

# PC鋼材の腐食によるプレストレストコンクリート橋梁の耐久性

## Durability of PC Members incorporating to Corrosion of PC Bars

睦好 宏史<sup>1</sup>、谷口 博胤<sup>2\*</sup>、今野 洋一<sup>3</sup>、Ha MINH<sup>4</sup>、二井谷 教治<sup>5</sup>  
Hiroshi Mutsuyoshi<sup>1</sup>, Hirotsugu Taniguchi<sup>2</sup>, Youichi Konno<sup>3</sup>, Ha MINH<sup>4</sup>, Kyoji Niitani<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> 埼玉大学 工学部 建設工学科 建設材料研究室

Structural Material Laboratory, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Saitama University

<sup>5</sup> オリエント建設株式会社

Oriental Construction Co., Ltd.

### Abstract

Problems with corrosion of prestressing steel in post-tensioned structures due to inadequate grouting in the past have become more apparent in recent years. To investigate influence of inadequate grouting on corrosion of prestressing steel, an accelerated corrosion tests by external current was carried out in this study. Further, loading tests were also conducted to investigate the behavior of post-tensioned concrete beams deteriorated by corrosion of prestressing steel. In the test, the grouts were injected into the ducts with different grout level of 33%, 66% and 100% respectively. The results of accelerated corrosion tests show that the cracks occurred faster with the increasing of grout level. It is confirmed that the grout plays a crucial role in the corrosion protection of the prestressing steel. The results of loading test show that, as the degree of corrosion crack became severe, failure mode of the beams shifted from flexural failure to bond splitting and ultimate loading capacity decreased from 10% to 30%. The reduction of the loading capacity might be due to reducing of steel-concrete bond and concrete rigidity by severe corrosion cracks. For the beam with applied current time of 30 days, the failure load decreased 82%. The weight loss of prestressing steel was 26% for this beam. It is concluded that adequate grouting is necessary to protect prestressing steel deteriorated by corrosion. Furthermore, since the corrosion cracks occurred faster if the rate of filling grout is high, the measuring of sheath's corrosion is needed.

**Key Word:** Corrosion, Prestressing Steel, Grout

### 1. はじめに

わが国は、第2次世界大戦後の国土復興、その後の高度成長期において膨大な社会基盤施設を築きあげたが、建設後数十年が経過し、老朽化によるコン

\*〒338-8570 さいたま市下大久保 255 埼玉大学

工学部建設工学科建設材料研究室

電話：048-858-3553 FAX：048-858-7374

E-mail：[hirotsugu-t@mtr.civil.saitama-u.ac.jp](mailto:hirotsugu-t@mtr.civil.saitama-u.ac.jp)

クリートの剥落や落下事故など、コンクリートの耐久性を脅かす事例が多数報告されている。ポストテンション方式プレストレストコンクリート（以下PC）橋に関しても、建設時における不適切なグラウト施工に起因したPC鋼材の腐食問題が最近になって問題となってきている。このような中で、多くの既設PC橋梁の鋼材腐食程度や耐用年数などの判定は、非常に困難を極めるものとなっているのが現状

である。海外において PC 橋梁の崩壊事例報告もなされている今日、既設 PC 橋梁の劣化評価が早急に求められている。本研究はポストテンション式 PC 梁において、様々なグラウトの施工不良を再現し、電食による腐食促進試験を行うことで、グラウト施工不良に伴う PC 鋼材の腐食性状の違いや、それによって生じる耐荷力低下の関係を実験的に調査することを目的としたものである。

