

論文 繰返し荷重を受ける RC 柱の構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響

加藤 絵万^{*1}・岩波 光保^{*2}・伊藤 始^{*3}・横田 弘^{*4}

要旨：鉄筋腐食が生じた RC 部材の構造性能に関して、一定軸力作用下において正負交番水平荷重を受けた場合の耐荷性およびじん性を評価した。その結果、鉄筋の腐食程度に応じて RC 柱の構造性能は低下し、軸力作用下における部材の構造性能は、鉄筋の局所的な腐食に影響されることがわかった。また、RC 柱の耐荷性は主筋の腐食により、じん性は、特に帯筋の腐食に影響された。

キーワード：鉄筋腐食, RC 柱, 正負交番水平載荷試験, 耐荷性, じん性

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の構造性能が、鉄筋の腐食程度に少なからず影響されることは周知の事実である。しかし、鉄筋腐食程度と構造性能の低下の関係については、現在のところ、定量的な評価がなされているとは言い難い。

著者らは、これまで、鉄筋腐食が生じた RC 部材の構造性能に関して、種々の検討を行っている¹⁾。本研究では、一定軸力作用下において鉄筋が腐食した RC 柱試験体の正負交番水平載荷を実施し、鉄筋腐食が耐荷性およびじん性に及ぼす影響について検討した。

これまで著者らが行った RC はりの正負交番曲げ載荷試験によれば、RC はりの耐荷性は主筋の腐食に、じん性は、特にせん断補強筋の腐食に依存していた。そこで、本研究においても、主筋および帯筋の鉄筋腐食を区別し、それぞれの鉄筋腐食が RC 柱の構造性能に及ぼす影響について考察した。

2. 実験概要

2.1 試験体の寸法・諸元

図-1に柱試験体の概要を示す。柱試験体は道路橋示方書²⁾に基づいて曲げ破壊型で設計したものであり、柱断面は450mm×450mmの正方

形、フーチングの寸法は1350mm×1350mm×500mmである。主鉄筋としてSD345-D10を、帯鉄筋としてSD295-D6を用いた。試験体は、健全な柱試験体 (N)、電食により鉄筋を腐食させた柱試験体 (AおよびB) の計3体である。各試験体は製作時期が異なるため、配合およびコンクリート強度が若干異なる。表-1に載荷試験時のコンクリートの物性値および鉄筋の物性値を示す。

2.2 電食方法

図-2に電食方法の概要を示す。試験体AおよびBの鉄筋を腐食させるため、主筋24本を繋いだリード線を柱部上面より外部に露出させ、約6.0Aの直流電流を印加した。電食期間を変化させることにより、試験体AとBの鉄筋の腐食程度を調整した。電食は柱基部から高さ500mmの範囲で行い、この範囲に、陰極としてステンレス板を、コンクリートの湿潤を保つことを目的として、海水で湿潤させた養生シートを設置した。

2.3 正負交番水平載荷試験

試験体フーチング部をPC鋼棒で反力床に固定し、反力壁に設置したアクチュエータ (容量1000kN, ストローク400mm) により柱頂部に正負交番水平荷重を作用させた。作用位置は、柱基部から高さ1700mmとした。よって、本試験

*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 研究官 博 (工) (正会員)

*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 主任研究官 博 (工) (正会員)

*3 独立行政法人 港湾空港技術研究所 客員研究員 (前田建設工業 (株)) 工修 (正会員)

*4 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)

