削初期より全水頭の低下を示すが、EL132.2m では掘削に伴う水頭の変化はほとんど認められない。掘削終了時点で、この 2 点の水頭差が約 50m となっている。これら実測に対して解析結果は、掘削開始より 500 日まではほとんど水頭低下はなく、500 日頃より急激な水頭低下を示し、2 点の実測値の中間的な結果となっている。EL136.7m の実測値と解析結果は掘削終了時点付近での水位低下傾向は類似している。

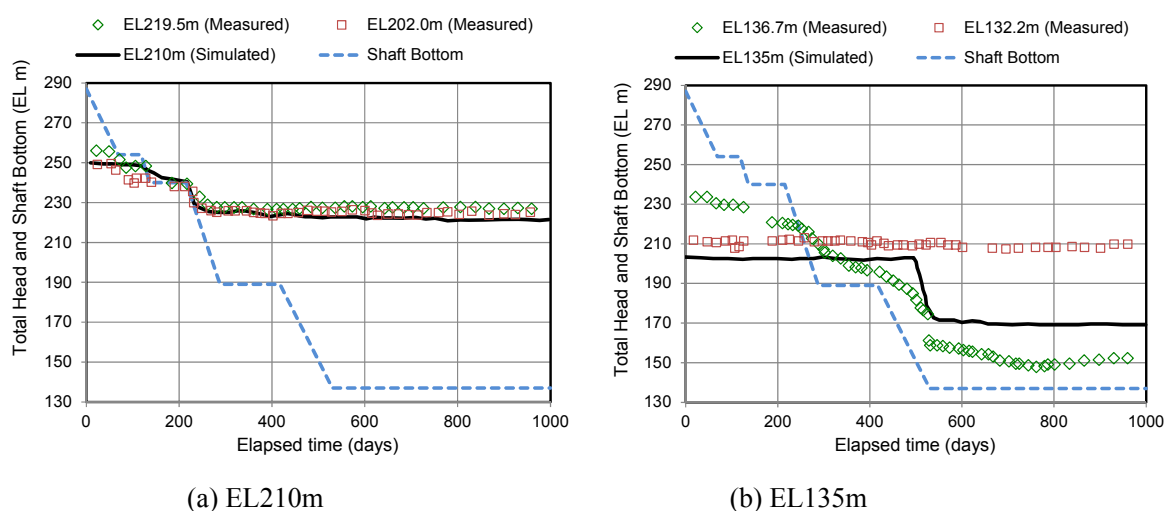


図 6-21 TH-1 孔の EL210m, EL135m における全水頭の掘削に伴う変化の解析と実測

(4) 立坑・坑道への湧水量

試験立坑、既存の調査立坑・坑道への湧水量の非定常変化を図 6-22 に示す。図 6-22 の上が湧水量、下は図 6-16 と同様に 150m 掘削する進捗状況（掘削工程）を示す。ただし、図 6-16 は掘削前段階の掘削工程、図 6-22 は実際の工事進捗からの実際の掘削工程としている。当初計画では掘削完了まで 486 日であったが、実際は 530 日を要している。

図 6-22 で示される湧水量の実測値は、工事に伴う排水等の影響を受けたデータは除き、2 週間ごとの平均値を示している。

試験立坑，既存の調査用立坑・坑道への湧水量の解析結果は，実測値の 1.5～2 倍程度となっている。試験立坑への湧水量は，解析では掘削に伴い増加し，掘削最終段階で顕著な湧水量の増加が示されている。一方，実測値では 300 日～400 日の掘削休止時に流量増加を示し，解析結果とやや傾向は異なるものの，掘削に伴う湧水量の増加傾向，最終掘削以降の低減傾向など調和的な傾向を示している。既存の調査用立坑・坑道への湧水量は降水等によると考えられる湧水量の変動は示すが，全体的に見ると湧水量は平均的にはほぼ一定であり，解析結果と調和的傾向を示している。

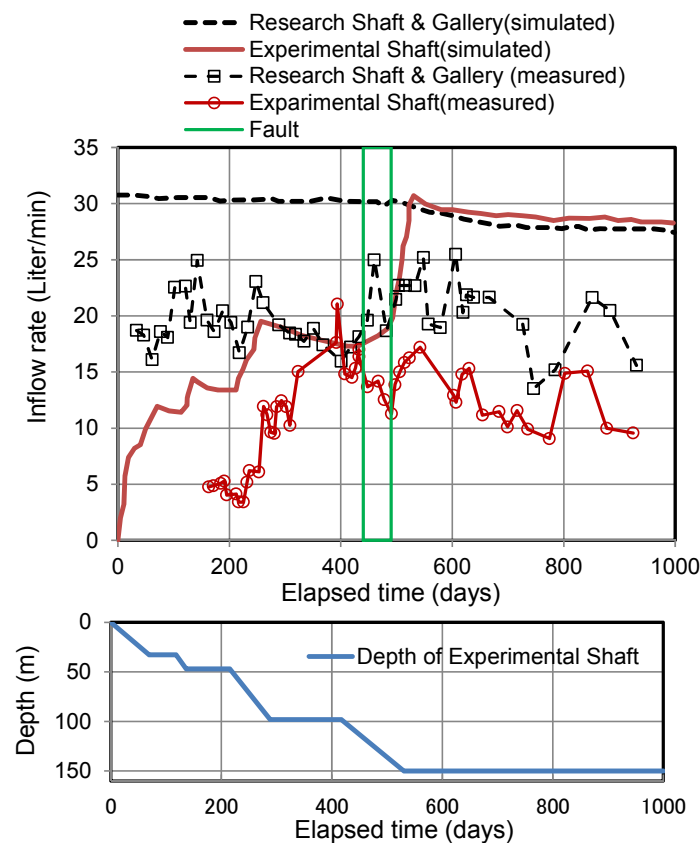


図 6-22 立坑・坑道への流入量の解析と実測の比較

(5) 立坑掘削の外周水頭への影響

今回の解析では，解析領域側部の境界条件を水位固定としている。これは，設定した解析領域境界部の水頭に対して立坑掘削の影響は無視できるという仮定に基づいている。井戸の揚水に伴う水位低下の影響範囲は，いくつかの実験式（経験式）が提唱され，その一つに Sichardt の式（土質工学会 1991）がある。これは，次式で示すように，水位低下の影響半径（ R ）は，水位低下量（ s ），透水係数（ k ，単位[m]）により算定されるものである。この式は，影響範囲は透水係数が大きいほど広がることを示している。

$$R = 3000s\sqrt{k} \quad (6-1)$$

水位低下量を 100m とし，透水係数をモデルに適用した透水係数のうち大きめの値 $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ を

適用すると、影響半径 R はおよそ 95m となり、影響範囲は広く見積もって高々 100m 程度と推定される。

図 6-23 に示す掘削前後の外周にあるボーリング孔内の全水頭分布を掘削前と掘削より 950 日経過時点での分布と比較している。TH4 の EL240m 付近で水頭の低下がわずかに認められるが、全体にはほとんど変化はなく、外周に設定した水位固定とした境界条件設定が妥当であったと考えられる。

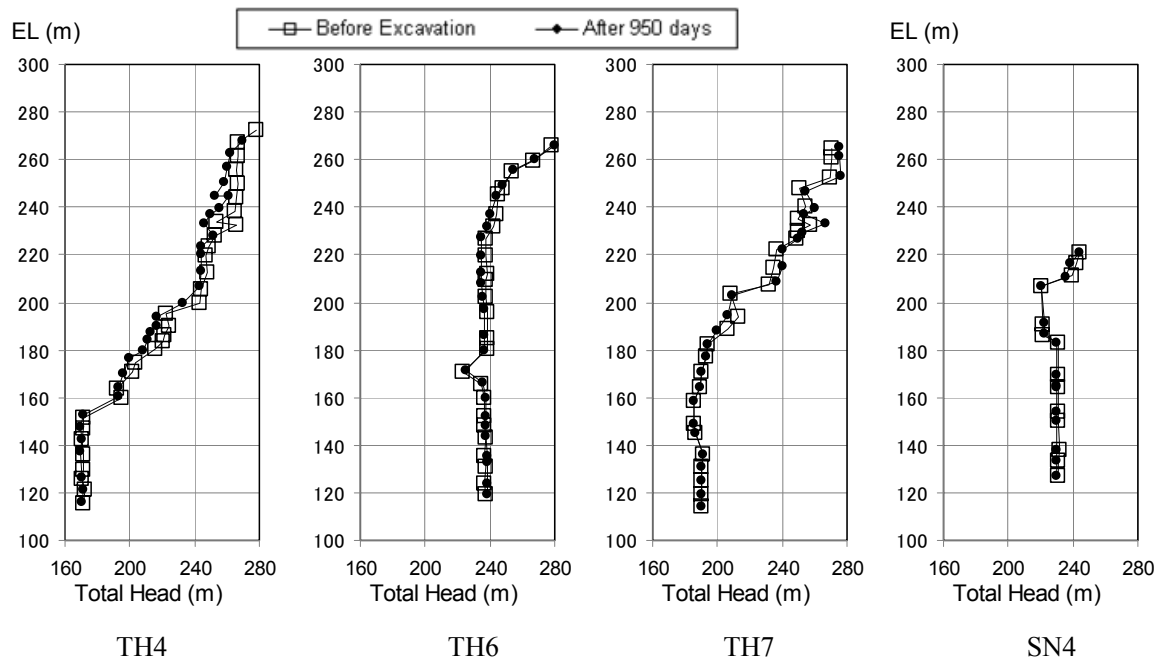


図 6-23 掘削前後の外周にあるボーリング孔内全水頭分布の比較

(6) 修正モデル

図 6-22 に示す立坑・坑道への流入量の解析と実測の比較では解析結果は実測の 1.5～2.0 倍程度と解析結果の湧水量が実測よりも大きな値を示した。両者の整合性をより高めるため、設定した透水係数の見直し、修正を行い CASE2 として計算を行った。修正は表 6-1 の透水係数においてカッコで示す湧水量の計算結果に影響の大きいと考えられる物性区分 mat5, mat8, mat10, mat11 の透水係数を当初のケース (CASE1) の 1/2 の値とした。

CASE2 の湧水量に関する解析結果を図 6-24 に示す。CASE1 に対して CASE2 では、試験立坑への湧水量はおよそ 1/2 となり、既存調査立坑・坑道への湧水量はおよそ 2/3 に低下している。湧水量の変動のために、単純な比較は難しいが、全体的傾向として湧水量の実測値と解析値は、CASE1 よりも CASE2 でより整合性の高い値となっている。