## 2. 腐食促進試験

実験で使用した供試体の形状寸法を Fig.1 に示す。全長 2000mm、断面は幅 100mm、高さ 200mm の矩形断面とした。供試体には、PC 鋼より線 SWPR7A  $\phi 9.3\text{mm}$  (引張強さ  $1720\text{N}/\text{mm}^2$ ) を 1 本配置し、ポストテンション方式でプレストレスを与えた。使用するシースは  $\phi 20\text{mm}$  の鋼製スパイラルシースとした。プレストレス導入量は供試体端部に設置したロードセルにより測定し、目標導入プレストレス量は引張強さの 60% とした。定着具は供試体両端をエポキシ樹脂でコーティングしたのち、コンクリート端部と定着具間に厚さ 2mm のゴム板を挟むことにより絶縁し、PC 鋼材腐食を促すために、コンクリートには予め  $\text{Cl}^-$  を  $3\text{kg/}$  混入させた。Table 1 に試験要因と供試体名称を示す。実構造物でのグラウト施工不良を想定して、グラウト充填量を変化させた供試体を 7 体用意した (No.3~No.9)。その際、シース下部からのグラウト充填高さ位置が 0、1/3、2/3、1、の 4 type 用意し、それぞれをグラウト充填率 0%、33%、66%、100% と呼ぶことにする (Fig.2-参照)。また、グラウト未充填部に水を充填したのもそれぞれ用意した (No.7~No.9)。さらに、PC 鋼材の腐食進行に伴う耐荷力低下の関係をみるために腐食レベルを変えたものを 2 体用意した (No.10~No.11)。腐食促進試験の概略を Fig.3 に示す。PC 鋼材を陽極に、チタンメッシュを陰極に設定し、図のような回路を作って試験を行った。各供試体は、底面にチタンメッシュを配置したアクリル製プール内へ、載荷時の引張縁が上方になるように配置し、プール内に供試

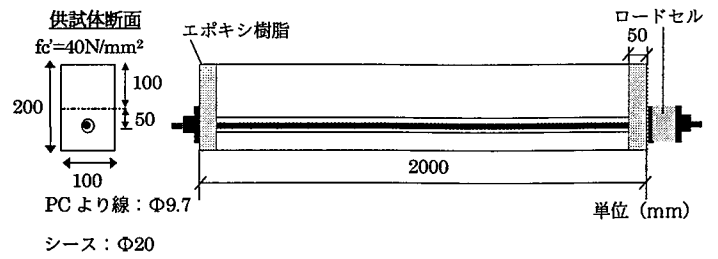


Fig.1 供試体形状寸法

Table 1 試験要因および供試体名称

No.	供試体名称	通電	グラウト充填率 (%)	空隙への水の充填	塩分混入	通電日数
1	non-current	無し	100	-	無し	-
2	non-chloride	有り	100	-	無し	7日
3	G0	有り	0	無し	有り	
4	G33	有り	33	無し	有り	
5	G66	有り	66	無し	有り	
6	G100	有り	100	-	有り	
7	G0-W	有り	0	有り	有り	
8	G33-W	有り	33	有り	有り	
9	G66-W	有り	66	有り	有り	14日
10	G100-14D	有り	100	-	有り	
11	G100-30D	有り	100	-	有り	30日

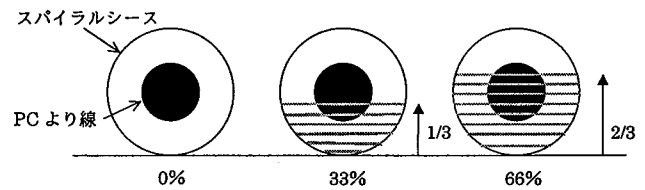


Fig.2 グラウト充填イメージ (断面)

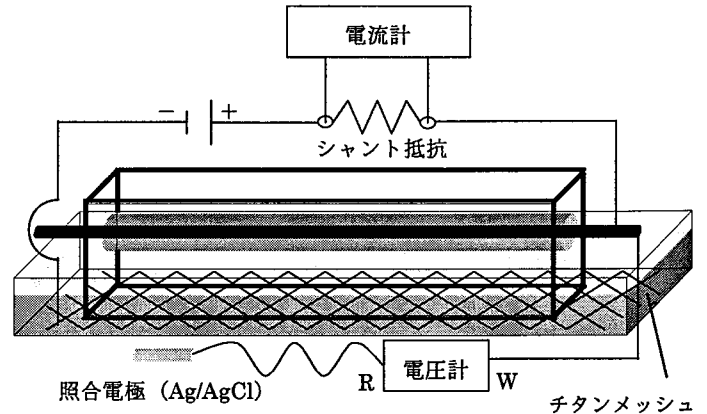


Fig.3 腐食促進試験装置概略図

体高さの 1/3 程度が浸るように濃度 5% の NaCl 溶液を満たして通電を行った。通電は、一定電流 (0.7A) として、あわせて塩水噴霧も行った。ある日数経過後、適宜シースの自然電位の測定、腐食ひび割れ観察 (ひび割れ幅の測定、ひび割れ図の作成)、プレストレス量の測定を行った。なお、腐食促進試験後に行う載荷試験が終了した後に PC 部材をはつり出し、