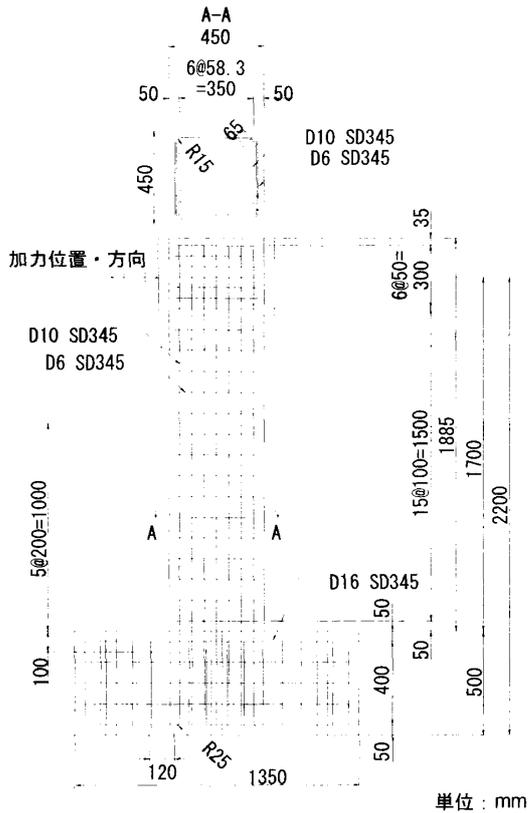


図-1 柱試験体の概要

におけるせん断スパン比は4.25である。軸力は、柱断面に一定の軸圧縮応力 (1.0N/mm²) が生じるように、油圧ジャッキにより作用させた。水平荷重は、載荷試験時に決定した見かけの降伏変位 $\delta_{y,exp}$ を基本とし、水平変位が $\delta_{y,exp}$ の整数倍に達した後に除荷する水平荷重を3サイクルずつ繰返し作用させた。ここで、本研究では柱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付けていない。したがって、初期載荷において水平荷重作用位置での柱試験体の水平変位 (以下、単に水平変位) が急激に増加した点を見かけの降伏変位 $\delta_{y,exp}$ とした。表-2に各試験体における見かけの降伏変位 $\delta_{y,exp}$ を示す。

正負交番水平載荷試験は、水平荷重が低下して降伏荷重に達するまで行い、この時点を終局状態と定義した。載荷試験中には、水平荷重、鉛直荷重、水平変位、フーチングからの柱部伸出量、柱部曲率を計測した。フーチングからの柱部伸出量は、試験体Nの場合、柱基部から50mm、試験体AおよびBの場合、柱基部から

表-1 コンクリート・鉄筋の物性値

柱No.	コンクリート		鉄筋			
	圧縮強度	ヤング率	種類	降伏強度	引張強度	ヤング率
N ³⁾	42.0	3.2×10 ⁴	主筋	388	587	2.0×10 ⁵
			帯筋	319	507	2.0×10 ⁵
A, B	36.0	3.3×10 ⁴	主筋	377	607	1.9×10 ⁵
			帯筋	324	544	1.9×10 ⁵

単位: N/mm²

表-2 見かけの降伏変位 $\delta_{y,exp}$

柱No.	N	A	B
正	4.9	4.5	4.0
負	4.9	5.5	4.0

単位: mm

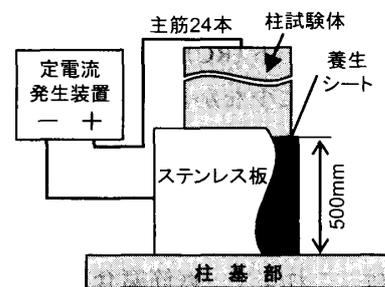


図-2 電食方法の概要

30mmの位置で計測し、柱部曲率は試験体の引張側と圧縮側の軸方向変位から求めた。

2.4 鉄筋腐食の評価

載荷試験終了後、試験体AとBの柱基部から高さ400mmまでの主筋24本と帯筋4本をはつりだし、それぞれの質量減少量を測定した。鉄筋の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、腐食生成物を取り除いた。

ここで、電食範囲は約500mmであったが、柱基部から高さ400~500mmの範囲では、腐食の発生がほとんど認められなかった。これは、この範囲における養生シートが十分な湿潤状態に保たれていなかったことが原因と考えられる。したがって、柱基部から高さ400mmまでに位置する鉄筋の質量減少率を用いて議論を進める。また、ここで、測定した鉄筋は載荷試験により塑性変形が生じている。したがって、主筋については、載荷試験前の位置から鉄筋長さを決定し、柱基部から高さ150mmまでとそれ以外の区

間について質量減少率を測定した。帯筋については、折曲げ部を除いた4側面の直線部分（約200mm）の実測長さを用いて質量減少量を測定した。

表-3に主筋および帯筋の質量減少率を示す。主筋については、全体および載荷方向を区別して表示した。全体欄は主筋24本に対して、全ての質量減少測定値の平均、最大および最小値を示す。正・負欄は、それぞれの方向に載荷した際の引張側最外縁主筋7本に対して、また帯筋については全測定値に基づいて、同様に求めた値である。主筋、帯筋ともにほぼ均一に腐食し明らかな孔食は認められなかったが、質量減少率は若干のばらつきがみられた。