ボーリング孔 TH1, TH2, TH3, TH5 における孔内全水頭分布の CASE1 と CASE2 の比較を図 6-24 に示す。全水頭は透水係数を変化させてもそれほど変化は認められない。

以上の検討により、湧水量は透水係数設定の影響が大きく、全水頭に関しては透水係数設定の影響は湧水量のように顕著でないことが理解できる。

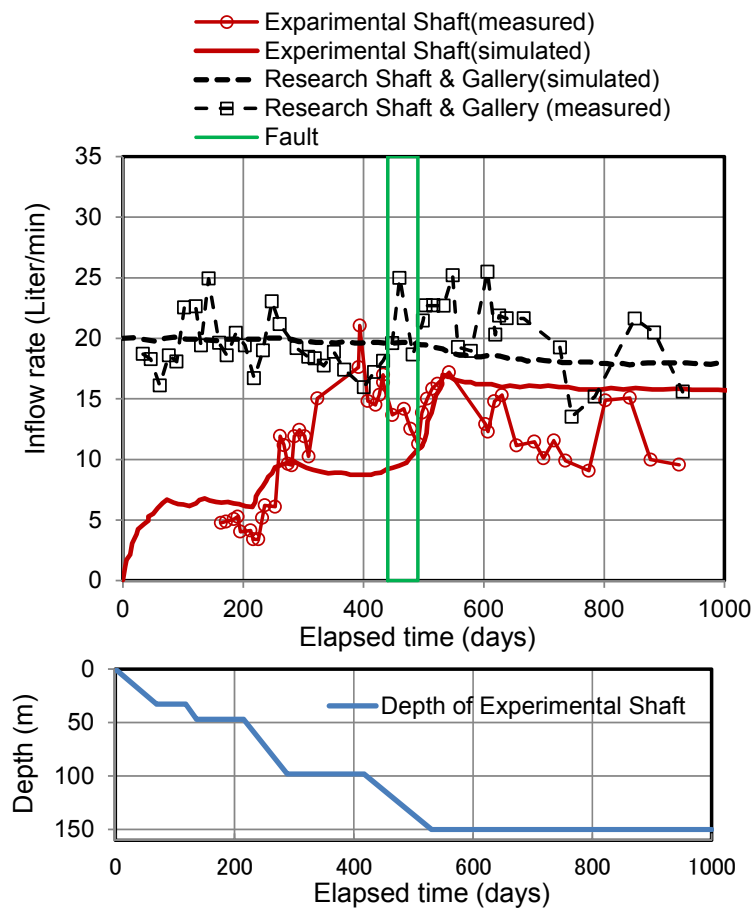


図 6-24 CASE2 における立坑・坑道への流入量の解析と実測の比較

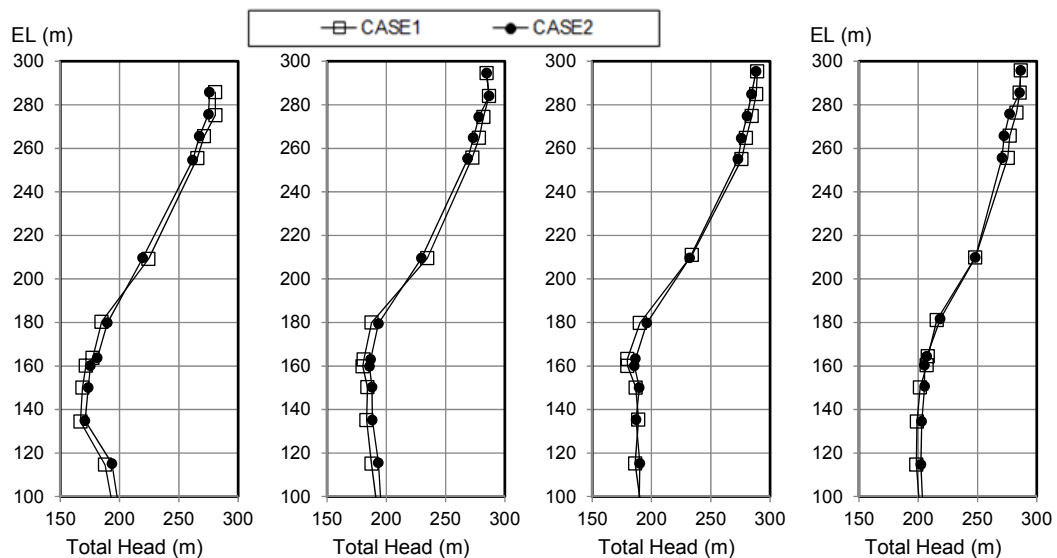


図 6-25 CASE1, CASE2 の全水頭分布の比較

6.1.6 本節のまとめ

地質構造の比較的把握されているサイトにて、ボーリング孔を利用した間隙水圧測定値と現地

透水試験結果を主に利用して水理地質構造モデルを構築し、深さ 150m の立坑を掘削する際の地下水流動への影響を評価する 3 次元浸透流解析を実施した。この結果以下の知見を得た。

- ・立坑掘削に伴う局所的な水位低下に際して、周辺の水頭変化、掘削部への湧水量について実測と解析結果を対比し、両者は完全に一致しないまでも、経時的変化傾向、空間的分布傾向に関し、対比結果が調和的であることを確認した。
- ・上記より、地質構造、ボーリング孔を利用した間隙水圧測定値と現地透水試験結果を利用した浸透流解析は、地下水流動挙動評価に有効であることが確認された。
- ・また、本解析に適用した掘削部の境界条件制御方法の妥当性も確認された。
- ・外周に水位固定条件を設定した浸透流解析においては、透水係数は立坑など掘削部への湧水量への影響は認められるが、水頭（間隙水圧）への影響は顕著でないことが確認された。
- ・4.5m程度と比較的離間の少ない 2 点間で掘削に伴う水頭挙動が大きく異なる事例を確認し、地下水挙動の局所性に関する留意が必要であることが理解された。

以上の検討より、何らかの地下水流動に対する影響に関して、ある程度の不均質性のある場で、ここで開発した地下水流動評価手法が適用できることが確認された。ただし、解析モデルに反映できない局所性に関しての留意が必要であることも確認された。

6.2 地質環境の長期的変遷を考慮した地下水流動解析方法の開発

地下深部の緩慢な地下水流動場は地形・地質や気候などの長期的変遷の影響を受けており、現在の流動場を理解するにはこれらの影響を考慮する必要があると考えられる。特に、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価では、10 万年オーダの非常に長い期間を対象にした評価が必要になることから、天然事象の長期的変遷の影響を考慮した地下水流動場の評価が望まれる。

新里ら（2007）は、北海道北部、幌延地域における古地理と構造発達史を整理し、150 万年程度の間、隆起・沈降、断層の発達などにより地形や地質構造が大きく変化（図 6-26）を示している。

このような地形や地質構造の変化の地下水流動への影響評価への取り組みとして、興田ら（2003）は、沿岸部の隆起沈降、侵食、堆積による地形変化に着目し、FEM 地下水流動モデルにて、地形変形により要素の追加・削除機能を備えた非定常解析手法を開発し、地形の変化による沿岸部の地下水特性への影響を解析している。尾上ら（2009）は、過去の地形を復元し、各時代における定常解析を行い、各時代の解析結果を俯瞰し長期的な地形の地下水流動への影響を評価する試みを行っている。しかしながら、新里らが示す、大きな地質環境の変遷を連続的に評価する段階には至っていない。以上の必要性、現状を踏まえ、幌延地域で見られるような、地形・地質構造の変化を考慮した地下水流動解析方法の研究を行った。

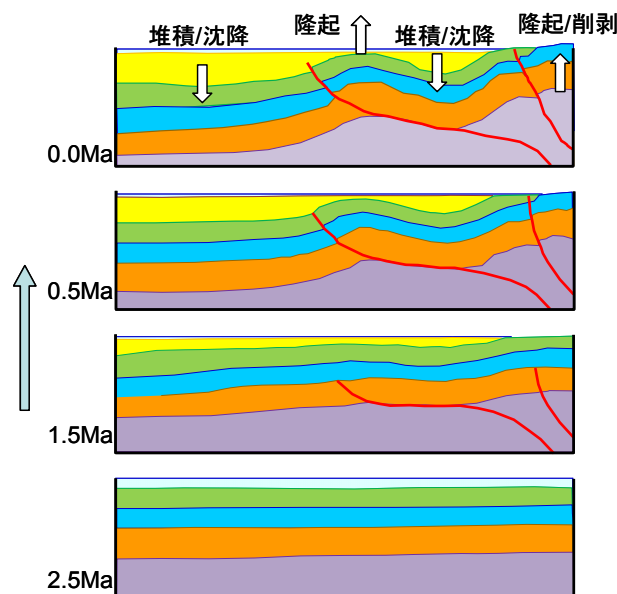


図 6-26 地形・地質構造の変遷

6.2.1 地形・地質構造の形状や物性の経時変化を連続的に解析できる手法の概要

本研究では、前述の必要性、研究開発の状況を踏まえ、幌延地域のような大きな地形・地質構造変化に対応しうる、解析方法、解析システムについて検討した。この検討において、実際に地下水解析可能な方法を考案し、実際に浸透流解析可能な解析システム「地形や地質構造の形状や物

性の経時変化を連続的に解析できる手法（SMS：Sequential Modeling System of geological evolution impact on groundwater flow）」を開発した。以下、開発したシステム SMS の概要について示す。

SMS は隆起・沈降、褶曲や断層の発達などの地形や地質構造の形状変化や透水係数などの物性の経時変化の影響を考慮して、海水準や涵養量の長期的な変遷の地下水流動への影響を評価可能とするものである。海水準や涵養量の変遷は時間と共に変化する境界条件として、地形・地質構造の形状や物性の経時変化は解析モデル（解析メッシュ形状に応じた水頭値などや物性区分）の変化としてそれぞれ考慮する。解析対象時間を有限の時間ステップに分割し、解析モデルは各ステップ間で変化するが、1 ステップ内では変化はないものとし、前ステップの最終時点の結果（圧力水頭や濃度）を後ステップの初期値として引き継いで連続的に非定常解析を実施する。

