

---

# 各種社会基盤構造物の維持管理システムに関する研究

---

(14205064)

平成14年度～16年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(1)）研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 町田篤彦  
(埼玉大学工学部教授)

埼玉大学図書館



205801066



205801066

## 1. はしがき

本研究は、各種社会基盤構造物の合理的な維持管理システムを構築することを目的として立案したもので、対象構造物は、社会基盤構造物に占める割合が大きく、維持管理システムが複雑とならざるを得ないコンクリート構造物を中心とした。

今日に至るまで、構造物の維持管理がなおざりにされてきたとはいえませんが、昨今のコンクリート剥落事故に象徴されるように、維持管理の見直しを必要とする事例も少なからず存在する。土木学会では、これに対応して、コンクリート標準示方書施工編[耐久性照査型] (平成12年1月) 同じく維持管理編 (平成13年1月) などを刊行、耐久性の評価法、維持管理の方法あるいは補強工法といった多方面から、基準を示してきた。これらによって設計施工され、維持管理された構造物が少ないことから、その効用を即断することはできないが、構造物の耐久性確保に貢献するものである反面、耐久性評価に対し、一種の割り切りがあり、構造物の劣化と直接的には結びつかない指標を用いている部分が少なからずあることも確かである。本研究では、このような課題の解決に、学術的に正面から取り組もうとするとともに、反面で、実際面もないがしろにしていないう心かけた。

すなわち、構造物の維持管理システムの点検—現状評価—予測—対策サイクルにおける必要要素技術のうち、学術研究が必要なレベルに達していないと判断されるものに、変状モニタリングの実用的方法、非破壊試験法、コンクリートの塩害抵抗性、塩害、中性化、アルカリ骨材反応ならびにこれらの複合によるコンクリートの劣化と構造部材の劣化の関係、劣化の経時予測、劣化の要因に対応した補修・補強技術ならびにその効果の予測技術などがある。本研究では、これらの要素技術について、学術のレベルを実用に供し得るまで高めるべく、研究を重ねた。そして、これらを組み込んで、維持管理システムの構築を図った。なお、補修・補強技術の対象には、設計基準の改定により、規格不適合となった構造物も含めた。

これらの要素技術は、一朝一夕に確立できるものではないことは言うまでもなく、本研究でも、十分な成果に至らなかったものも少なくない。ただ、上に述べた要素技術のうち最も重要なものは、構造特性の経時変化の予測であると考えられるなかで、凍害については、これらが構造物の経時劣化に及ぼす影響を定量的に評価する途を開くことができた。このほかの要因についても、構造性能劣化の経時変化を解析する手法を定式化することもできた。また、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応と言った要因が複合して作用する場合に対する劣化についても、その理解を深めることができた。さらに、構造特性が劣化した構造物の補修・補強に関しても、補修補強工法の一般化を図ることができた。

すなわち、困難な研究を遂行する中で、少なくとも、コンクリート構造物の維持管理システムに関する既存のフォーマットを学術的観点から進歩させると言う所期の成果に近づくことはできたと言える。

## 研究組織

本研究の研究組織は、下記のようなものである。この種の研究は、コンクリート構造の研究者および構造解析の研究者が密接な連携を保って進める必要があり、このため、研究代表者が連携をとりやすい研究者に参加を求め、下記のような研究組織としたのである。

研究代表者：町田篤彦	埼玉大学工学部教授
研究分担者：関 博	早稲田大学理工学部教授
研究分担者：辻 幸和	群馬大学工学部教授
研究分担者：大即信明	東京工業大学大学院理工学研究科教授
研究分担者：陸好宏史	埼玉大学工学教授
研究分担者：上田多門	北海道大学大学院工学研究科教授
研究分担者：二羽淳一郎	東京工業大学大学院理工学研究科教授
研究分担者：呉智深	茨城大学工学部教授
研究分担者：中村 光	名古屋大学大学院工学研究科助教授
研究分担者：服部篤史	京都大学大学院工学研究科助教授