表-3 各試験体の鉄筋の質量減少率

鉄筋	柱No.	A			B		
		全体	正	負	全体	正	負
主筋	平均	2.9	3.6	2.2	6.2	9.4	4.6
	最大	6.2	6.2	4.7	13.2	13.2	12.0
	最小	0.5	1.7	0.5	0.7	5.2	1.5
帯筋	平均	5.6			20.0		
	最大	9.5			37.3		
	最小	1.3			12.0		

単位：%

3. 実験結果と考察

3.1 破壊性状

図-3に各試験体の $5\delta_{y,exp}$ 載荷終了時におけるひび割れ発生状況を示す。図-3の試験体Bにおける破線は、電食試験により生じた腐食ひび割れを示す。鉄筋腐食を生じたRCはりの正負交番曲げ載荷試験¹⁾の場合と同様、試験体Bにおいては、載荷により発生したひび割れが、腐食ひび割れによって方向が変化する現象が見られた。また、試験体AおよびBにおいて、電食終了時点では観察されなかった腐食ひび割れとみられるひび割れが、繰返し載荷により表面に現れる現象も見られた。前述のRCはりの試験結果と比較すると、柱試験体の鉄筋腐食によるひび割れ分散性の低下は顕著に現れなかった。これは、各試験体において損傷領域が柱基部に集中したために、鉄筋腐食の影響がひび割れ分散性に現れにくかったことが原因と考えられる。

かぶりコンクリートの剥落は試験体Nで $9\delta_{y,exp}$ 時、試験体AおよびBで $10\delta_{y,exp}$ 時に確認された。主筋の破断は、試験体Nで $10\delta_{y,exp}$ 時に、試験体Aで $13\delta_{y,exp}$ 時、試験体Bで $12\delta_{y,exp}$ 時に確認された。なお、いずれの試験体でも帯筋の破断は認められなかった。