(1) モデル作成と地下水流動解析の進め方

システムの構成とそのフローを以下に示す。このシステムでは手順でモデル化、解析を進める。

- ① 解析対象となる過去から現在（あるいは未来）までの期間を複数のタイムステップに分割（図 6-27 の例では 150 万年を 10 分割）
- ② 各タイムステップの中央の年代に対応したジオモデルと称する地質構造を FEM 解析のジオメトリデータと同じ構造を有す数値モデルを作成（図 6-28 の右側 Geomodel, 図中では 1 要素を示すのみで FEM 解析モデルのようにメッシュ分割図として示していないが、実際にはメッシュ構造となっている。）
ここで、各年代のジオモデルを構成する各要素は時代間で 1:1 に対応する構造であることが必要である。
- ③ 各タイムステップ内においてジオモデル（地形・地層境界・断層位置）は変化しないとし、ジオモデルに基づく要素分割とパラメータ設定を行った上で、海水準・かん養量変動を考慮した非定常・飽和-不飽和地下水流動解析を実施
- ④ 各タイムステップ間では、前タイムステップの最終値（圧力水頭や濃度）を次タイムステップの初期値に設定
- ⑤ 初期値の設定では、図 6-26 に示す地形・地質構造の変遷に基づいて、向斜・背斜部など地質構造の特徴ごとにタイムステップ間で対応関係を設定し、対応する位置間での解析値を引き継がせる。（図 6-27 にタイムステップ間での初期値の引き継ぎを概念的に示す。）
- ⑥ 上記②～⑤を、最終のタイムステップまで繰り返す
- ⑦ 第 1 タイムステップの初期値は、計算開始時の状態における定常解析結果を適用

上記手順の③、⑦では浸透流解析を実施する。この際、使用する浸透流解析に対応した解析用入力データを作成する必要がある。以下の事例解析では地下水解析コードとして、公開コード Dtransu-3D・EL（菱谷ほか 1999）を使用し、ここでのシステムは Dtransu-3D・EL の入力データ作成用となっている。しかし、開発した SMS は地形・地質構造等の変化を考慮できる計算ロジックを示すものであり、特定の浸透流解析コードに限定するものではない。ジオモデルや初期値の設

定など、モデルのジオメトリを FEM に準じた方法を使用しているが、差分方による解析コード TOUGH2 など、バッチジョブ可能なコードであれば適用可能である。

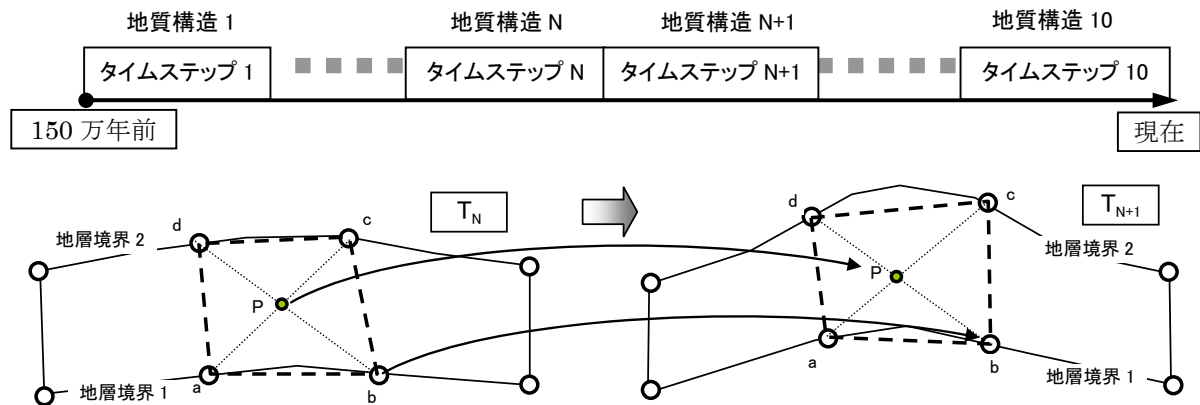


図 6-27 タイムステップ間での初期値の引き継ぎの概念図（今井ほか 2007）

（地形・地質構造を特徴づける区分 abcd を設定, 区分内の相対位置を対応させる。次タイムステップの解析モデル節点に対応する初期値を前タイムステップの区分 abcd の相対位置が同じ箇所 の値を補間計算して与える。）

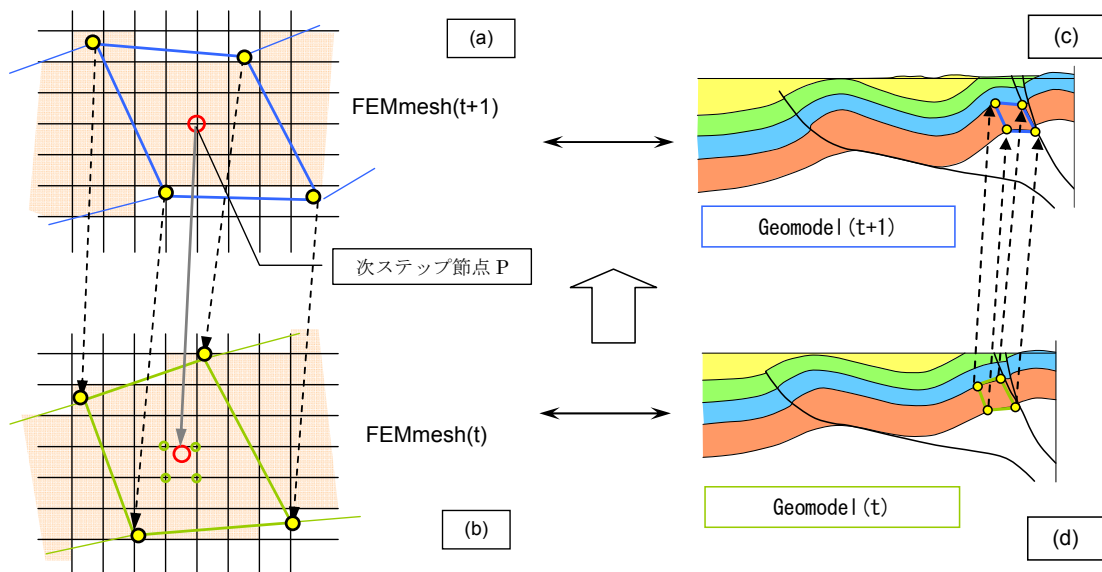


図 6-28 SMS での初期値設定のイメージ（今井ほか 2009 に加筆修正）

(2) 相対位置の対応と初期値の計算方法

SMS では、浸透流解析に適用する初期条件の各節点の値を与えるために、各節点が前ステップのジオモデルを構成する要素を特定し、また、その要素内の相対位置を同定する必要がある。該当節点の要素内外の判定、および相対位置の定義を FEM 解析で使用する 1 次のアソパラメトリック要素を使用する。この方法を 2 次元問題として以下に解説する。

任意の点 $P(x, y)$ が図 6-29 のように四角形要素内に存在する場合、通常用いられる四角形要素の形状関数では、点 P の局所座標 (ξ, η) は $-1 \leq \xi \leq 1$, $-1 \leq \eta \leq 1$ を満足する。したがって、点 P が要素内外の判定は点 P の全体座標系 (x, y) より局所座標 (ξ, η) を求め、 ξ, η の絶対値と 1 との大小比較から判断すればよい。

全体座標系 (x, y) より局所座標 (ξ, η) を求める方法を示す。図 6-29 に示すように、点 $P(x, y)$ は要素の局所座標が既知 (ξ_0, η_0) の点 (\hat{x}, \hat{y}) に対して局所座標で $(\Delta\xi, \Delta\eta)$ 、全体座標系で $(\Delta x, \Delta y)$ のずれがある。これら $(\Delta\xi, \Delta\eta)$ と $(\Delta x, \Delta y)$ は全微分の公式から以下のように関係付けられる。

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial \xi} \Delta \xi + \frac{\partial x}{\partial \eta} \Delta \eta \quad \Delta y = \frac{\partial y}{\partial \xi} \Delta \xi + \frac{\partial y}{\partial \eta} \Delta \eta \quad (6-1)$$

式(6-1)で、 $\Delta x, \Delta y$ は形状関数を $N_i(\xi, \eta)$ とすると式(6-2)で、偏微分項は式(6-3)で、与えられる。さらに、式(1)をマトリクスで表すと式(6-4)となり、未知数 $\Delta\xi, \Delta\eta$ は 2×2 の連立方程式を解いて得られる。

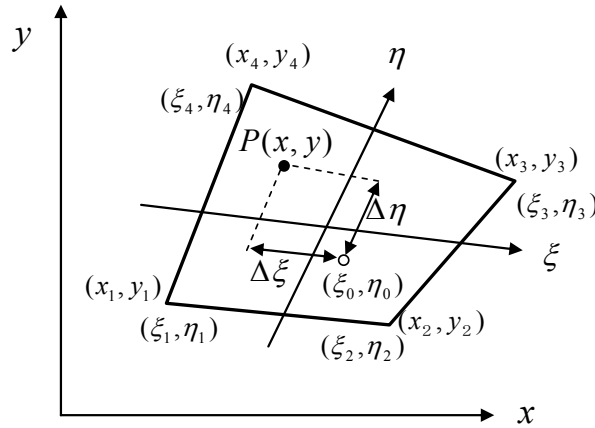


図 6-29 2 次元四辺形要素における座標系 (今井 2013)

$$\Delta x = x - \hat{x} = x - \sum_{i=1}^{n_e} N_i(\xi_0, \eta_0) x_i \quad \Delta y = y - \hat{y} = y - \sum_{i=1}^{n_e} N_i(\xi_0, \eta_0) y_i \quad (6-2)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^{n_e} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i \quad \frac{\partial x}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^{n_e} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i \quad \frac{\partial y}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^{n_e} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i \quad \frac{\partial y}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^{n_e} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i \quad (6-3)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \xi \\ \Delta \eta \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \Delta \xi \\ \Delta \eta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} \quad (6-4)$$

得られた $\Delta\xi, \Delta\eta$ より点 P の座標の近似値が式(6-5)で計算できる。上の偏微分項は (ξ_0, η_0) における値であり、 $\Delta\xi, \Delta\eta$ により算定される点 P の座標 (\hat{x}, \hat{y}) が真の点 P の座標 (x, y) と一致するとは限らない。このため、 (\hat{x}, \hat{y}) と (x, y) を比較し、その差が許容値 ε より十分小さければ得られた $(\Delta\xi, \Delta\eta)$ が既知の点 (ξ_0, η_0) から求める局所座標への補正值となる。

$\Delta x, \Delta y > \varepsilon$ の場合は $(\xi_0 + \Delta\xi, \eta_0 + \Delta\eta)$ を次の局所座標が既知の点として、この点における偏微

分を計算し、 $\Delta x = x - \hat{x}$ 、 $\Delta y = y - \hat{y}$ として再度(6-4)式の計算を行う。この $\Delta x, \Delta y$ が許容値 ε より小さくなるまで上記計算を繰り返す。通常3,4回程度の繰り返しで収束解が得られる。