## 研究経費

	直接経費	間接経費	合計
平成14年度	22,700千円	6,810千円	29,510千円
平成15年度	10,700千円	3,210千円	13,910千円
平成16年度	9,000千円	2,700千円	11,700千円
総計	42,400千円	12,720千円	55,120千円

## 研究発表

### (1) 学会誌等

#### 1) 町田篤彦

1. P. Win, M. Watanabe, and A. Machida, Penetration Profile of Chloride Ion in Cracked Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research Journal, 34・7, pp. 1073-1079, 2004

2. Pa Pa WIN Atsuhiko MACHIDA Daisuke MORI and Hansu PARK, Diffusion of Cl<sup>-</sup> ions in Partially Dry and Saturated Cracked Reinforced Concrete Members, Transactions of JCI, Vol. 26, 2004

3. Atsuhiko Machida and Pa Pa Win, Modeling of Chloride Distribution in Cracked Reinforced Concrete, ConMat'05 Conference, 2005 (in printing)

4. Pa Pa Win and Atsuhiko Machida, Chloride Ingression in Cracked Reinforced Concretes, ACI Material Journal, 2005 (submitting)

2) 関博

1. 飯泉興平、関博、薛昕、塩化物と中性化の複合作用を受けるRC部材の鉄筋腐食とかぶりコンクリートに発生するひび割れに関する研究、コンクリート工学年次論文集、2005年6月（発表予定）

3) 辻幸和

1. 杉山隆文、大畑正嗣、五十嵐知美、辻幸和：電気泳動法によるコンクリート中の塩化物イオンの同定、セメント・コンクリート論文集、No.56、pp.216-223、2002

2. W. Ritthichauy, T. Sugiyama and Y. Tsuji ; Calculation of Diffusion Coefficient of Ion in Multicomponent Solution for Ion Movement in Concrete, コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.669-674、2002.

3. 杉山隆文、前原聡、Ritthichauy Worapatt、辻幸和：電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの移動に関する考察、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第3巻、pp. 247-250、2003年10月

4. 杉山隆文、清水俊吾、Worapatt RITTHICHAUY、辻幸和：電気泳動法を用いたモルタル硬化体の空隙構造の定量化とその考察、土木学会論文集、No. 767/V-64、pp. 227-238、2004年8月

5. 杉山隆文、町田芳嗣、石井利昭、辻幸和：ひび割れ内部の応力勾配による流体移動に関する固有透過率の計測、第31回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集、pp.9-10、2004年11月

4) 大即信明

1. 皆川浩、大即信明、宮里心一、西田孝弘、複数イオンの移動を考慮したコンクリートからのカルシウム溶出に関する数値解析的予測手法の構築、土木学会論文集、No.697/V-54、pp.85-96、2002年2月

2. 横関康裕、渡邊賢三、古澤靖彦、大門正機、大即信明、久田真、カルシウムイオンの溶出に伴うコンクリートの変質に関する実態調査と解析的評価、

3. 皆川浩、大即信明、宮里心一、西田孝弘：複数イオンの移動を考慮したコンクリートからのカルシウム溶出に関する数値解析的予測手法の構築、土木学会論文集、No.697/V-54、pp.85-96、2002年2月

4. 横関康祐、渡邊賢三、古澤靖彦、大門正機、大即信明、久田真：カルシウムイオンの溶出に伴うコンクリートの変質に関する実態調査と解析的評価、土木学会論文集、No.697/V-54、pp.51-64、2002年2月

5. 大即信明、西田孝弘、宮里心一、皆川浩：陸上鉄筋コンクリートのひび割れ補修に対する電着機構の解明と最適な電着条件の選定、「材料」Vol.51 No.5、pp.573-580、2002年5月

西田孝弘、大即信明、皆川浩、Wanchai Yodsudjai：既存陸上筋コンクリート部材を用いた  
6. 電着工法のひび割れ補修に対する適用性の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1443-1448、2002年

7. 鄭仁沢、大即信明、西田孝弘、小長井彰祐：既存陸上筋コンクリート部材のひび割れ及びコールドジョイントの補修に対する電着工法の適用、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集第2巻、pp.231-234、2002年

