

## 報告 表面被覆を施した RC 部材の長期耐久性に関する検討

加藤 絵万<sup>\*1</sup>・岩波 光保<sup>\*1</sup>・横田 弘<sup>\*2</sup>・堤 知明<sup>\*3</sup>

**要旨**：表面被覆による補修後 14 年が経過した栈橋上部工の補修効果に関する調査結果について報告した。また、補修を施した RC 部材の長期間の構造性能を把握するために、表面被覆を施した RC はりの劣化状況と構造性能の関係について実験的検討を行った。その結果、塩害が生じた RC 構造物に表面被覆を施す場合、コンクリート内部の塩化物イオンを除去する対策、あるいは電気化学的な補修対策を講じなければ、補修効果の長期にわたる持続は期待できないこと、また、表面被覆を施した RC はりの耐荷性および変形性は、腐食による鉄筋の断面減少を考慮することで評価が可能であることが確認された。

**キーワード**：補修，表面被覆，鉄筋腐食，耐荷性，変形性，再劣化

### 1. はじめに

海洋環境下に曝される RC 構造物では、劣化の進行がきわめて速い。特に、栈橋式係船岸の上部工（以下、栈橋上部工）は、波浪、干満等の作用によりコンクリート中に塩化物イオンが浸透しやすいだけでなく、酸素の供給量も多いことから、鉄筋の腐食速度が非常に大きい。このような劣化が生じた RC 部材に対しては、その劣化程度に応じて表面被覆、断面修復、電気防食等の補修対策が施される。しかし、補修を施した RC 部材の長期耐久性に関する検討は少ないため、補修効果の定量的評価は実現されていないのが現状である。

本報告では、表面被覆後 14 年が経過した栈橋上部工の補修効果に関する調査結果について報告する。また、表面被覆を施した RC 部材の長期間の構造性能を把握することを目的として行った、RC はりの載荷実験について報告する。

### 2. 栈橋上部工の再劣化調査

#### 2.1 施設概略

調査対象とした施設は、東京湾内の栈橋上部工である。1969 年に建設された後、塩害による



写真-1 栈橋上部工の再劣化状況

劣化が認められたことから、1987 年に表面被覆による補修工事が行われた。この際、被覆材として主にポリブタジエン樹脂が用いられ、断面修復や電気防食等の対策は行われなかった。1999 年頃から、被覆材表面に鉄筋腐食に起因するひび割れや剥離等（写真-1）が確認されたため、2001 年に鉄筋の防錆処理、断面修復、表面被覆による再補修工事が行われた。

#### 2.2 調査概略

2001 年に行われた劣化度調査結果、およびコンクリートコアの塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) 濃度測定結果より、表面被覆を施した RC 構造物の長期耐久性について検討した。

図-1 に、調査対象とした部材とコンクリートコア採取位置を示す。部材位置と海面 (L.W.L.)

\*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 博(工) (正会員)

\*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 博(工) (正会員)

\*3 東京電力(株) 技術開発研究所 建設技術グループ 博(工) (正会員)

表-1 劣化度判定基準<sup>1)</sup>

	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆がみられる	一部に錆汁がみられる	錆汁多し	浮きさび多し	浮きさび著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れが見られる	ひび割れやや多し	ひび割れ多し	幅数mm以上のひび割れ多数	(かぶりの状況で判断)
かぶりの剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる	一部に剥離・剥落がみられる	剥離・剥落多し	剥離・剥落が著しい

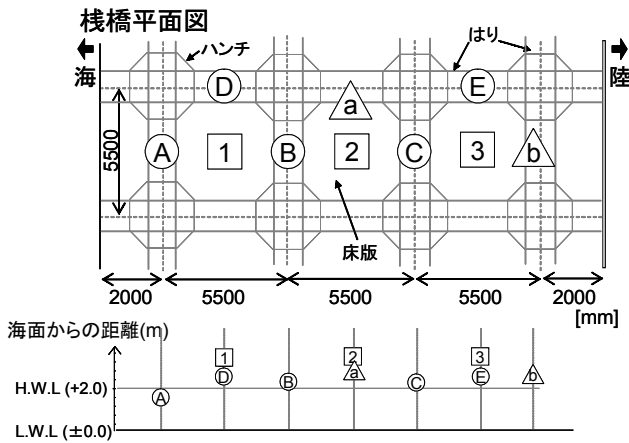


図-1 部材およびコア採取位置

および H.W.L.) の関係は図-1 に示したとおりである。劣化度判定は、表-1 に基づいて、目視により部材毎に行った。なお、ひび割れ位置以外では、被覆材自体の劣化は見られなかった。コンクリートコアは、はり A~E および床版では下面から、はり a および b では側面から採取した。それぞれのコアについて、被覆材表面から 20mm 毎の全  $\text{Cl}^-$  濃度分布を、JCI 法に基づいて測定した。