3次元の場合、2次元の式(6-4)は式(6-6)となる。式(4)、式(6)のマトリクスはFEMにて局所座標系により形状関数を用いて全体座標を近似する関係式のヤコビアンマトリクス \mathbf{J} の転置行列 \mathbf{J}^T である。

上記計算の流れを図6-30に示す。ここでは、最初に仮定する局所座標を(0,0,0)としている。

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^{n_e} N_i(\xi_0 + \Delta\xi, \eta_0 + \Delta\eta) x_i \quad \hat{y} = \sum_{i=1}^{n_e} N_i(\xi_0 + \Delta\xi, \eta_0 + \Delta\eta) y_i \quad (6-5)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial z}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \xi \\ \Delta \eta \\ \Delta \zeta \end{Bmatrix} = \mathbf{J}^T \begin{Bmatrix} \Delta \xi \\ \Delta \eta \\ \Delta \zeta \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} \Delta \xi \\ \Delta \eta \\ \Delta \zeta \end{Bmatrix} = [\mathbf{J}^T]^{-1} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{Bmatrix} \quad (6-6)$$

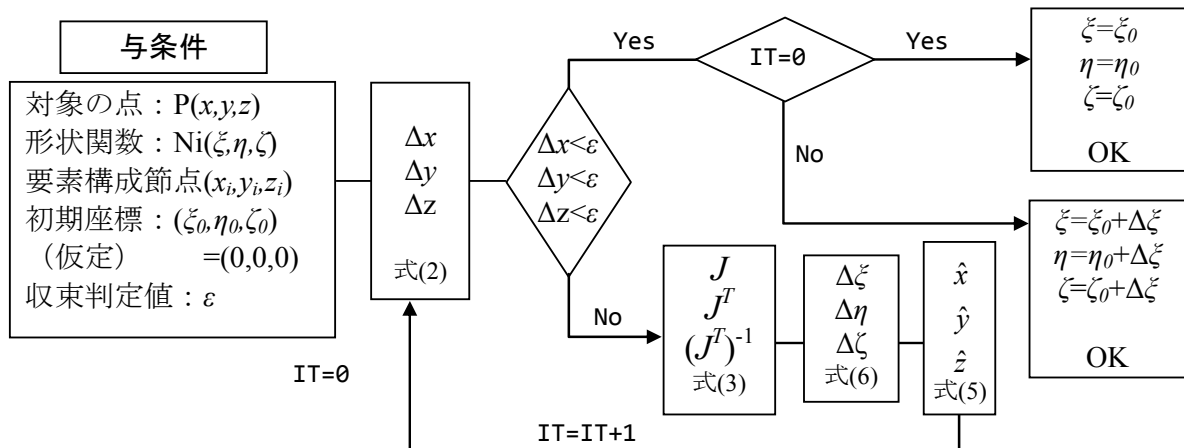


図 6-30 局所座標同定および要素内外判定のフロー

(フロー図中の変数 IT は収束計算回数) (今井 2013)

(3) 多タイムステップ対応解析システム

本解析システムは、非定常計算の計算期間を分割し、各分割区間内で解析用の水理地質構造モデルを作成し、複数の計算を実施するもので、そのシステムのイメージを図6-31に示す。この際、初期値を前ステップの計算結果をもとに設定する。

本システムでは以下のシステムコマンドを組み合わせた簡易なシステム制御プログラムが必要となる。

①子フォルダの自動作成

②子フォルダ内に設定する解析開始・終了時間設定データファイルのプログラムによる作成
 ③各子フォルダ内での解析を逐次実施させるジョブコマンド作成のプログラム化
 ④各子フォルダ内に収納された解析結果データの一元的なデータ処理プログラム作成
 このシステムでは，図中に示す“データ作成プログラム”が異なるモデル間の初期値設定などで重要な役割を果たす。

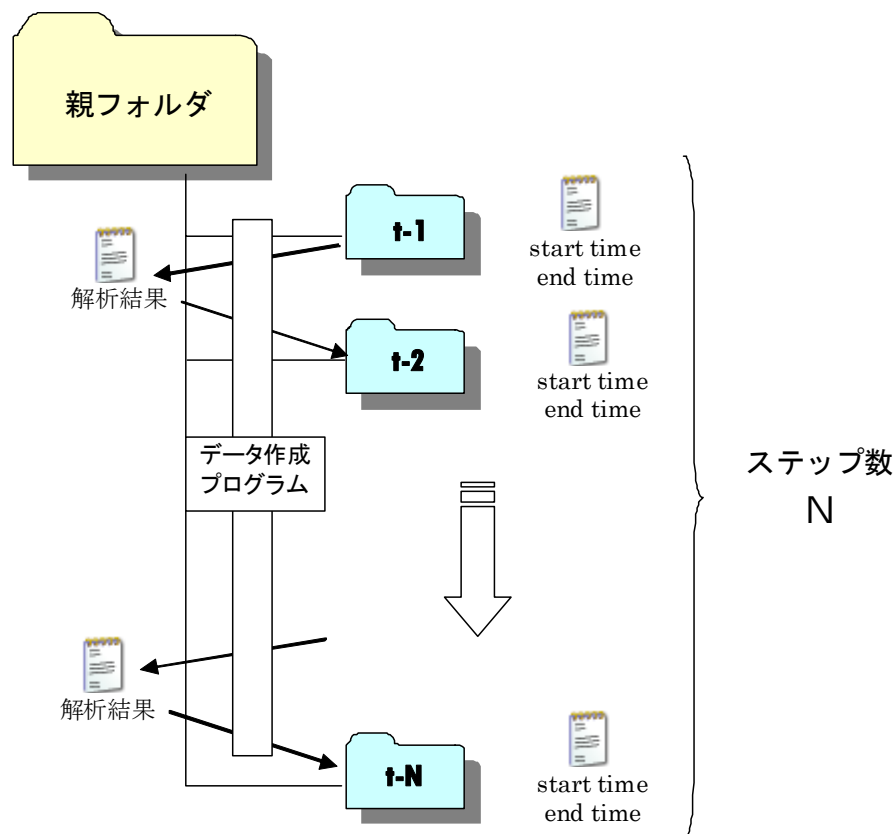


図 6-31 多タイムステップ対応解析システム

6.2.2 解析事例

解析事例として幌延地域を対象とした結果（今井ほか 2007）を示す。

(1) 解析モデル

モデルは幌延地域を対象とした，現時点の海水準において，陸部約 19km，海部約 19km の水平方向約 99km×鉛直方向約 5km の鉛直 2 次元断面のモデルである。その解析モデルを地質構造区分とともに図 6-32 に示す。

(2) 水理地質構造とパラメータ設定

このモデルの地質区分に適用したパラメータを表 6-2 に示す。表 6-2 に示されるように，No.3 稚内層，No.4 声問層，No.5 勇知層・更別層・第四系には，同表下部に示す深度に依存した透水係数分布となる設定としている。

(3) 境界条件

浸透流解析に適用した境界条件は図 6-33 に示す設定とした。その概要を以下に示す。

- ・ 底部と側部は不透水境界とした。
- ・ 海部の表面は海水準に応じた固定水位，海部以外の表面は流量固定としてかん養量推定値を設定した。時間的に変動する固定水位（海水準），かん養量は図 6-33(a)(b)に 150 万年の変動を示す。
- ・ 海水準変動は小池・町田（2001）を参考に設定した。
- ・ かん養量は，現状の値を 365mm/y として，海水準とかん養量は線形の相関性を有すると仮定し，さらに松末ほか（2000）を参考に幌延地域の凍土厚の変遷を推定して凍土が存在する場合はかん養量がほぼゼロとなるよう設定した。

地下水流動解析と平行して，洗い出しの物質移行解析を実施した。（初期条件：海水に満たされた条件，縦分散長 $\alpha_L=100\text{m}$ ，横分散長 $\alpha_T=20\text{m}$ を全領域一様に設定）

表 6-2 水理地質区分とパラメータ設定

No	地質	透水係数(m/s)	間隙率(%)	比貯留係数(1/m)
1	古第三系+白亜系	1.0E-11	20	1.0E-05
2	増幌層+鬼土別層	5.0E-10	30	1.0E-05
3	稚内層	Depth_Wk	40	1.0E-05
4	声問層	Depth_Kt	60	1.0E-05
5	勇知層・更別層・第四系	Depth_Yt	60	1.0E-05
6	断層(サロベツ，大曲，S1～S4)	1.0E-08	50	1.0E-05
7	表層（地表より10m程度）	1.0E-06	60	1.0E-05

※表中の $Depth_Yt$ ， $Depth_Kt$ ， $Depth_Wk$ は各層の深度依存性モデルを示す。
 透水係数 k (m/s)，深度 Z (m)とするとそれぞれ次式で表される。また上下限を設定した。
 $Depth_Yt : \log_{10}(k) = -0.0034Z - 8.3665$ [上限： 1×10^{-8} m/s, 下限： 1×10^{-11} m/s]
 $Depth_Kt : \log_{10}(k) = -0.0039Z - 7.5935$ [上限： 1×10^{-7} m/s, 下限： 1×10^{-11} m/s]
 $Depth_Wk : \log_{10}(k) = -0.0061Z - 5.5626$ [上限： 1×10^{-6} m/s, 下限： 1×10^{-11} m/s]