取り出したPC鋼材を濃度10%のクエン酸二アンモニウム溶液に2日間浸けて除錆して質量を計測し、健全なPC鋼材と比較することで腐食量を算定した。

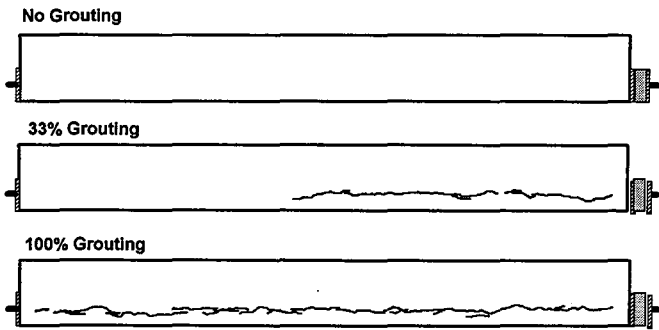
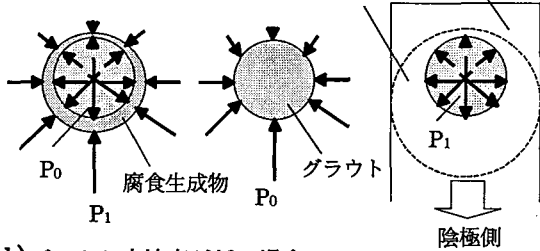


Fig.4 腐食ひび割れ

a) グラウト充填率が高い場合

- i) グラウトに作用する圧力  $P_0$
- ii) 腐食生成物に作用する圧力  $P_1$
- iii) コンクリートに作用する圧力  $P_1$



b) グラウト充填率が低い場合

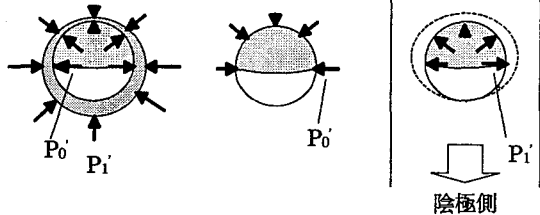


Fig.5 シース外部腐食による腐食膨張圧力力学モデル<sup>1)</sup>

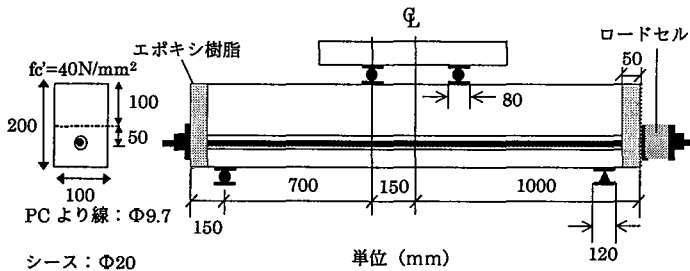


Fig.6 供試体図

### 3. 試験結果と考察

Fig.4 は同じ通電日数で供試体長軸方向に発生した腐食ひび割れをグラウト充填率別に表した腐食ひび割れ図である。腐食ひび割れはシースに沿って発

生し、グラウト充填率が高い場合において卓越して発生する傾向があった。これは、シースの外側が腐食によって体積膨張したことが大きく影響していると考えられる。Fig.5 はシースの外側が腐食によって膨張する現象をモデル化したものである。図に示すシースの外側が腐食し、膨張することにより、グラウト内部 ( $P_0$ ) およびシース外側のコンクリートに圧力 ( $P_1$ ) が作用する。なお、矢印の長さは圧力の大きさを表している。載荷試験後、シースをはつり出した結果、陰極側のシースの厚さが、上面側のシース厚さより薄かったことから、シースは陰極に近い所ほど多く腐食していると推測される。これは、陰極に近いほど等電位線の間隔が短く、電位勾配が急なため、電流が流れやすかったためである。このことから、陰極側に近い所ほどシースの腐食による膨張圧力は大きくなる。圧力  $P_1$ ,  $P_1'$  によりコンクリート表面に腐食ひび割れが発生すると考えると、a) のグラウト充填率が高い方では、膨張圧  $P_1$  に対してグラウトの抵抗力が働くので、全体的に陰極に近い側の圧力  $P_1$  が大きくなると推測される。また、b) のグラウト充填率の低い方では、膨張圧  $P_1'$  に対して陰極側にグラウト充填がなされていないほど抵抗力は小さくなるので、力の釣り合いから膨張圧  $P_1'$  は  $P_1$  に比べて小さくなると考えられる。このことにより、シースにグラウトが完全に充填されている方が、未充填の場合よりシースの腐食による腐食ひび割れは発生し易くなると考えられる。