### 2.3 調査結果と考察

図-2 に床版 1~3 のコンクリート中の  $\text{Cl}^-$  濃度分布を示す。主筋のかぶりは 50~70mm であったが、床版 1 および 3 において、この位置の  $\text{Cl}^-$  濃度は、腐食発生限界濃度である  $1.2\text{kg/m}^3$  を上回る値となった。また、全ての床版において、表面付近よりも表面から 20~40mm の  $\text{Cl}^-$  濃度が高くなる傾向が見られた。

はり A~E の  $\text{Cl}^-$  濃度分布を図-3 に示す。鉄筋のかぶりは、スターラップで 20~50mm、主筋で 100mm 程度であり、はり A~E の  $\text{Cl}^-$  濃度は、スターラップ位置において腐食発生限界濃

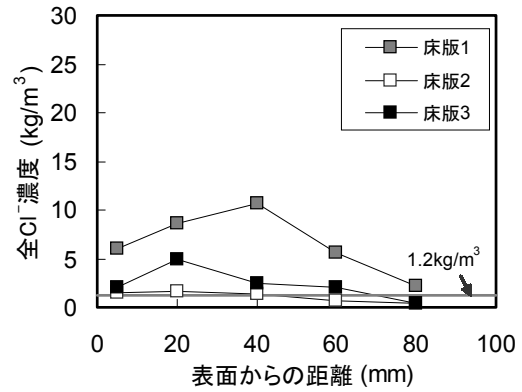


図-2 塩化物イオン濃度分布 (床版)

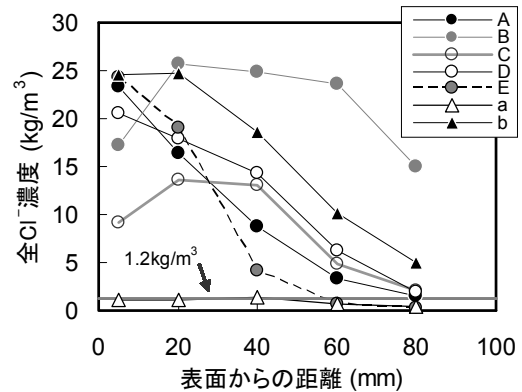


図-3 塩化物イオン濃度分布 (はり)

度を大幅に上回る値であった。また、はり B および C では、表面付近よりも内部の  $\text{Cl}^-$  濃度が高くなった。はり側面における  $\text{Cl}^-$  濃度分布を、図-3 にあわせて示す。はり a は、他と比較して最も  $\text{Cl}^-$  濃度が小さかった。

図-1 から、床版におけるコア採取位置は、H.W.L.より上方、かつ、はりのコア採取位置より上方に位置するため、床版の  $\text{Cl}^-$  濃度ははりと比較して全体的に小さくなったことが考えられる。しかし、鉄筋位置において腐食発生限界濃度を超える  $\text{Cl}^-$  を有するにもかかわらず、被覆材表面に損傷は認められず、鉄筋腐食は生じていなかった。これに加えて、全ての床版において表面付近よりも内部の  $\text{Cl}^-$  濃度が高い値を示したことから、床版では被覆材の補修効果が持続していたことが推測される。つまり、外部からの水および酸素の供給が絶たれたことにより、鉄筋腐食が進行せず、腐食ひび割れの発生等被覆材の損傷を招く現象は生じなかった。そ

のため、補修前に侵入した  $Cl^-$  がコンクリート内部で拡散し、**図-2** のような濃度分布を示したことが考えられる。

床版と同様に考察すると、はり下面では、はり B および C、はり側面では、はり a において、被覆材の補修効果が持続していたことが推測できる。その他については、補修後の鉄筋腐食に起因するひび割れや剥離等により、内部に新たに  $Cl^-$  が侵入したために、表面の  $Cl^-$  濃度が最も高い濃度分布となったことが考えられる。この現象は、コア採取位置の海面からの距離によらず、海側のはり、および土留め護岸からの反射波の影響を受ける陸側のはりにおいて見られた。このことから、補修効果を考慮する際には、海面からの距離だけではなく、特に波浪の影響についても検討する必要があるといえる。