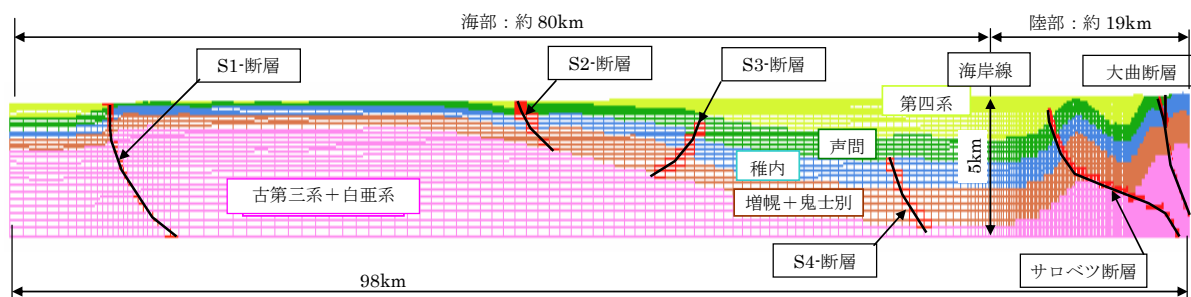


図 6-32 解析領域と解析モデルの地質構造区分（現在）

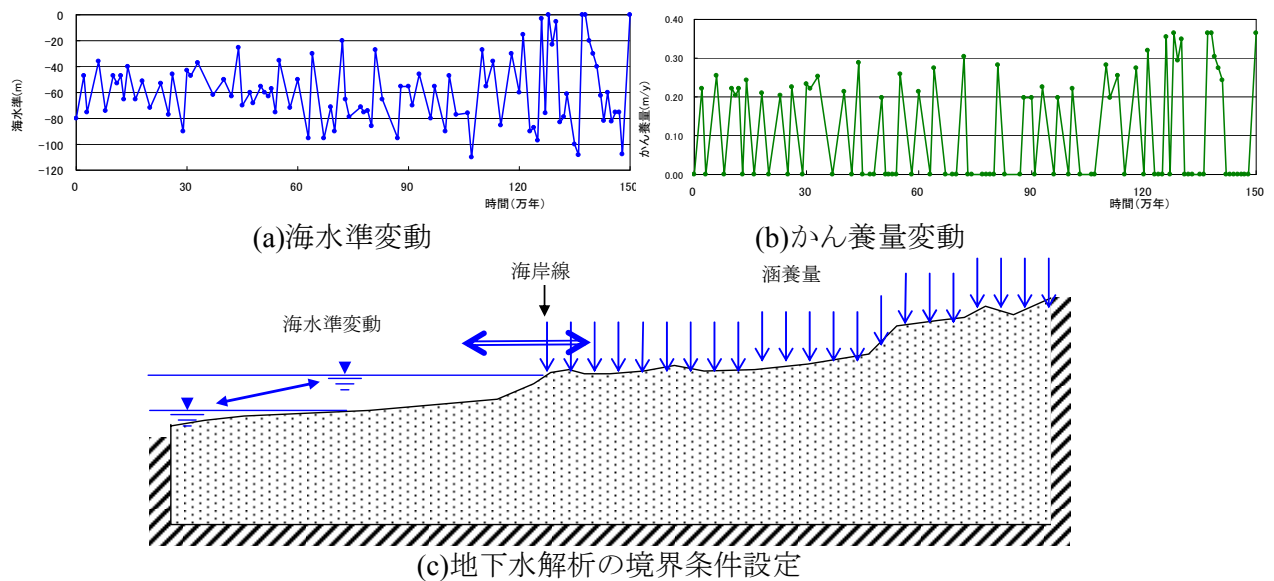


図 6-33 適用した境界条件設定

(4) 解析結果

解析は、地形・地質構造の変化、透水係数の変化の組み合わせで下記 3 ケースを実施した。

Case1：地形・地質構造の変化なし

Case2：地形・地質構造が変化

Case3：地形・地質構造が変化＋透水係数も変化する

Case1 は地形・地質構造変化のない従来型のケース、Case2 は今回適用した地形・地質構造の変化を考慮したケース、Case3 は地形・地質構造の変化に加え、地層の圧密過程で想定する透水係数の低下も考慮したケースである。透水係数の変化は勇知層、声間層、稚内層を対象にし、それに以外の地質は不変とした。透水係数の変化の設定は、150 万年前は現在の透水係数よりも 1 オーダ大きい値とし、時間経過に伴い透水係数の指数部が線形に減少し、現在の値になるという設定とした。

解析結果として、解析領域右側 40km での全水頭と塩分濃度の分布図と海域、沿岸、丘陵部での鉛直方向分布を図 6-34 と図 6-35 に示す。解析結果の概要を以下に示す。

- ・全水頭分布では、(a)海域と(b)沿岸域では地形・地質の変形を考慮した Case2, Case3 で全水頭が深部で小さくなる傾向が見られ、沈降の影響が現れたと考えられる。
- ・今回適用した地形・地質の変形を考慮した解析では地形・地質の変化するタイムステップ間で圧力水頭が引き継がれる。これに対して、沈降している次タイムステップでは沈降に伴う低い位置水頭が加算されるため全水頭は低下する。
- ・塩分濃度では、Case3 の洗い出しによる淡水化が深部まで及び透水係数の影響が確認される。Case1 と Case2 の比較では、Case2 より Case1 で淡水化部が深部まで及ぶ。これは隆起に伴い下方から塩分の高い地層が上昇する効果と考えられる。