8. Nobuaki Otsuki, Hiroshi Yokota, Hidenori Hamada, Tarek Uddin Mohammed: Lifecycle Design for Durability of Offshore Concrete Structures, The First fib Congress 2002; Osaka, Japan, pp.65-84, 2002年10月

9. Nobuaki Otsuki, Hiroshi Minagawa, Shinichi Miyazato, Bouavieng Champaphanh: Estimation of Ca-Leaching Deterioration of Concrete with different Water-Cement Ratio Using Numerical Analysis Method, The First fib Congress 2002, Osaka, Japan, pp.227-236, 2002年10月

10. 大即信明、西田孝弘、皆川浩、Wanchai YODSUDDJAI：電着工法した後の鉄筋コンクリート部材の耐久性に関する検討、材料、Vol.51、No.11、pp.1278-1283、2002年

11. 西田孝弘、大即信明、小長井彰祐：打継ぎ部におけるコンクリートの中酸化現象が鉄筋腐食の速度に及ぼす影響とその対策、材料、Vol.52、No.9、pp.1067-1074、2003年9月

1 2. 大即信明、西田孝弘、宮里心一、福田孝一：マクロセル腐食速度算定方法による既存コンクリート部材中铁筋の腐食評価、日本建築学会構造系論文集、No.557、pp.15-20、2004年

1 3. 大即信明、ひび割れ補修、コンクリート工学、pp.68-72、2004年

5) 睦好宏史

1. Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H. and Ashraf, M.(2004), Shear Strengthening of RC Beams Using Fiber-Reinforced Polymer Sheets with Bonded Anchorage, *ACI Structural Journal*, Vol. 101, Issue 5, pp.660-668,2004

2. Bimal Babu Adhikary and Hiroshi Mutsuyoshi, Behavior of Concrete Beams Strengthened in Shear with Carbon-Fiber Sheets, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Volume 8, Issue 3, pp.258-264, June 2004

3. Bimal B. Adhikary and Hiroshi Mutsuyoshi: Artificial neural networks for the prediction of shear capacity of steel plate strengthened RC beams, *Construction and Building Materials*, ELSEVIER, VOL.18, Issue 6, pp. 409-417, 2004

4. Wael A. Zatar and Hiroshi Mutsuyoshi: R/C Frame Structures with Beams Wrapped by Aramid Fiber Reinforced Polymer Sheets, *Advanced Concrete Technology*, Vol.2 No.1, pp. 37-48, 2004.

睦好宏史、牧 剛史、山田伝一郎、小西由人、藤田亮一：RCラーメン橋脚におけるはり部耐震補強に関する研究、土木学会論文集、No.746/V-61, pp.215-228, 2003年11月

5. Bimal, B. Adhikary and Hiroshi Mutsuyoshi: Numerical Simulation of Steel-plate Strengthened Concrete Beam by a Non-linear Finite Element Method Model, *Construction and Building Materials* 16(2002), ELSEVIER, pp291-301, 2002

6) 上田多門

1. Muttaqin Hasan, Hidetoshi Okuyama, Yasuhiko Sato and Tamon Ueda, "Stress-Strain Model of Concrete Damaged by Freezing and Thawing Cycles", *Journal of Advanced Concrete Technology*, JCI, Vol.2, No.1, pp.89-99, February 2004

2. Muttaqin HASAN, Yasuhiko SATO and Tamon UEDA, "The Influence of Frost Damage on Fatigue Behavior of Concrete", Proceedings of the Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions(CONSEC '04), Vol.1, June 2004, pp.538-545

3. 福島佳志美、“凍結融解作用を受けるコンクリートの損傷度評価に関する研究”、平成16年度修士論文概要集、北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻、pp.33-36, 2004年3月

4. Muttaqin HASAN, Hideotshi OKUYAMA and Tamon UEDA, "The Damage Mechanism and Strain Induced in Frost Cycles of Concrete", Proceedings of JCI, Vol.25, No.1, pp.406-411, July 2003.