写真-1に載荷試験終了時における柱基部の

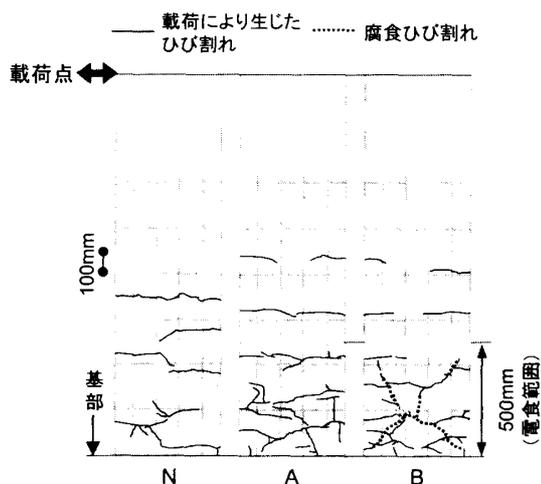


図-3 ひび割れ発生状況（ $5\delta_{y,exp}$ 終了時）



写真-1 柱基部の損傷状況（載荷試験終了時）

損傷状況を示す。鉄筋腐食の程度にかかわらず、全試験体において曲げ降伏による塑性ヒンジの形成が認められた。

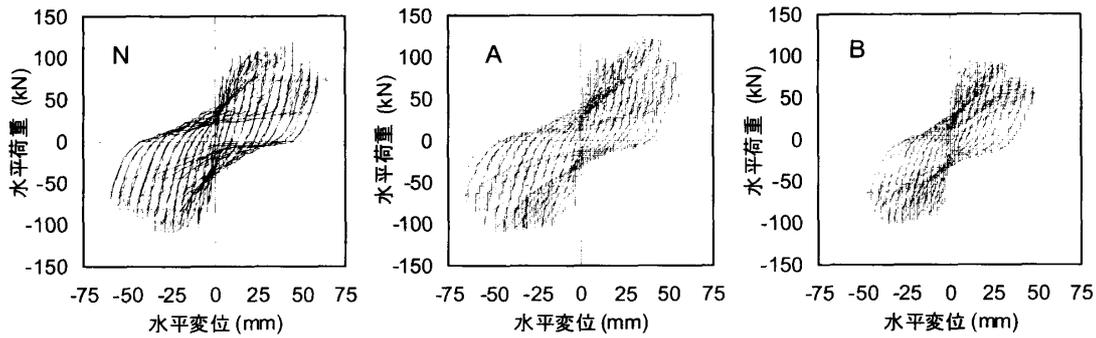


図-4 水平変位—水平荷重関係

3.2 荷重—変位関係

図-4 に各試験体の荷重履歴曲線を示す。これによれば、腐食程度が大きくなるほど、耐荷性、変形性ともに小さくなるのが分かる。ここで、試験体 A の正側荷重 $6 \sim 10\delta_{y,exp}$ において、水平荷重の急激な増加が見られた。これは、軸方向荷重治具の滑り不良が原因と考えられるため、試験体 A の正側荷重の最大荷重時以降については、今後、考察から省くこととする。

図-5 に試験体 N で $8\delta_{y,exp}$ 、試験体 A および B で $9\delta_{y,exp}$ までの水平変位と柱部の軸方向への伸出し量の関係を示す。前述のとおり、試験体 N と試験体 A および B で、計測点の位置が異なる。したがって、試験体 N における計測値は、試験体 A および B と比較して、柱部の曲げ変形の影響を受ける可能性が高いことを付記する。図-5 によれば、水平変位と柱部伸出し量はほぼ比例関係にあり、その増加割合には腐食程度による差違は特に認められなかった。したがって、本論文では、水平荷重作用位置の水平変位が部材の水平変位を代表するとして取り扱うこととする。

表-4 に各試験体の構造性能を示す。なお、表中の降伏変位は荷重板および基部の水平荷重作用方向のずれを補正して得られた値であり、見かけの降伏変位 $\delta_{y,exp}$ と異なることを付記する。降伏荷重および最大荷重は、腐食程度が増加するにしたがって、減少する傾向が見られた。これは、腐食による鉄筋の断面減少および鉄筋とコンクリート間の付着劣化の影響と考えられる。降伏変位については、各試験体で大きな差異は

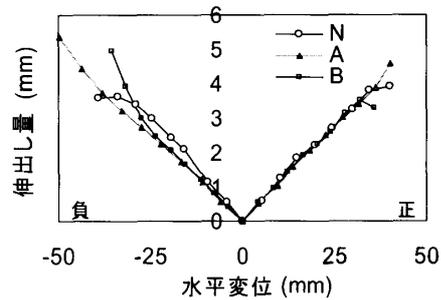


図-5 水平変位と軸方向伸出し量の関係

表-4 各試験体の構造性能

性能	柱No. N		A		B	
	正	負	正	負	正	負
降伏荷重 (kN)	83.9	87.8	80.4	85.1	79.3	81.1
降伏変位 (mm)	5.3	4.4	4.1	5.4	4.3	4.4
最大荷重 (kN)	119.4	111.1	—	107.5	94.0	102.0
終局変位 (mm)	59.9	48.2	—	61.3	39.5	46.1

みられなかったが、終局変位については、主筋、帯筋ともに最も腐食していた試験体 B 正側荷重において著しい低下がみられた。

3.3 曲率分布

荷重試験中、柱基部から高さ 500mm の範囲で柱部曲率の鉛直方向分布を計測した。図-6 に、それぞれの試験体における $\pm 1\delta_{y,exp}$ 、 $\pm 4\delta_{y,exp}$ 、 $\pm 8\delta_{y,exp}$ 荷重時の曲率分布を示す。これによれば、試験体 N と比較して、試験体 A および B は、特に柱基部の曲率が大きくなった。躯体変形が柱基部に局所化した理由として、鉄筋腐食による鉄筋断面の減少や、鉄筋腐食にともなう腐食ひび割れの発生だけでなく、鉄筋とコンクリート間の付着劣化の影響が考えられる。付着劣化の影