### 4. 載荷試験

#### 4.1 実験方法

腐食促進試験を所定の日数行った後、供試体はすべて載荷試験が行われた。載荷は Fig. 6 に示すように全長 2000mm、支間長 1700mm の 1 スパン単純支持とした。載荷方法は油圧ジャッキによる静的 2 点載荷とし、載荷スパンは 300mm とした。コンクリートの圧縮強度は  $40\text{N/mm}^2$  程度であった。載荷ステップは 0.5kN として載荷制御で行い、PC 鋼材が降伏してからは変位制御で行った。ひび割れは目視に

より観察し、載荷は各供試体とも載荷荷重最大値の80%まで耐力が下がるまで行った。

#### 4.2 実験結果および考察

##### (1) 載荷実験結果概要

Table 2 に載荷実験結果の概要を示す。表中の Non-current は腐食促進試験を行っていない健全な供試体を意味している。表から、腐食促進試験を行った供試体は、健全な供試体に比べ、曲げひび割れ発生荷重が小さくなっていることが分かる。これは、シースの外側が腐食することにより、膨張圧が生じて、曲げひび割れの発生を助長したからであると考えられる。

さらに、通電日数 30 日間の G100-30D では、先に述べたとおり質量欠損率が 26% になり、PC 鋼材が破断し、曲げ耐力比は健全な供試体に比べ 82% 耐力低下を生じている。このことは、既存のポステン式 PC 橋梁でも PC 鋼材に破断が生じているような橋梁では、同じように大きな耐力低下を生じている可能性があることを示唆するものである。

また、腐食ひび割れの発生箇所が耐力に及ぼす影響に着目すると、供試体側面に生じたひび割れにより、曲げ耐力が全体的に小さくなる。質量欠損率 1% 程度では終局耐力にあまり影響しないことから、供試体側面に発生する腐食ひび割れが終局耐力の低下に影響しているものと推測される。

##### (2) 腐食ひび割れと終局状態

(1) で述べたように腐食ひび割れが終局耐力に影響を及ぼす理由は、腐食ひび割れの伸展により曲げ破壊から付着破壊へと移行するからであると推測される。Fig.7 は載荷試験後のひび割れ図を表したものである。G33 は載荷試験前には供試体側面に腐食ひび割れの発生はなく、G33-W は供試体側面に腐食ひび割れが発生していた。Fig.7 の G33 のように、載荷試験時に供試体側面に現れる腐食ひび割れの伸展が小さい場合には、圧縮縁コンクリートの圧壊により終局状態に至るが、G33-W のように供試体側面長軸方向に大きく腐食ひび割れが伸展した場合、圧縮縁コンクリートに圧壊の様子が現れる前に、腐食ひび割れの伸展と共に耐力が下がり終局状態へと至る傾向にあった。

Fig.8 は G33、G33-W について荷重と圧縮縁コンクリートひずみの関係を表したものである。図から分かるのとおり、両者は酷似しているが、G33 は 3500  $\mu$  を超えているのに対し、G33-W はひずみが上から