**表-2** に各部材の劣化度を示す。劣化度の分布は、 $Cl^-$  濃度分布より推測した補修効果と概ね同様の傾向を示した。しかし、これらは被覆を施していない部材を対象とした判定方法に基づいて評価されたものである。被覆を施した部材では、鉄筋腐食によりコンクリートにある程度以上の幅を持つひび割れが生じた後、被覆材にひび割れや剥離等が生じることが予測される。つまり、被覆を施していない部材と比較して、劣化が表面化するまで長い時間を要することが考えられる。したがって、外観から両者の劣化度が同じと判定された場合、被覆材内部のコンクリートおよび鉄筋の劣化の方が、実際は進行していることが推測される。このことから、今後、構造物の適切な維持管理を行うためには、補修を施した部材を対象とした点検・調査方法および劣化度判定方法の確立が必要である。

既往の研究<sup>2)</sup>によれば、 $Cl^-$  が侵入していない初期段階において、RC 部材に適切な表面被覆を行うことは、塩害対策として有効な手段であり、長期においてその効果が持続することが確認されている。しかし、既に塩害を生じた RC 部材の補修を目的として表面被覆を施す場合、断面修復や脱塩等、内部に存在する  $Cl^-$  を除去

表-2 部材の劣化度

部材	No.	劣化度	部材	No.	劣化度
はり	A	Ⅲ	はり	a	Ⅲ
はり	B	Ⅱ	はり	b	Ⅲ
はり	C	Ⅲ	床版	1	Ⅱ
はり	D	Ⅳ	床版	2	Ⅱ
はり	E	Ⅲ	床版	3	Ⅱ

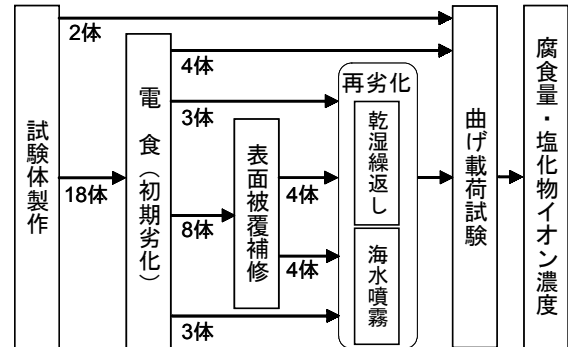


図-4 実験フロー

表-3 試験体一覧

No.	電食	補修	促進劣化	No.	電食	補修	促進劣化
1	—	×	—	11	3	○	乾湿
2	—	×	—	10	3	○	噴霧
3	1	○	×	11	5	○	乾湿
4	1	○	×	12	5	○	噴霧
5	1	○	×	15	5	○	乾湿
6	1	○	×	16	5	○	噴霧
7	1	○	○	17	8	○	—
8	1	○	○	18	8	○	—
9	3	○	×	19	8	○	乾湿
10	3	○	×	20	8	○	噴霧

する対策、あるいは電気化学的な補修対策を講じなければ、鉄筋腐食に起因するひび割れや被覆材の剥離等の再劣化が生じ、補修効果の持続は期待できない可能性があることが確認された。

### 3. 表面被覆を施した RC はりの長期耐久性に関する実験的検討

#### 3.1 実験概要

表面被覆を施した RC 部材の長期耐久性の把握を目的として、RC はりの載荷実験を行った。以下に実験概要を述べる。また、実験フローを **図-4** に、試験体一覧を表 **表-3** に示す。

##### (1) 試験体概要

**図-5** にはり試験体の概要を示す。また、コンクリートの示方配合を表 **表-4** に、鉄筋の物性

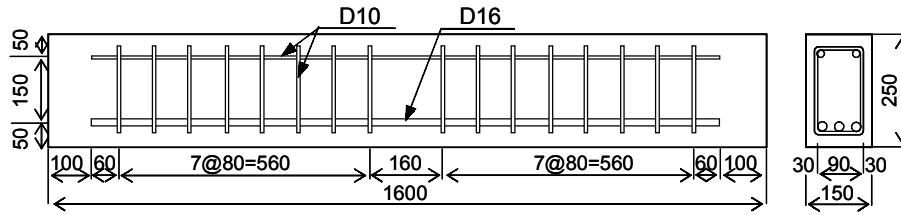


図-5 試験体概要

表-4 コンクリートの配合

G <sub>max</sub> (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	Ad
20	8	65	4	48	160	246	994	997	0.98