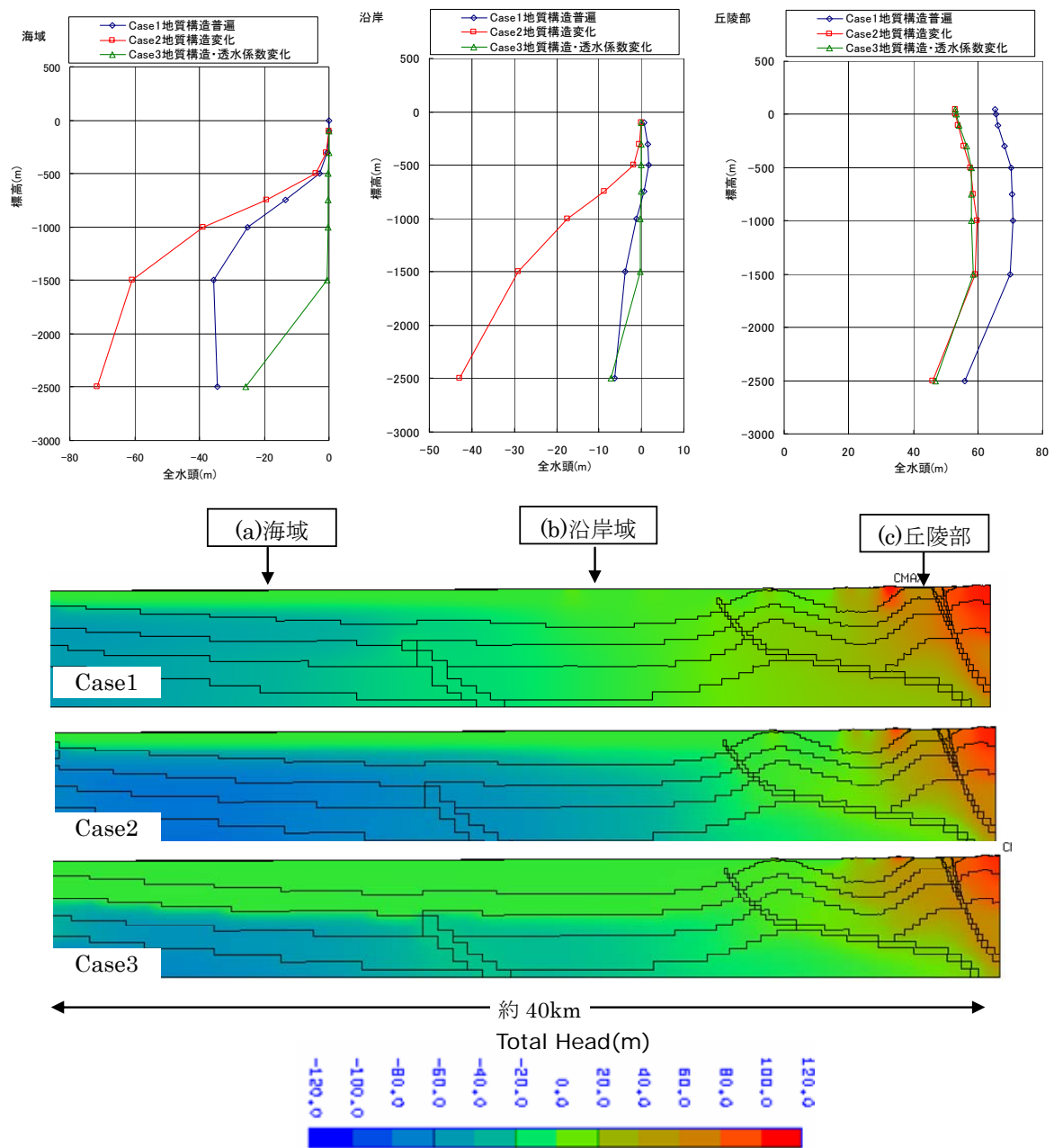


図 6-34 全水頭と濃度分布

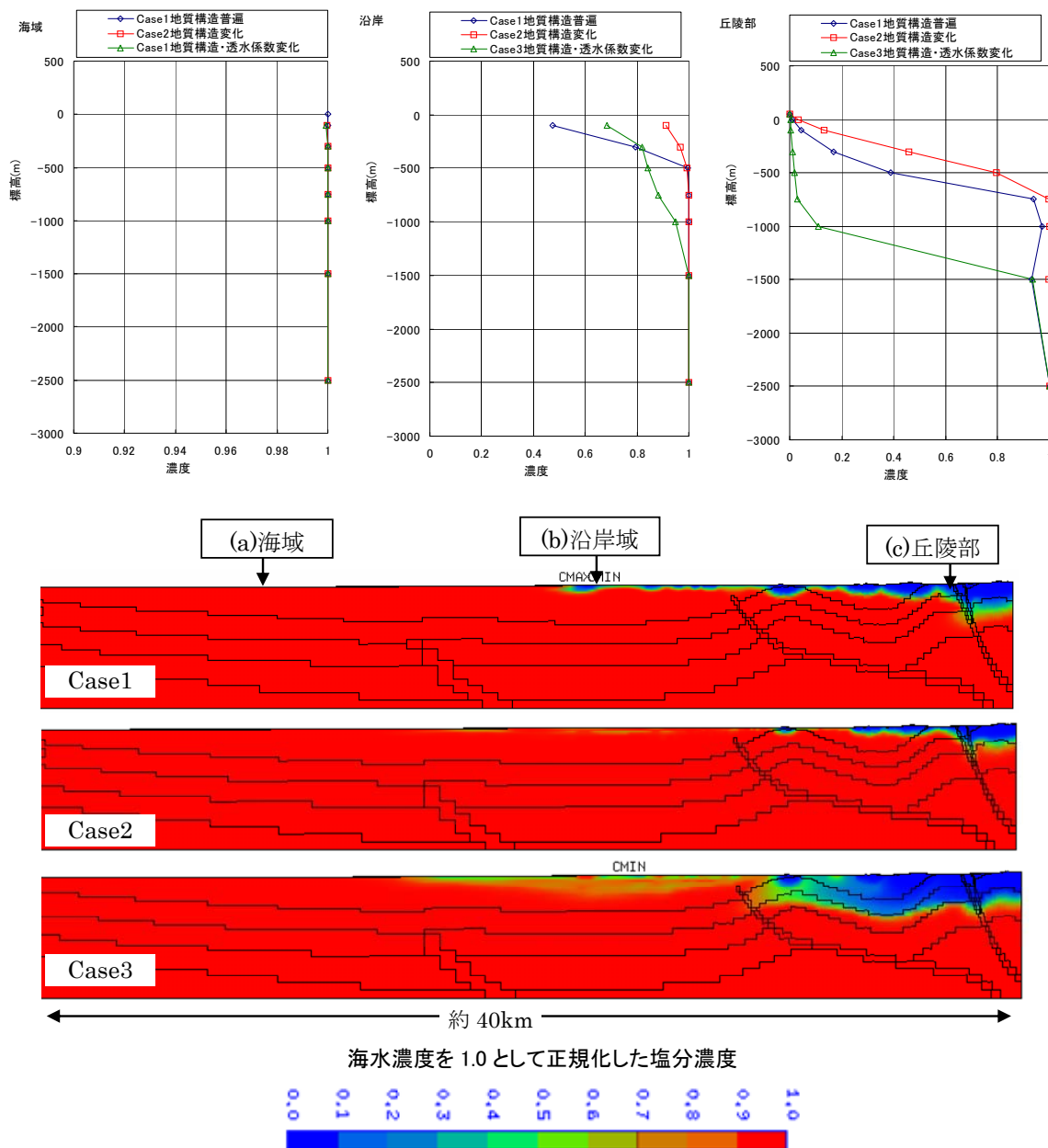


図 6-35 全水頭と濃度分布

(5) 解析事例のまとめ

隆起・沈降などによる地質構造の変化に伴う地下水流動への影響を、段階的な地質構造変化を考慮した計算手法を考案し、2次元地下水流動解析により検討した。検討は、150 万年前 (1.5Ma) から現在までの地質構造や気象条件などの変遷の影響を考慮し、①地質構造が変化しないケース、②地質構造が変化する場合、③地質構造と透水係数の両方が変化するケースの3 ケースを比較した。この結果からの知見を以下に示す。

①地質構造変化を考慮したケースの全水頭は、考慮しないケースよりも小さな値を示す傾向にある。これは、海水準変動や地層位置の変化傾向 (過去から現在へやや上昇傾向)

を反映した影響である。

- ②地質構造変化に加え透水係数の変化も考慮したケースでは塩分の希釈速度は速くなる。これは解析の初期段階では1桁大きな透水係数を設定し、それが圧密の進行により時間的に小さくなると設定していることによる影響である。
- ③地質構造変化を考慮したケースは塩分の希釈は考慮しないケースよりも遅い。これは、隆起部では下方から濃度の高い地層が上昇し、塩分の希釈部が削剥されるためと考えられる。なお、海部で沈降が生じた場合は、上面に海水があると想定していることから上方からの淡水による希釈は生じない。

6.2.3 本節のまとめ（開発したシステム SMS のまとめ）

事例解析の結果から得られる全体的な傾向から、地形・地質構造の変形による地下水流動や塩分濃度への影響を適切に評価できることが確認され、所期の目的を有す解析方法が提示できたと考える。

このシステムは、各時間断面でジオモデルと呼ぶ地形地質構造を表現する数値モデルをもとに、指定した領域、分解能で浸透流解析モデル（メッシュ）を作成することができ、解析モデル作成の自由度が高く、モデル作成時点ごとに物性値の設定が可能である。このため、続成作用による間隙率や透水係数の変化など、図 6-27 に示すタイムステップ切り替え時に逐次修正し、経時的なパラメータ変化を解析に反映が可能となる。また、隆起沈降に伴い深度に変化が生じると、上載加重の影響等を考慮した深度依存性の物性設定もタイムステップ切り替え時に反映が可能である。また、浸透流解析と平行して熱伝導や力学解析を実施することでジオモデル形状や物性値を修正するなど連成解析的な利用への展開が可能となる。

また、任意のタイムステップ設定によりメッシュ形状を変化することが可能なため、圧密問題に適用すると解析精度を上げることが可能となると考える。一例として図 6-36 のような、厚さ 10m の片面排水条件の粘土層上部に 20kN/m^2 の荷重が作用する際の層厚変化量を算定する事例を考える。仮定する粘土層の物性値を表 6-3 に示す。

対象期間を 1000 日として、この期間を五つのタイムステップに分割し、各ステップごとに沈下量を算定して層厚をアップデートするケースと、1000 日間を一つのタイムステップで算定するケースを比較する。計算結果を表 6-4 に示す。5 分割する場合の 1000 日間での沈下量は 719mm、1 分割の場合は 496mm と 5 分割する場合は 1 分割のおよそ 1.5 倍となる。この原因として、層厚変化に伴う排水距離の減少を反映する効果が挙げられる。SMS を使用し、地層圧を逐次アップデートすることで圧密効果を考慮するような問題に対してはより精度の高い解析を実現する可能性が想起される。

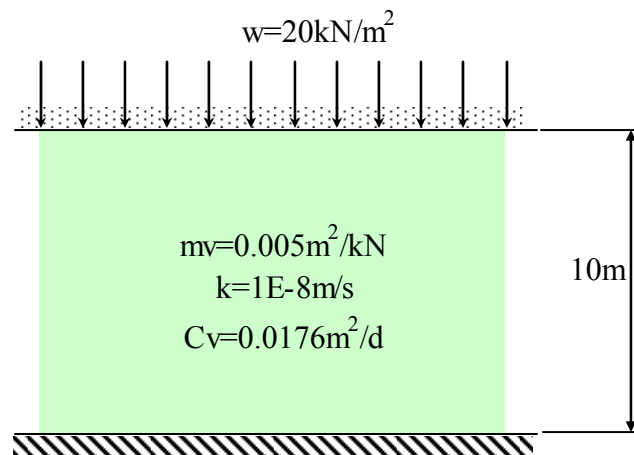


図 6-36 想定した圧密問題の概要

表 6-3 物性値

体積圧縮係数	m_v	m^2/kN	0.005
飽和透水係数	k	m/s m/d	1.00E-08 8.64E-04
水の密度	ρ_w	kg/m^3	1,000
重力加速度	g	m/s^2	9.8
圧密係数	C_v	m^2/d cm^2/min	0.0176 0.122
粘土層厚さ	H	m	10.0

表 6-4 沈下量の計算内訳

パラメータ	記号	単位	5分割					1分割
経過日数	t	d	200	200	200	200	200	1000
初期間隙圧	w	kN	20.00	15.40	11.80	9.00	6.85	20
体積圧縮係数	m_v	m^2/kN	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
圧密係数	C_v	m^2/d	0.0176	0.0176	0.0176	0.0176	0.0176	0.0176
層厚	H	m	10.000	9.770	9.594	9.460	9.358	10
時間係数	T	-	0.035	0.037	0.038	0.039	0.040	0.176
圧密度(近似)	$U(T)$	-	0.230	0.234	0.237	0.239	0.241	0.496
沈下量	dS	m	0.230	0.176	0.134	0.102	0.077	0.496
沈下後の層厚	H'	m	9.770	9.594	9.460	9.358	9.281	9.504
最終沈下量		m					0.719	0.496

6.3 第6章のまとめ

長期地質環境変遷に対応した広域地下水流動解析方法を構築するために、本章では2段階に分けて研究を行った。第一ステップとしては、2段階の研究により解析方法の開発を実施した。

第1段階として、 $300 \times 300 \times 300$ メートルスケールの領域において、立坑掘削に伴う3次元的で非定常に変化する地下水挙動の解析を実施し、対象領域の解析評価に資する調査および解析モデル構築に関わる一連の方法論に関して検討し、さらに本開発のベース技術である浸透流解析の改良とその適用による地下水流動解析を実施した。この解析では、数値解析的に安定し、立坑掘削に伴い地下水への影響をより効率的、精度よく評価できるような掘削に伴う境界条件設定方法（第3章にて提示）を適用した。解析結果と現地で計測された全水頭の分布や変化挙動、立坑内への湧水量を対比・検討した。この結果、両者は完全な一致はしないものの、分布傾向、時間的な変化挙動は調和的で、ある領域の地下水流動評価方法の適用性、妥当性を提示した。

第2段階として、地形や地質構造の変遷の地下水流動特性に与える影響を浸透流解析により評価可能なシステムについて検討し、SMSと名づけた解析システムを考案し、具体的なプログラム化を行い、幌延地域における地質環境変遷に適用した。適用試験では、地質環境変遷のない場合との比較を行い、この結果、圧力水頭の分布傾向、地下水に含まれる塩分分布の変化傾向は、設定した地質環境変遷に対応した分布・変化傾向を示し、開発したシステムの妥当性、適用可能性を確認することができた。また、本システムは前述の圧密問題をはじめ、非定常に変化する境界条件の設定ができないTOUGH2などのプログラムを使用する際の非定常な境界条件設定時、複数の機能を有するプログラムを組み合わせることで連成問題を解く場合などにも利用できる方法であると考えられる。

7. 結論

現代の多様な地下水問題に対する課題を流れ場の変化する浸透問題と捉え、以下の4課題を抽出、これらを以下の4つのテーマにとして、技術開発、研究を行った。

- ①テーマ1：地下水流動状況に応じた境界条件の変化への対応方法
- ②テーマ2：岩盤の不飽和浸透パラメータの評価方法
- ③テーマ3：掘削工事に伴う地下水影響と地盤沈下を即時に解析・評価する方法
- ④テーマ4：長期地質環境変遷を考慮する地下水流動解析方法

1) 地下水流動状況に応じた境界条件の変化への対応方法

地表の斜面においては涵養部と流出部をあらかじめ把握することは難しく、このために境界条件もある程度仮定して設定せざるを得ない。地下空洞壁面上においても蒸発量と自由浸出面の設定区分においても同様の課題がある。この課題に対し、境界面上における圧力水頭、流量を考慮した収束判定ロジックを考案し、あらかじめ水位固定と流量固定の区分設定が未確定な場合でも境界面上で地山特性を反映した連続的流量分布となる計算方法を新たに開発した。また、掘削に伴う解析モデルにおける要素や節点を除外し、境界条件対象箇所やその境界値を掘削過程の水圧変化や計算の安定性を考慮して設定可能な計算方法を考案し、その適用性を示した。

2) 岩盤の不飽和浸透パラメータの評価方法

土壌の不飽和浸透パラメータの測定実績は多いが、岩盤の不飽和浸透パラメータの測定事例は少ない。また、岩石は硬質で間隙率が緻密であり、透水性が低く、高いサクシオンを生じるため、間隙水圧の測定、不飽和透水係数測定のための微小流量測定など課題が多い。そこで岩石の不飽和浸透パラメータ測定事例を調査整理するとともに、土壌での測定方法を参考に、岩石の不飽和浸透パラメータ測定方法について実験的研究を行った。