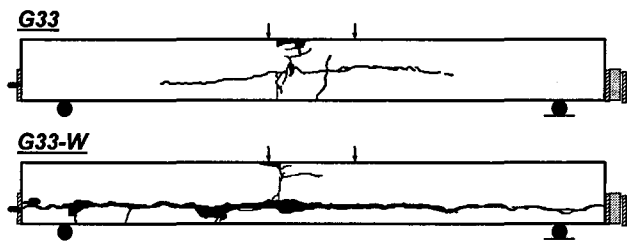


Fig.7 ひび割れ図

Table2 載荷試験結果概要

	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	終局荷重 (kN)	終局変位 (mm)	腐食ひび割れ発生場所	曲げ耐力比 (%)	質量欠損率 (%)
Non current	24.5	40.0	25.3	-	-	-
Non-chloride	24.5	39.3	26.8	-	98%	-
G0	21.6	33.6	25.3	-	84%	-
G33	20.6	34.4	29.2	引張縁	86%	0.43%
G66	22.6	36.7	21.5	引張縁	92%	-
G100	21.6	34.4	14.3	片側面	86%	-
G0-W	21.6	31.0	25.8	片側面	77%	1.06%
G33-W	21.6	28.5	10.7	片側面	71%	1.04%
G66-W	23.5	29.8	15.9	片側面	75%	-
G100-14D	21.6	30.8	10.5	片側面	77%	0.78%
G100-30D	-	7.3	1.3	引張縁、両側面	18%	26.47%

\*腐食ひび割れ発生場所:腐食促進試験により載荷試験前に発生した場

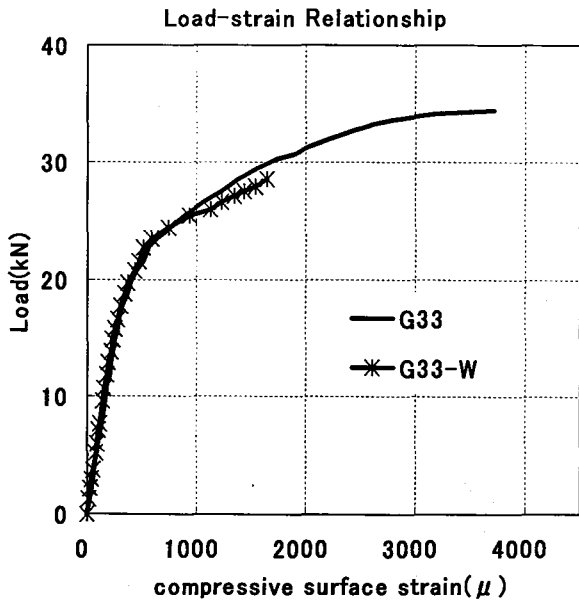


Fig.8 荷重-ひずみ曲線

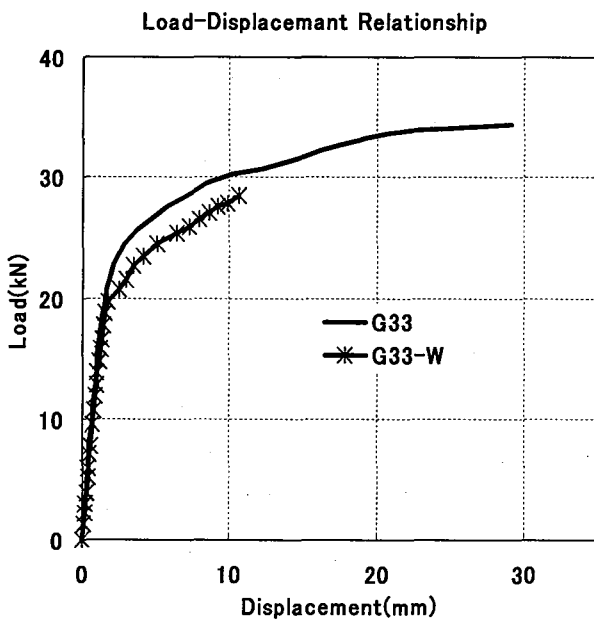


Fig.9 荷重-変位曲線

ないまま終局状態に至っていることが分かる。腐食ひび割れの伸展が激しい供試体については同様の傾向がみられた。

Fig.9 は荷重-変位関係を表したものである。付着破壊へと移行したと思われる供試体については、Fig.9 のように終局荷重、終局変位ともに小さい値となる傾向があった。

以上のような現象が生じるのは、腐食ひび割れの伸展と共にコンクリートの剛性が低下したことなどが影響しているものと推測される。Fig.7 のひび割れ図からもわかる通り、危険断面内において G33 では引張縁から曲げひび割れが伸展しているのに対し、G33-W では危険断面内において引張縁から伸展する曲げひび割れは無く、腐食ひび割れの伸展により PC 部材を挟んで上下にコンクリートが分断された状態となっており、梁の挙動は平面保持の法則に従わない状態となっている。載荷荷重の増加に伴い腐食ひび割れが伸展するため、載荷中は付着が保たれている部分と付着の無い部分が共存した状態となっている。そのため、このような状態で終局にいたる梁では、その力学的メカニズムが非常に複雑である。