C: 早強ポルトランドセメント, S: 細骨材(鬼怒川産川砂), G: 粗骨材(鬼怒川産碎石)  
Ad: AE剤

表-5 鉄筋の物性値

種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )
D10	365	512
D16	361	503

表-6 被覆材料

工程	使用材料
プライマー	エポキシ系(湿潤)
パテ	エポキシ系(湿潤)
中塗り	厚膜型エポキシ系
仕上げ	フッ素系

値を表-5 に示す。はり試験体には、主鉄筋としてSD295A-D16を3本、せん断補強筋としてSD295A-D10を配置した。

製作から十分期間を経た後、はり試験体を海水中に浸せきし、鉄筋表面積あたり8.5A/m<sup>2</sup>の直流電流を印加することで、コンクリート内部の鉄筋を腐食させた。その際、はり試験体の軸方向に腐食によるひび割れが発生するまでの時間を $Q$ と定義し、これを基準電食期間として、 $1Q$ ,  $3Q$ ,  $5Q$ および $8Q$ の電食期間を設定した。本実験における基準電食期間 $Q$ は51時間であった。あわせて、電食を施さないはり試験体を2体用意した。

所定の電食期間終了後、はり試験体にエポキシ系樹脂を用いたひび割れ充填、および表-6に示す材料を用いて表面被覆を施した。

## (2) 促進劣化試験

電食により劣化したはり試験体、および補修を施したはり試験体に対して、さらに劣化を進行させるため、温海水への乾湿繰返し、または海水噴霧を行った。温海水への乾湿繰返しは、はり試験体を大型タンク内に設置し、60°Cの温海水を用いて行った。1サイクルは、湿潤状態で3.5日、乾燥状態で3.5日の合計7日とし、122サイクル(おおよそ2年半)実施した。また、海水噴霧は、はり試験体を、実海域より採取した海水が1日2回、3時間にわたって噴霧される、港湾空港技術研究所内海水噴霧施設に暴露した。暴露期間は3年半とした。

## (3) 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は、支点間隔1200mmの2点単純支持の条件下で、載荷点間隔400mmの対称2点載荷で行った。加力は一方向単調載荷とし、載荷点および支点の片側には、2枚のテフロンシート(厚さ2mm)を挿入した。なお、本研究では、はり試験体に電食を施すことを考慮し、鉄筋にひずみゲージを貼り付けていない。したがって、スパン中央の鉛直変位が急激に増加した段階をはりの降伏とした。

載荷中は、支点、載荷点およびスパン中央の鉛直変位、および載荷荷重を計測した。

## (4) 鉄筋腐食量およびCl<sup>-</sup>濃度の測定

載荷試験終了後、等モーメント区間の主鉄筋3本をはり出し、腐食量を測定した。1次処理としてサンドブラスト処理を、2次処理として10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液への浸せきを行い、腐食生成物を完全に除去した。その後、それぞれの鉄筋100mm毎の質量減少量を測定し、等モーメント区間における鉄筋断面積の平均減少率を算定した。

また、はり試験体解体時に主鉄筋近傍のモルタルを採取し、JCI法に基づいて全Cl<sup>-</sup>濃度を測定した。得られた値は、コンクリートの配合上の単位量および密度を用いて、コンクリート中の全Cl<sup>-</sup>濃度に換算した。