5. Tamon UEDA, Muttaqin HASAN, Kohei NAGAI, Yasuhiko SATO, "Stress-strain Relationship of concrete damaged by Freezing and Thawing Cycles", Proceeding of Fifth International Conference of Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure(FRAMCOS-5), Vol.2, April 2004, pp.645-652

6. Ken Watanabe, Junichiro Niwa, Mitsuyasu Iwanami, Hiroshi Yokota: Localized failure of concrete in compression identified by AE method, Construction and Building Materials 18(2004)189-196

7) 二羽淳一郎

1. 渡辺 健、久保陽平、二羽淳一郎、横田 弘: AE法を用いたコンクリート床版のひび割れ診断に関する研究、コンクリート工学年次論文集、2005年(査読中)

2. 渡辺 健、二羽淳一郎、横田 弘、紫桃孝一郎: AE法を用いたプレストレストコンクリート梁の破壊性状の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.2, 2004

3. 渡辺 健、岩波光保、横田 弘、二羽淳一郎: AE法を用いた圧縮下コンクリート破壊進展予測に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.25, No.2, 2003

4. 岩波光保、渡辺 健、横田 弘、二羽淳一郎: コンクリートの局所的圧縮破壊現象とその評価手法、港湾空港技術研究所報告書第42巻 第3号、2003年9月

8) 吳 智深

1. B. Xu & Z. S. Wu: Long-gage fiber optic sensors for dynamic strain measurement and structural identification

2. Z. S. Wu & B. Xu, K. Hayashi, A. Machida: Fiber optic sensing of PC girder strengthened with prestressed PBO fiber sheets

3. Zhishen Wu, Bin Xu, Keiji Hayashi, Atsuhiko Machida: Distributed Fiber Optic Sensing for a Full-scale PC Girder Strengthened with Prestressed PBO Sheets

4. Suzhen Li, Zhishen Wu: Characterization of long-gage fiber optic sensors for structural identification

5. 吳 智深、許 斌、原田隆郎、Zuishen Wu、Bin XU and Takao HARADA : 都市インフラに関する構造ヘルスマモニタリングの現状と展望—展望論文—

9) 中村光

1. 野城良祐、石川靖晃、中村光、田辺忠顕 : 物質移動を考慮した RBSM によるひび割れ進展解析手法の開発、コンクリート工学年次論文報告集、第 25 巻第 1 号、pp.467-472, 2003 年 6 月

2. 野城良祐、石川靖晃、中村光、田辺忠顕 : 初期ひび割れがコンクリート供試体の引張挙動に及ぼす影響評価、第 12 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.189-192, 2003

3. 野城良祐、中村光、Srisoros Worapong、田辺忠顕 : 塩分浸透による鋼材腐食を考慮した RBSM 解析、コンクリート工学年次論文報告集、第 26 巻第 1 号、pp.897-902, 2004 年 6 月

4. 澤部純浩、上田尚史、中村光、李相勲 : 軸方向鉄筋の定着不良を生じたせん断破壊する RC はりの挙動解析、コンクリート建造物の補修・補強・アップグレード論文報告集、第 4 巻、pp.409-416、2004 年 10 月

5. Srisoros Worapong, Yasuaki Ishikawa, Hikaru Nakamura, Minoru Kunieda: Thermal Cracking Analysis of Concrete Wall Structure using RBSM、コンクリート工学年次論文報告集、第 27 巻 (投稿中)



10) 服部篤史

1. 久保善司、玉井 謙、服部篤史、宮川豊章：シラン含浸コンクリートの発水性能評価、材料 一特集 建設材料一、Vol.52, No.9, pp.1095-1100、2003年9月
2. 久保善司、服部篤史、宮川豊章：ASR コンクリートの力学的特性と劣化度評価について、コンクリート工学年次論文集、Vol.25, No.1, pp.1799-1804、2003年7月
3. Atsushi Hattori, Shin Yamamoto, Yoshimori Kubo, Toyoaki Miyagawa: ASR Expansion Reduction and Ductility Improvement by CFRP Sheet Wrapping, Proc. of 6th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer(FRP) Reinforcement for Concrete Structures(FRPRCS-6), Vol.2, pp.815-822, 2003.7
4. Atsushi Hattori, Shin Yamamoto, Yoshimori Kubo, Toyoaki Miyagawa: Expansion and Flexural Behavior of RC Beam Wapped with CFRP Sheet Subjected to ASR, Proc. of the Third International Symposium on Structural Composites for Infrastructure Applications, 2002.12
5. 久保善司、本間英世、服部篤史、宮川豊章：シラン系表面処理の再補修効果について、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、Vol.2, pp.35-38、2002年10月