第一ステップとして、不飽和状態を測定する方法の特性と解析により不飽和浸透特性を評価するために利用する浸透流解析の適用性を確認する目的で、非定常浸潤試験を実施した。この試験では従来実施されることのなかった、3種類の電磁波特性利用した測定とサクシオン測定ならびに浸透流解析による予測解析の相互比較を行い、各種測定と解析相互の整合性を確認、測定および解析の妥当性を検証した。

第二ステップでは、岩石として砂岩試料を用いて、サクシオンレンジの異なる、土柱法、加圧板法、サイクロメータ法、3種類のサクシオン測定を試み、連続した測定値を得て、従来に例のない広いサクシオンレンジの水分特性曲線測定法を提示した。

第三ステップとし、砂岩の柱状飽和試料を用い、1次元浸透排水条件で、定常試験および非定常試験を実施し、定常試験においては試料内の含水率分布、非定常試験においては試料内サクシオンの経時変化を対象に逆解析的に比透水係数を同定、二つの試験でほぼ同じ比透水係数を同定し、岩石の不飽和浸透パラメータの新たな測定手法を提示した。

3) 掘削工事に伴う地下水影響と地盤沈下を即時に解析・評価する方法

河口部沖積層における開削工事においては、遮水・排水工など地下水制御工法設定のための浸透流解析と、地下水対策工による周辺への沈下量影響が求められるが多い。このようなニーズに対し、地下水対策工の浸透流解析で構築した水理地質モデルと浸透流解析を利用した沈下量評価システムを新たに開発し、その適用性・有効性を現地計測結果との対比により確認した。また、水収支計算から粘性土の沈下量を評価できるという新たな解析評価手法の適用性を示した。

4) 長期地質環境変遷を考慮する地下水流動解析方法

放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体定置・埋戻し後 10 万年オーダの核種漏洩に対する評価をする必要がある。深部地下水は流動速度が遅く、地質変動の大きい我が国においては、長期の地下水流動評価には地形・地質構造の変形を考慮する必要がありその有効な評価手法は開発されていない。これに対し、地形・地質構造の変化情報から、水理地質モデルを作り、変遷する地下水流動環境を連続的に解析する手法を他に先駆けて開発した。また、この手法を仮想サイトに適用し、その計算結果が想定される間隙水圧や地下水塩分の変遷を適切に表現することを確認した。また、この手法を利用することで圧密変形など、他の問題への適応可能性や解析精度向上に寄与する可能性を示した。

以上の研究により、現代の多様な地下水問題に対する課題を流れ場の変化する浸透問題と捉え、変動する境界条件の設定ロジック、岩盤の不飽和特性評価方法、浸透流解析と連携した地盤沈下評価方法、長期地質変遷に対応する解析方法について研究し、新しい概念の解析・評価手法を開発・提示した。

さらに、上記の開発した解析方法を事例および実工事に適用することでその適用性を示し、現代の多様な地下水問題への対応方法を示し、浸透流解析の新しい適用・利用方法を示した。

謝辞

本論文は、著者が埼玉大学在学中より携わってきた地盤中の浸透事象に関する解析、室内試験、地下水の野外調査に関する研究開発のうち、浸透流解析コード開発とその適用性確認、実用的適用および浸透パラメータの測定に関する研究開発成果を取りまとめたものです。

上記研究および本論文の取りまとめに至る 30 年余りの間、埼玉大学地圏科学研究センター渡辺邦夫先生には心温かいご指導を頂きました。ここに心より感謝申し上げます。

本論文は、著者が動力炉核燃料開発事業団中部事業所（現 日本原子力研究開発機構）に出向所属した際の研究成果も含まれ、この間にご指導頂きました山川稔氏、柳澤孝一氏をはじめ、当時同じ職場にて共に研究し、ご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。また、出向から戻り現職場におきましても、杉原弘造氏、尾方伸久氏、松井裕哉氏、佐藤稔紀氏、三枝博光氏、操上広志氏、新里忠史氏、はじめ、日本原子力研究開発機構の皆様には大変お世話になりました。ここに記してお礼申し上げます。

岡山大学西垣誠先生には、浸透流解析への PCG 法の適用や岩石の不飽和特性の評価・解析方法に関しての貴重なご助言やご指導を頂きました。ここに記し感謝申し上げます。

本論文取りまとめに際しましては、埼玉大学工学部山辺正先生、同じく川本健先生および埼玉大学圏科学研究センター長田昌彦先生には論文審査の過程で親身なご指導を頂きました。ここに感謝申し上げます。

現職場（株式会社安藤・間）におきましても、技術本部長 世一英俊氏、技術副本部長 吉村和彦氏、原子力部長 雨宮清氏、原子力部山下亮氏をはじめ、技術本部の皆さまにはご指導・ご協力いただきました。土木研究部長 塩崎功氏には現地調査、室内試験などを通じ、地下水への理解をより一層深める機会を頂きました。ここに感謝申し上げます。

また、土木事業本部江口正勝氏、若山裕介氏（現 関東土木支店）には地下水対策工立案に際しての技術開発等ご支援・ご協力頂きました。そのほかにも、業務を通じ、ご指導、ご協力いただきました株式会社安藤・間および協力会社の皆さまにもご支援・ご協力頂き、感謝申し上げます。

【参考文献】

(英文)

- ABELIN H., NERETHLEKS I., TUNBRANT S. and MORENO L.: Final Report of the migration in a single fracture experimental result and evaluation, Stripa Project 85-03, SKB, 101p., 1985.
- Amarshinghe, S. R., Watanabe, K. and Ishiyama, K. : Study on the selection of unsaturated flow model for the different types of soil and soft rock, Environmental Earth Sciences, Vol. 64, pp. 1795-1805, 2011.
- BRACE, W. F. J. B WALSH and W. T. FRANGOS: Permeability of Granite under High Pressure, Jour. Of Geophys. Res., Vol. 73, No.6, pp.2225-2236, 1968.
- Carsel, R. E. and Parrish, R. S. : Developing Joint Probability Distribution of Soil Water Retention Characteristics, Water Resources Research, Vol. 24, pp. 755-769, 1988.
- Domenico, P. A. and Schwartz, F. W. : Physical and Chemical Hydrogeology, second edition, John Wiley & Sons, pp. 37-51, 1997.
- DOMENICO. P. A., M. D. MIFFLIN: Water from Low-Permeability Sediments and land Subsidence, Water Res. Reserch, Vol. 1, No.4, pp.563-576, 1965.
- Frieg, B. and Vomvoris, S. : Investigation of Hydraulic Parameters in Saturated and Unsaturated Zone of the Ven-tilation Drift, nagra, pp. 2.14-2.15, 1994.
- Harald ABELIN: Migration in a Single Fracture. An in situ Experiment in a Natural Fracture, Royal Institute of Technology Department of Chemical Engineering S10044, Stockholm, Sweden. 169p., 1986.
- Imai H., Eguchi M., Wakayama Y., Yonezawa A. : Simple settlement evaluation system based on the three-dimensional groundwater flow simulation and applied results, International Conference on Finite Element Models, MODFLOW, and More: Solving Groundwater Problems, pp.369-372, 2004.
- Jury, W. A., Gardner, W. R. and Gardner, W. H. : Soil Physics, 5th edition, John Wiley & Sons, pp. 105-109, 1991.
- Pasquiou, A. and Robinet, J. C. : Hydrodynamic characterization of the Opalinus Clay, Technical note TN 97-38, Mont Terri Project. Unpublished internal report, 1997.
- Pruess K., Oldenburg C., Moridis G. : TOUGH2 USER'S GUIDE, VERSION 2.0, LBNL-43134, 1999.
- R.A. Freeze, J.A. Cherry ; GROUND WATER, Prentice-Hall, Inc., pp.2-4, 1979
- Soe, A. K. K., Osada, M., Takahashi, M. and Sasaki, T. : Characterization of drying-induced deformation behaviour of Opalinus clay and Tuff in no-stress regime, Environmental Geology, 58, pp.1215-1225, 2009.
- USGS : <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/mudflow2000.html>
- van Genuchten, M. Th. : A closed form of A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Un-saturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp. 892-898, 1980.

W. R. RIDGWAY and D. LARSEN, A Comparison of Two Multiple-level Ground-water Monitoring System, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.197-202, 1989.

(和文)

赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No.264, pp.87-96, 1979

雨宮清, 今井久, 佐藤稔紀, 菊地正, 榊利博: III-A331 砂岩の不飽和浸透特性の測定 (その 1: サクシオンに着目して), 土木学会第 53 回年次学術講演会予稿集 III-A, pp. 658-658, 1998.

石原研而: 土質力学, 丸善, pp.121-156, 1988.

市川康明: 地盤力学における有限要素法入門, 日科技連, pp.41-47, 1990

伊藤洋, 佐藤邦明: 開削工事に伴う地下水流れの三次元特性に関する検討, 土と基礎 Vol. 32, No. 5, 1984.

今井久, 柳澤孝一: 三次元飽和不飽和浸透流解析プログラム TAGSAC の概要, PNC TR/GE90-01, 動燃事業団, 125p., 1990.

今井久, 江口正勝, 米澤朗, 日吉智: 海岸付近の潮汐応答・地下水位分布に関する一考察, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.637-638, 2004.

今井久, 江口正勝, 岩瀧清治, 吉本靖俊, 樋口晃: 地下水流動シミュレーションに基づく掘削影響評価システムの構築, 海洋開発論文集, pp.987-992, 2005

今井久, 江口正勝, 若山裕介, 岩瀧清治, 吉本靖俊, 樋口晃: 地下水流動シミュレーションに基づく掘削影響評価システムの構築, ハザマ研究年報, Vol.37, pp.1-7, 2005

今井久, 雨宮清, 松井裕哉, 佐藤稔紀, 三枝博光, 渡邊邦夫: 地下空洞周辺岩盤内の不飽和領域解析手法に関する提案 - 岩石の不飽和浸透パラメータと空洞壁面境界条件の設定方法 - 土木学会論文集(地圏工学), Vol.69, No.3, 285-296, 2013.