## 3.2 実験結果と考察

### (1) 補修効果に関する考察

載荷試験前にはり試験体を観察した結果、促

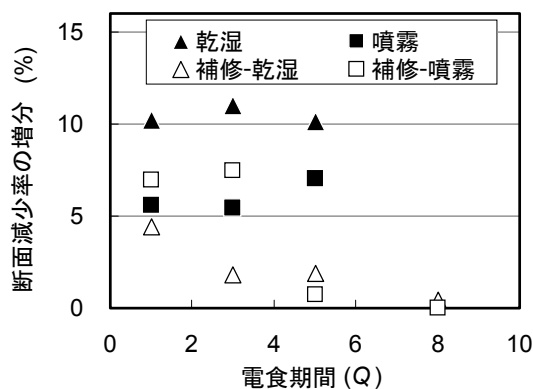


図-6 促進劣化による平均断面減少率

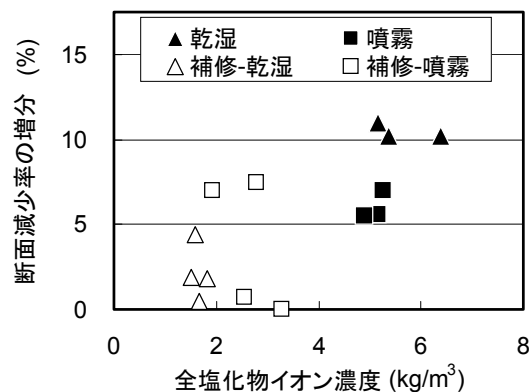


図-7 断面減少率の増加と全 Cl<sup>-</sup>濃度の関係

進劣化による被覆材の変状は認められなかった。

表面被覆後の鉄筋腐食の進行を確認するため、それぞれの断面減少率から電食による断面減少分を差し引いた値、すなわち促進劣化のみによる鉄筋断面減少率の増分を図-6に示す。電食による断面減少として、1Qおよび8Qの場合、試験体 No.1, 2 および No.17, 18 の実測断面減少率の平均値を用いた。3Qおよび5Qについては、1Qおよび8Qの平均断面減少率から、ファラデー則に基づいて内挿した値を用いた。

図-6より、被覆を施していない試験体の鉄筋断面減少率の増加は、それぞれの促進劣化方法についてほぼ一定であった。これは、各劣化方法で腐食速度が一定であったことを示しており、乾湿繰返しは、海水噴霧と比較して、3~4倍の劣化速度であったといえる。被覆を施した試験体では、電食期間が長いほど、鉄筋断面減少率の増加は小さかった。

ここで、図-7にCl<sup>-</sup>濃度と鉄筋の平均断面減少率の増分との関係を示す。被覆を施した試験体は、被覆を施していない試験体と比較して、Cl<sup>-</sup>濃度が小さいことは明らかである。また、腐食発生限界濃度を超えるCl<sup>-</sup>を有するにもかかわらず、促進劣化による鉄筋断面減少率の増分は少なかった。したがって、補修後、外部からの水および酸素の供給がなかったことが推測できるため、はり試験体における補修効果は、促進劣化中も持続していたことが考えられる。また、電食期間が長いほど鉄筋断面減少率の増

分が小さくなったが、これは、腐食反応や電気分解等により試験体内部の酸素消費量が増加したために、電食後の酸素残存量が少なくなったことが原因として考えられる。

## (2) 構造性能に関する考察

図-8に鉄筋の平均断面減少率とはり試験体の見かけの剛性の関係を、図-9に鉄筋の平均断面減少率とはり試験体の終局変位の関係を示す。見かけの剛性は、はりの降伏荷重 $P_y$ を降伏変位 $\delta_y$ で除した値とした。また、終局変位 $\delta_u$ は、降伏荷重 $P_y$ を下回らない荷重での最大の変位とした。なお、促進劣化を行っていないはり試験体については、載荷試験中、はりの鉛直変位が計測できなかったため記載していない。

図-8および図-9に示した全データの回帰線から分かるように、はり試験体の見かけの剛性および終局変位は、鉄筋の平均断面減少率が大きいほど低下する傾向となった。これより、RCはりの変形性は、補修の有無や促進劣化方法を問わず、腐食による鉄筋の平均断面減少率を用いて評価が可能であると考えられる。

また、図-10に鉄筋の平均断面減少率とはり試験体の最大荷重の関係を示す。はりの最大荷重は、変形性と同様、鉄筋の平均断面減少率が大きいほど低下する傾向を示した。ここで、図-10の実線は、鉄筋の断面減少を考慮し曲げ理論により求めた計算値、破線は断面減少に加えて、孔食等による鉄筋の力学的性質の低下を考慮した計算値を示す<sup>3)</sup>。このとき、コンクリー