(2) 口頭発表

2) 関博

1. 桑原大亮、飯泉興平、桜田朋浩、関博、複合劣化作用を受けるRC部材の鉄筋腐食に関する研究、土木学会第58回年次学術講演会、pp.85-86、平成15年9月
2. 井上武也、薛昕、関博、鉄筋が腐食したRCはり部材のせん断耐力に関する一考察、土木学会第59回年次学術講演会、pp.425-426、平成16年9月
3. 薛昕、関博、スターラップが腐食したRCはりのせん断挙動について、土木学会第60回年次学術講演会、平成17年9月(発表予定)

7) 二羽淳一郎

1. 渡辺 健、二羽淳一郎、横田 弘、岩波光保：X線CT法を用いたコンクリートの圧縮破壊エネルギーに関する一考察、土木学会関東支部第30回技術講演発表会、No.10/第5部

門、2003年3月

9) 中村光

1. 澤部純浩、中村光、田辺忠顕：応力状態に依存した内部膨張ひずみを考慮したRC部材の解析、第59回年次学術講演会講演概要集、土木学会、5-104 (CD-ROM)

10) 服部篤史

1. 中尾 真、山本貴史、服部篤史、宮川豊章：ASR膨張を生じたRCはり部材の耐荷挙動に関する解析的研究、土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集V部門、2005年5月 (投稿中)

(3) 出版物

なし

## 2. 研究成果

コンクリート構造物の維持管理システムとして、既往の成果に本研究の成果を加え、本研究の最終とりまとめとして提案できるシステムについて、今後の研究方向とともに示せば以下のようなものである。

### 維持管理システム

I 構造物をその設計施工に当たって準拠した示方書、基準等（以下、示方書類）により分類する。

- ① 昭和61年（1986）以前の示方書類に準拠したもの
- ② 昭和61年～平成14年の示方書類に準拠したもの
- ③ 平成14年（2002）以降の示方書類に準拠したもの

これらは、土木コンクリート構造物耐久性検討委員会（平成12年度に、建設省（当時）、運輸省（当時）、農林水産省によって組織された）およびコンクリート構造物の品質向上および保守管理に関する検討委員会（平成11～12年度、東日本旅客鉄道株式会社）の調査により、初期塩分による塩害およびアルカリ骨材反応に対する対策が規定された以降に建設された構造物には、これらによる劣化例が皆無に近いこと、平成14年以降には、土木学会示方書が耐久性を照査する性能照査型に改訂されたことによっている。すなわち、①の構造物にあつては、劣化作用として、塩化物イオン、アルカリ骨材反応、凍結融解、中性化、荷重作用、特定要因なしなどのあらゆる作用を考慮に入れて、維持管理を行う必要があり、②の構造物にあつては、外来塩分による塩化物イオンあるいは種々の要因の複合による劣化に重点をおくべきである。そして、③の構造物にあつては、維持管理の重点は、設計時に想定した劣化と点検結果を比較し、設計時の想定を確認することに置く。

II 構造物を、晒される環境条件により分類する。

準拠示方書類による分類に加えて、塩分環境下にあるか、凍結融解が生ずる環境にあるかあるいはこれらがない場合に分類する。これは、このような環境にあるか無いかが容易に判定できるからである。

### III 塩化物イオン

#### III-1 初期塩分

①の構造物が重点対象となる。供用期間の調査、コンクリートの表面変状（ひび割れ、錆汁、剥離剥落など）の点検をおこなう。変状が認められなければ、定期点検に移る。変状が認められた場合、III-4による。