今井久, 塩崎功, 山下亮, 操上広志, 新里忠史, 前川恵輔, 安江健一: 地形・地質構造の変形を考慮した地下水流動解析の試み, 日本地下水学会 2007 年秋期講演会要旨, pp.54-59, 2007.10

今井久, 塩崎功, 山下亮, 前川恵輔, 新里忠史: 地質環境の長期変遷を考慮した地下水流動解析手法の開発と課題, 日本地下水学会 2009 年秋季講演会講演要旨, pp 42-45, 2009.10

上野年比古, 杉尾哲: 被圧水で満たされた円形暗渠の取水量について, 土木学会論文報告集第 194 号, pp.91-101, 1971.

大竹健司, 橋本信雄: 液化石油ガス地下岩盤貯槽方式における水封システムの要点, 土と基礎, Vol. 46, No.6, Ser No. 485, 地盤工学会, 1998.

大西有三監訳: 地下水の科学 I, 土木工学社, pp.7-9, 1995

尾方伸久, 大澤英昭, 中野勝志, 柳澤孝一, 西垣誠: 堆積岩の地質学的特性および透水係数、見かけ比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適応、応用地質、Vol.32, No. 6, pp.321-332, 1992.

興田敏昭, 徳楠充宏, 新田昭, 西垣誠: 沿岸域の地形変化を考慮した塩淡水境界挙動モデルの構築, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨集, pp.58-63, 2003.

尾上博則，笹尾英嗣，三枝博光，小坂寛：過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み，日本原子力学会論文誌，Vol.8, No.1, pp.40-53, 2009.

開発一郎：土壤水の水収支、気象研究ノート, 167, pp.91-112, 1989.

核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊1 深地層の科学的研究，JNC TN1400 2005-014, 2005.

核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊1 わが国の地質環境 JNC TN1400 99-021, pp. III1_26-III_142, 1999.

榎根勇：自然地理学講座3 水文学，大明堂，pp.184-186, 1980.

環境省 水・大気環境局：平成23年度 全国の地盤沈下地域の概況，2012.12.

菊地宏吉，三室俊明，百田博宣，泉谷康志，奥野哲生，水戸義忠：節理性岩盤における岩盤浸透流の流れモードに関する実験的研究、第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.381-385, 1988.

木村強，高橋学：乾燥・浸潤過程での岩石内の水分移動に関する実験的研究，資源と素材，Vol. 111, pp. 71-77, 1995.

操上広志，竹内竜史，瀬尾昭治：幌延深地層研究計画における地下水流動解析（研究報告），JNC TN5400 2005-003, 2005.

小池一之，町田 洋 編：日本の海成段丘アトラス，東京大学出版会, 2001.

駒田広也，大町達夫：フィルダムの三次元浸透流解析，大ダム，No.86, pp.1-5, 1978.

佐藤邦明：岩盤浸透流の抵抗則について、土と基礎, Vol. 30, No. 20, pp.27-32, 1982.

佐藤稔紀，菊地正，雨宮清，今井久，安達哲也：III-A331 砂岩の不飽和浸透特性の測定（その2：比透水係数に着目して），土木学会第53回年次学術講演会予稿集 III-A, pp. 658-658, 1998.

塩沢昌：サイクロメータによる土壤水のポテンシャル測定，土壤の物理性，No. 62, pp. 53-61, 1991.

地盤工学会不飽和地盤の挙動と評価編集委員会編：不飽和地盤の挙動と評価，地盤工学会，223pp., 2005.

地盤工学会「土質試験の方法と解説」改訂編集委員会：土質試験法の方法と解説—第一回改訂版—，地盤工学会，pp. 118-144, 2001.

杉原弘造：立坑掘削影響試験、日本原子力学会第7回放射線廃棄物セミナー資料集，pp.87-127, 1991.

杉田裕，中村隆浩，真田祐幸：弾性波トモグラフィ調査の掘削影響領域モニタリング技術への適用，第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 230-235, 2011.

杉原弘造，吉岡尚也，松井裕哉，佐藤稔紀，山本卓也：堆積軟岩での立坑掘削に伴う岩盤物性変化の現場計測による検討，資源と素材，Vol. 116, pp. 821-830, 2000.

鈴木英明，伊藤彰，杉田裕，川上進：水理学的ゆるみ域がおよぼす処分坑道周辺の不飽和領域形成に関する感度解析，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集 CS, pp. 421-422, 2002.

地下水入門編集委員会：地下水入門，土質工学会，p34, 1983.

地下水入門編集委員会；入門シリーズ8 地下水入門，（社）土質工学会, pp.32-34, 1983.

地下水ハンドブック編集委員会編；地下水ハンドブック，（株）建設産業調査会, pp.19-22, 1979.

- 堤和大, 渡辺邦夫, 菅伊三男, 山脇真二: 岩石の不飽和特性の逆推定法, 応用地質, Vol. 35, No. 2, pp. 23-30, 1994.
- 道路公団: 設計要領第一集, 土工・舗装・排水・造園, Vol.1, pp.5-56, 1998.
- 根切り工事と地下水編集委員会編; 根切り工事と地下水—調査設計から施工まで—, 土質工学会 pp.12-12, 1991
- 土質工学会 (現地盤工学会): 根切り工事と地下水—調査・設計から施工まで—, p.103, 1991.
- 土木学会: トンネルにおける調査・計測の評価と利用, pp. 73-91, 1987.
- 中川清隆: 輪島における熱収支・水収支の気候学的推定、金沢大学教育学部紀要, 27, pp.15-25, 1979.
- 中田英二, 小野雅弘, 市原義久, 飯島幸夫: 地下水水質と堆積岩の急速スレーキング特性の関係, 資源地質, Vol. 56, No. 2, pp. 133-144, 2006.
- 中野政詩, 宮崎毅, 塩沢昌, 西村拓: 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会, pp. 77-87, 1995.
- 中屋眞司, 西垣誠, 異方性岩盤におけるルジオン試験の理論的解釈と透水係数テンソルの測定法, 土木学会論文集 No.511/III-30, pp.23-34, 1995.
- 西垣誠, 竹下祐二: 室内による不飽和浸透特性の非定常算定方法, 土木学会論文集, No. 454/III-20, pp. 103-112, 1992.9.
- 西垣誠, 竹下祐二: 室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究, 岡山大学土木工学科, 1993. (科研費課題番号: 01550390)
- 西垣誠, 鍵富淳, 下茂道人: 瞬時水分計測法の適用限界と泥岩の保水特性について, 第 17 回土質工学研究発表会 E-7, pp. 2385-2388, 1982.
- 西垣誠: 飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する 2,3 の考察, 土質工学論文報告集, Vol.23, No.3, pp.165-177, 1983
- 日本材料学会編: 岩の力学 基礎から応用まで, 丸善, pp.41-71, 1993
- 日本地下水学会 地下水流動基礎理論のとりまとめに関する研究グループ編: 地下水シミュレーション, pp.79-104, 2010.
- 長谷川琢磨, 田中靖治, 馬原保典: スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究 (その 6) —エスポ HRL 建設時の地下水挙動に着目した地下水流動解析モデルの検証—, 電力中央研究所報告, 2003.
- 菱谷智幸, 西垣 誠, 橋本 学: 物質移動を伴う密度依存地下水流の 3 次元数値解手法に関する研究, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.59-69, 1999.
- 日野幹夫ほか共訳; カルバー新しい水文学, pp.64-68,
- 櫛原昇, 今井久, 雨宮清, 西田薫, 林為人, 榊利博: 不飽和領域の解析方法および原位置計測手法の研究, サイクル機構技報, No. 4, pp. 111-119, 1999.
- 櫛原昇, 松井裕哉, 三枝博光, 今井久, 雨宮清: III-B171 地下空洞周辺岩盤を対象とした浸透流解析における境界条件設定方法に関する提案, 土木学会第 55 回年次学術講演会予稿集 III-B, pp. 340-341, 2000.
- 松末和之, 藤原 治, 末吉哲雄: 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候, サイクル機構技報, No.6, 2000.

- 百田博宣・楠本太：多孔質地山の地下空洞を対象とした三次元地下水解析、第29回水理講演会論文集、pp.739-740, 1985.
- 柳澤孝一：広域地下水流動調査の現状について、日本原子力学会、第5回放射能廃棄物セミナー資料集、pp.163-203, 1989.
- 柳澤孝一・斉藤章・西垣誠・平田洋一：新しい現場透水試験法の開発と推定例、土と基礎、37?3 (378)、pp.47-52, 1989.
- 柳澤孝一、今井久、尾方伸久、大沢英昭、渡辺邦夫：立坑掘削に伴う地下水流動調査研究—東濃ウラン鉱山を例として—、応用地質 33 巻、第5号、pp.32-49、1992
- 八幡敏雄：土壌の物理、東京大学出版会、pp.49-106, 1983.
- 山本勇、塩田哲也、原島文雄、藤本順吉、鯉沼稔、広野修一郎：東濃地域のウラン鉱床の探査について、鉱山地質、24、pp.154-168, 1974.
- 山本荘毅責任編集：地下水用語辞典、古今書院、pp.93-95, 1986
- 吉識雅夫、山田嘉昭監訳：マトリックス有限要素法、培風館、pp.173-204, 1989
- 吉田英一、山本鋼志、田中姿郎、與語節生、Milodowski, A. E.：酸化還元フロントの形成と二次的物質移動現象—地質環境中汚染物質の移動と長期的固定に関するアナログ研究、地質學雜誌、Vol. 109, No. 9, pp. 548-558, 2003.9.
- 吉村昭：闇を裂く道、文春文庫、1990.
- 渡辺邦夫、浜田史郎、鈴木俊一、堤和大：岩石の不飽和パラメータ逆推定における測定誤差の影響評価、土木学会第49回年次講演会（H6.9）、pp. 68-69, 1994.
- 渡辺邦夫、藍沢稔幸、柳澤孝一：岩盤浸透流の三次元解析の考えと多孔体モデルによる広域解析例、土木学会第45回年次学術講演会要旨集、pp.816-817, 1990.
- 渡辺邦夫：山地小流域の地下水流出解析による流れ場の特性評価、応用地質、Vol.27, No.4, pp.40-50, 1986.
- 渡部力、名取亮、小国力：Fortran77による数値計算ソフトウェア、pp. 237-240, 丸善、1993.
- 渡辺邦夫、藍沢稔幸、小野誠、柳澤孝一、佐久間秀樹、山本肇、神田信之：蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定—（その1）—測定方法と室内試験、応用地質、Vol. 30, No. 4, pp. 11-18, 1989.
- 渡辺邦夫、柳澤孝一、Roland PUSCH、佐久間秀樹、藍沢稔幸、山本肇、神田信之：蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定—（その2）—現場計測、応用地質、Vol. 31, No. 1, pp. 1-11, 1990.