トの物性値として、はり試験体製作時に同一バッチから採取したコンクリート（φ150×300mm）の標準養生 28 日後における圧縮強度 29.2N/mm<sup>2</sup>、およびヤング率 26.8kN/mm<sup>2</sup>を用いた。これより、RC はりの耐荷性は、補修の有無や促進劣化方法を問わず、腐食による鉄筋の平均断面減少率を考慮することで評価が可能であるといえる。既往の報告<sup>3)</sup>によれば、孔食による応力集中などの影響により、腐食による断面減少分以上に鉄筋の力学的性質が低下するとされているが、本研究では、主筋が D16 と比較的太径であったために、局部的腐食の影響が顕著に表れなかったことが考えられる<sup>4)</sup>。

#### 4. まとめ

- (1) 塩害が生じた RC 構造物に表面被覆を施す場合、内部に存在する Cl<sup>-</sup>を除去する対策、あるいは電気化学的な補修対策を講じなければ、鉄筋腐食に起因するひび割れや被覆材の剥離等の再劣化が生じ、補修効果の持続は期待できない可能性がある。
- (2) 表面被覆を施した RC はりの耐荷性および変形性は、腐食による鉄筋の平均断面減少率を考慮することで評価が可能である。

#### 謝辞

本報告の一部は、東京電力（株）と（独）港湾空港技術研究所の共同研究（海洋環境下のコンクリート構造物に対する補修効果の定量評価手法に関する共同研究）の成果である。また、実験にご協力頂いた中村晃史氏（港空研 依頼研修員、若築建設（株））、佃有射氏（港空研 実務訓練生、長岡技術科学大学大学院）に、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 運輸省港湾技術研究所 編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.6，沿岸開発技術研究センター，1999

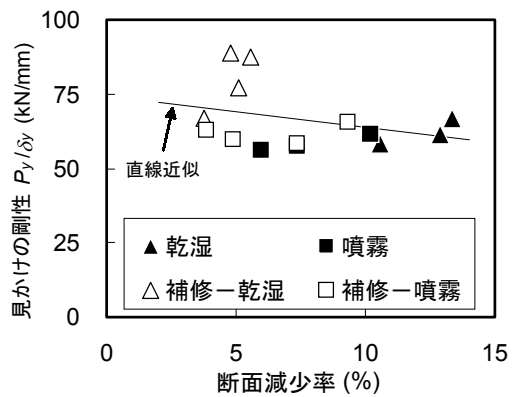


図-8 平均断面減少率と見かけの剛性の関係

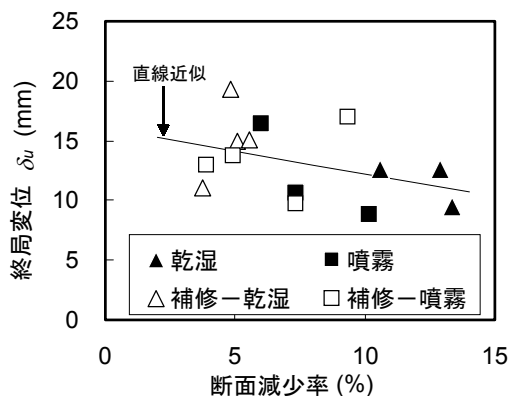


図-9 平均断面減少率と終局変位の関係

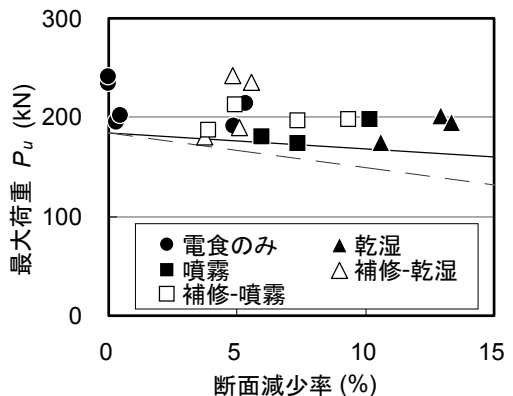


図-10 平均断面減少率と最大荷重の関係

- 2) 山路ほか：海洋環境に 15 年暴露されたコンクリートにおける表面被覆の塩害防止効果，JCI 年次論文集，Vol.25，No.1，pp.833-838，2003
- 3) JCI：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会 報告書，1998
- 4) 岩波ほか：鉄筋腐食が RC はりの耐荷性能に及ぼす影響，JCI 年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1501-1506，2002