#### III-2 飛来塩分

①および②の構造物が重点対象となる。また、海岸からの距離に応じて重点度を設定する。300mより近い場合、最重点の対象となる。Ⅲ-1の点検に加えて、コンクリート内の塩化物イオン濃度を予測し、定期点検にゆだねる。必要なら、鉄筋発錆時期を推定して、点検時期の決定に反映する。濃度の予測は本研究の成果（辻、町田）が適用できる。

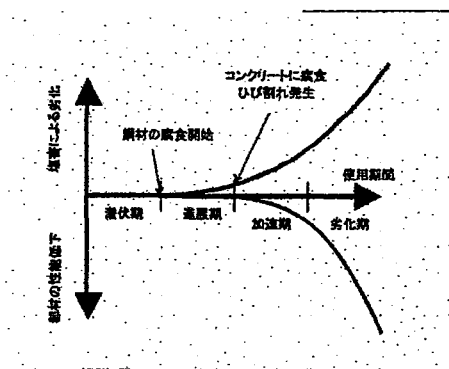
③の構造物の場合、定期的に変状の有無を点検し、設計時の想定通りであるかを確認する。

### Ⅲ-3 融雪剤

融雪剤使用量に応じて重点対象を定める。点検、濃度予測等はⅢ-2に同じである。

### Ⅲ-4 劣化予測、モニタリング、補修補強

塩化物イオンによる劣化の進行は図のようである（土木学会示方書維持管理編）。同図のように、経過時間と劣化の関係は、予測不可能ではないが、精度がよいのは、潜伏期（腐食開始期）までであるといわれている。従って、潜伏期までは進行を予測し、以後、点検あるいはモニタリングによるのが実用的である。モニタリングの方法は、鉄筋自然電位の経時変化測



定が実用的である。これには、本研究の成果（大即）が適用できる。

## IV 凍害

下表による。

	凍結融解が頻発する環境	頻発する場合とない場合の間	凍結融解がない環境
①の構造物の場合	点検、劣化予測	複合有なら点検	複合有なら重点部位点検
②の構造物の場合	複合有なら点検	重点部位の点検	一般点検
③の構造物の場合	複合有なら重点部位点検	一般点検	一般点検

注：塩害、アルカリ骨材反応との複合劣化のほか、荷重の繰返し作用（疲労）も含む

点検の結果、損傷が認められれば、進行の予測および構造性能劣化の予測を行うことにな

る。劣化の進行予測は、劣化指標を動弾性低下率や、超音波速度や質量変化率、あるいは任意深さにおける引張強度低下率に取れば、ある程度は可能であるが、これらの指標は構造物の性能劣化には必ずしも結びつかない。このような現状の中で、劣化指標を残留引張ひずみに取り、これをコンクリートの力学モデルに組み込んで、構造性能の劣化に結びつけることを可能とした（上田の研究成果参照）。ただ、これによる進行予測には、なお検討が必要な部分もある。

塩害との複合では、塩分濃度にもよるが、凍害を助長する場合がある。ただ、進行予測は、未だ確立されていない（複合劣化参照）。点検と補修補強の組み合わせが現実的である。

アルカリ骨材反応との複合劣化の可能性もある（複合劣化参照）。

## V アルカリ骨材反応

### V-1 塩害との複合の可能性の可能性が低い場合

①の構造物を重点対象として、点検を行う。②および③の構造物は一般点検でよい。損傷が認められた場合、進行予測、構造性能変化の予測を行い、以後の取り扱い（点検、補修・補強の時期、工法）を決定することとなるが、現状の技術レベルでは、進行予測は容易ではない。ただ、点検の結果から耐荷性能を評価することは可能である（服部2および口頭発表参照）から、点検頻度を増すとともに、コンクリートコア調査や鉄筋の腐食調査あるいは破断の有無を調査し、補修補強の必要性の判定や補修工法の選定（服部1、5および3、4）を行うのが現実的である。

### V-2 塩害との複合劣化の可能性があり得る場合

塩害との複合がある場合、劣化が促進されることは明らかにされているが、その促進の程度を体系的に評価することは容易ではない。それで、重点対象とする構造物を①および②の構造物に拡大するとともに、③の構造物も対象として、V-1の損傷が認められた場合の点検、対策を実施する。