今後、既存のポステン式 PC 橋梁の余剰耐力評価を行うに際して、このようにシースの腐食が進んだ梁の力学的メカニズムを明らかにする必要がある。

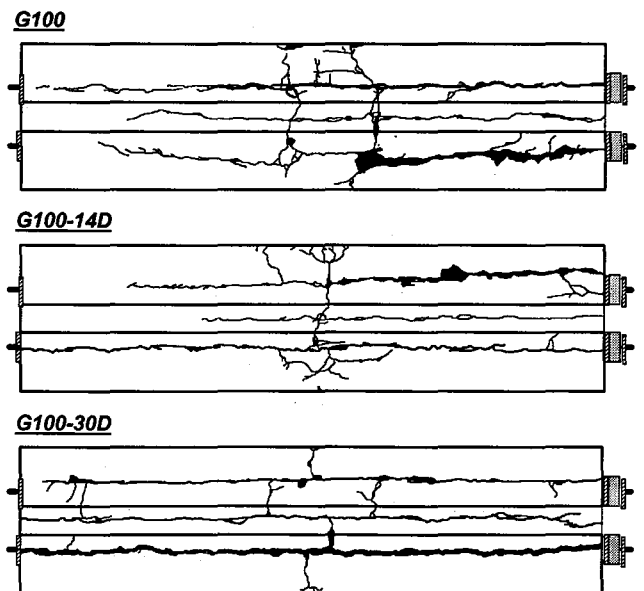


Fig.10 ひび割れ図

### (3) 通電日数と終局状態

Fig.10 は通電日数別の載荷試験後のひび割れ図を表したものである。図の上から通電日数 7 日、14 日、30 日となっている。破壊形式は、通電日数 7 日の供試体では、圧縮縁に圧壊の様子が確認され、曲げ破壊で終局に至ったが、通電日数 14 日のものと 30 日

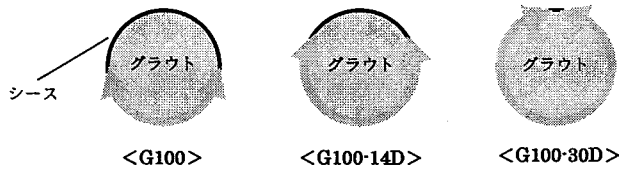


Fig.11 通电日数の増加に伴うシー スの腐食形態

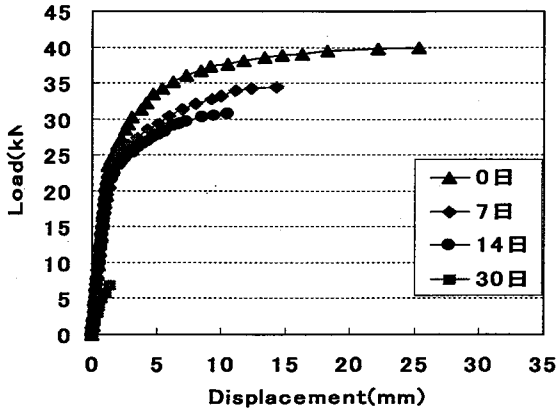


Fig.12 荷重-変位曲線

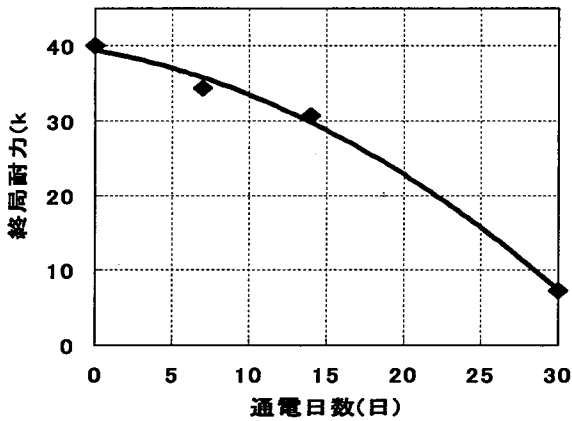


Fig.13 終局荷重と通电日数の関係

のものについては、曲げ破壊では無く、腐食ひび割れの伸展と共に耐力が下がり終局状態へと至った。

Fig.11 は通电日数の増加に伴うシー スの腐食状況を表したものである。図中の矢印は腐食により欠損した部分を表している。腐食促進試験においてシー スは陰極側から欠損をはじめめるためこのように腐食が進んでいく。このことは、載荷試験後に行ったはつり出しにおいて確認している。Fig.10 のひび割れ図から3 供試体について大きな違いは認められないが、Fig.12 の通电日数別の荷重-変位関係からわかるように、終局耐力に大きな差が生じている。これは、Fig.11 のシー スの欠損状態と大きく関係していると

考えられ、シー スの欠損が進むにつれシー スとコンクリートとの付着が取れやすくなったためであると推測される。また、通电日数が進むにつれて終局耐力、終局変位ともに小さな値となっている。このことから、PC 部材の腐食の進行に伴い梁は脆化すると言える。さらに、通电日数 30 日のものについては原型を留めているシー スは確認できず、全面にわたってシー スが欠損した状態であった。

Fig.13 は通电日数と終局耐力を表したグラフである。プロットされた点は実測データを示している。図より、腐食促進試験における積算電流（電流×時間）と実構造物での腐食劣化期間の関係が明らかとなれば、実験的に既設構造物の余剰耐力を推定できることを表している。そのためには、コンクリート中の塩化物イオン濃度と PC 部材腐食量や腐食進行速さの関係や腐食促進試験における通电電位による塩化物イオンの移動速度など、腐食劣化をコントロールする要因について明らかにしなければならない。さらに、実験値と実構造物の関係で不明確な点が多いため、既設のポステン式 PC 橋梁に対して腐食ひび割れ幅や PC 部材界面での塩化物イオン濃度や塩化物イオン浸透速さなどを調査する必要がある。

## 5. まとめ

(1) グラウト充填率が高い場合において梁の長手方向に腐食ひび割れを生じやすい傾向にあった。しかし、PC 鋼材を腐食因子から保護するという点からは、グラウト充填率が高い方が PC 鋼材の腐食が生じる可能性は低くなる。

(2) グラウト充填率が 100%のものでも塩化物イオンの浸透が進めば PC 鋼材の腐食は生じる。本腐食促進試験においては、グラウト充填率 100%の供試体について 30 日間の通电を行った結果、PC 鋼材に 26%もの質量欠損が生じ、健全なものと比較すると 82%もの耐力低下を生じた。

(3) シー スに腐食を生じている梁では、その腐食生成物による膨張圧により曲げひび割れを生じやすい状態となっている。また、供試体側面に発生する腐食

ひび割れはコンクリート剛性の低下やシーズとコンクリートとの付着を低下させ、破壊形式を曲げ破壊から付着破壊へと移行させ終局耐力の低下を引き起こす。この場合、終局時の荷重、変位ともに曲げ破壊するときよりも小さい値で終局に至る傾向にあった。これについては、今後、既設構造物の余剰耐力評価と結びつけるために力学的メカニズムの解明が必要である。

(4) 通電日数の増加と共に終局荷重、終局変位ともに小さい値となり、梁が腐食劣化していくに従い脆化することが分かった。本試験で得られた結果では、終局荷重と通電日数に相関関係が認められた。今後は、腐食促進試験における通電日数と実構造物での腐食劣化期間の関係、コンクリート中の塩化物イオン濃度と PC 部材腐食量や腐食進行速さの関係、腐食促進試験における通電電位による塩化物イオンの移動速度など、さらには既設のポステン式 PC 橋梁に対して腐食ひび割れ幅や PC 部材界面での塩化物イオン濃度や塩化物イオン浸透速さなど調査する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 松島学、関博、横田優：鉄筋腐食によるひび割れモードのモデル、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.57、No5、pp.696-697、2000.9
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ、鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向ーコンクリート委員会腐食防食小委員会報告ー、No.26、pp.113-161、1997
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ、鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その 2)ーコンクリート委員会腐食防食小委員会(2 期目)報告ー、No.40、pp.248-256、2000