## VI 中性化

③の構造物については、コンクリートの使用材料、配合、環境条件などをもとに中性化深さを予測し、中性化残りまで達した時を点検開始とする。①および②の構造物については、そ、一般点検をおこない、コンクリート表面の変状が認められたら、III-4による。なお、本研究により、中性化の経時変化予測式の高精密化が図られるとともに、補修技術が開発された（大即）。

## VII 複合劣化

塩害と凍害、塩害とアルカリ骨材反応、凍害とアルカリ骨材反応の相互作用による劣化、塩害に中性化が複合する場合の劣化が考えられる。これらの複合劣化で、塩害と関係した

ものには比較的データがあるが、そのほかにはデータが乏しい。また、3者以上の相互作用については、ほとんど情報がない。

#### Ⅶ-1 塩害と他の要因による複合劣化

1) 初期塩分と中性化が複合する場合、鉄筋の腐食は両者が単独に作用した場合の和より大きい、2) 塩分の浸透と中性化が複合する場合、塩分浸透の影響が圧倒的に大きい、3) 塩分とアルカリ骨材反応の複合劣化は塩分と凍害の複合劣化より著しい、等は明らかにされているが、これの進行を解析的に予測する手法は提示されていない。

維持点検の重点構造物は、Ⅲと同様であるが、点検の際に、劣化要因が複合しているか否かの判定が重要となる。どの要因か確定できない場合は、最も可能性が高い要因について、単独に評価する。

#### Ⅶ-2 塩害を除いた複合要因による劣化

比較的影響が大きいのは、アルカリ骨材反応と凍害の場合である。この場合もデータが乏しく、また、劣化予測に対する解析的研究は見あたらない。

維持点検は、各々の要因が単独で作用する場合に準ずる。

#### Ⅷ 特定原因なし

構造物の種別ごとに重点部位を定めるとともに、5～10年ごとの一般点検を実施する。

#### Ⅸ 構造性能劣化の解析手法

塩害、アルカリ骨材反応などの劣化要因は、コンクリートの内部に物質移動に伴う内部ひずみを発生させ、ひび割れを進展させ劣化をもたらす。これを剛体バネモデルにトラスモデルを組み合わせて取り扱う解析手法を開発した。この手法は、構造解析も組み合わせて、外力が達成する場合の任意時間後の劣化状態も求めることができる。そして、これを初期条件として、外力が作用する場合の挙動解析により構造性能の劣化も解析できる。残る問題は、内部ひずみ発生モデル化である。

また、別途、有限要素法により付着劣化を考慮した解析を行い、損傷部位と構造性能の変化の関係を明らかにするとともに、モニタリングの重点部位も明らかにした（以上、中村の成果参照）。

#### X モニタリング

劣化予測が困難な場合あるいはこれが可能であっても重要構造物では、モニタリングを行って構造性能を把握し、補修補強の必要の有無を判定するのがよい。モニタリングの手法として、各種コンクリート部材の载荷に伴う損傷領域を、アコースティック・エミッション法を用いて同定する手法（二羽の研究成果参照）、光ファイバセンシングによる静的ひずみ分布の連続計測システムおよび動的応答計測システムを用いてコンクリート構造物のひ

び割れ分布その他をモニタリングする手法（呉の研究成果参照）などについて、成果を得た。

#### X I 補修補強工法

曲げモーメントあるいはせん断力に対する耐荷性能が劣化した場合、連続繊維シート巻立てあるいは鋼板接着によって補修補強する工法が適用できる。これらの工法の効果について、これを実験的に検討するとともに、解析的に評価し得る成果を得た（睦好）。

以上の成果の詳細を、研究発表論文（発表予定を含む）の別刷りとして、1の研究発表に示した順に以下に示す。なお、このような成果が得られ、鋼コンクリート複合構造の開発に貢献できたことは、科学研究費補助金が与えられたことと研究分担者各位の熱心なご協力によるところが大きい。ここに記して、厚くお礼申し上げる次第である。