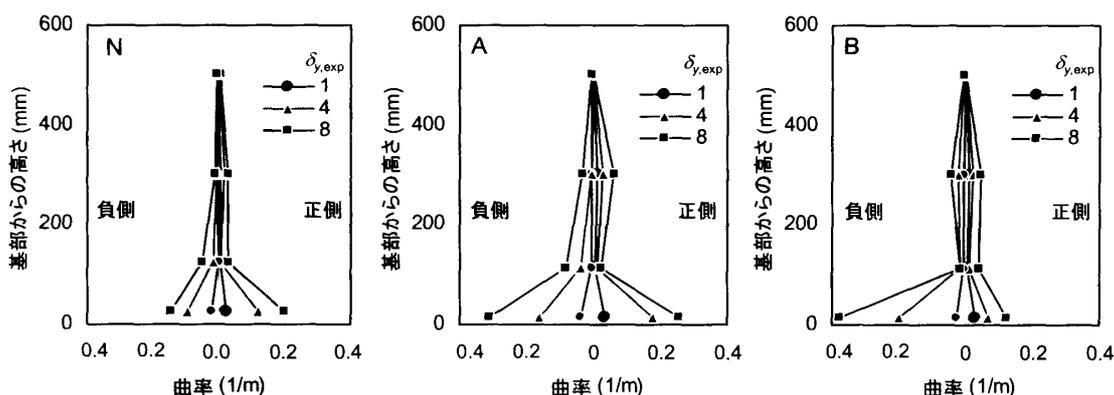


図-6 曲率分布

響によりひび割れ分散性が低下したために、柱基部のある特定のひび割れにのみ曲げ変形が集中し、その結果、塑性変形の繰り返し作用に対する抵抗性が低下したことが推測される。

また、試験体Nと比較すると、試験体AおよびBは、正側および負側荷重方向で非対称な曲率分布となった。表-3に示したように、試験体AおよびBにおいて、鉄筋腐食は主筋・帯筋ともに一様に生じていない。この腐食程度の非一様性が、正側および負側荷重方向の曲率分布の非対称性に影響したことが考えられる。

3.4 構造性能評価に関する検討

本研究では、表-1に示したように、各試験体でコンクリートと鉄筋の物性値が異なる。しかし、それぞれの物性値を用いて、各試験体が健全である場合の構造性能を道路橋示方書²⁾により計算した結果、試験体Nと試験体AおよびBの構造性能に大きな差はなかった。したがって、各実験値を用いて鉄筋腐食が構造性能に及ぼす影響を評価できるものとした。

図-7に主筋の見かけの質量減少率と降伏荷重の関係、図-8に主筋の見かけの質量減少率と最大荷重の関係を示す。降伏荷重比と最大荷重比は、各試験体の降伏荷重と最大荷重を、N試験体の平均降伏荷重と平均最大荷重でそれぞれ除したものである。また、図-7および図-8の実線は、主筋断面積の減少を考慮して道路橋示方書²⁾に基づき計算した降伏荷重比、最大荷重比を表す。また、既往の研究によれば、孔食

による応力集中などの影響により、腐食による質量減少分以上に鉄筋の見かけの降伏点が低下すると報告されている⁴⁾。そこで、この考えに基づいて鉄筋腐食による見かけの降伏点低下を考慮した⁴⁾ 柱試験体の降伏荷重比および最大荷重比の計算値を破線で示す。

図-7より、降伏荷重比については、主筋の最大質量減少率のみを考慮する、あるいは平均質量減少率に加えて降伏強度の低下を考慮することで、鉄筋腐食の影響を評価することが可能であった。一方、図-8に示した最大荷重比では、主筋の最大質量減少率に加えて、降伏強度の低下も考慮した計算値が、最も実験値と一致した。既往の研究において、腐食したRCはりの降伏荷重は主筋の平均質量減少を考慮することにより、また、最大荷重は主筋の平均質量減少と降伏強度の低下を考慮することにより、評価が可能であった¹⁾。本研究の範囲では、軸力作用下におけるRC柱の耐荷性は、軸力が作用しないRCはり試験結果と比較して、鉄筋の局所的な腐食に影響される結果となった。これは、3.3で述べた躯体変形の柱基部への局所化が大きく影響していることが考えられる。

図-9に主筋および帯筋の見かけの質量減少率と塑性率比の関係を示す。塑性率比は、終局変位を降伏変位で除して求め、塑性率比は、N試験体の平均塑性率で各試験体の塑性率を除したものである。図-9右中の実線は帯筋の質量減少を考慮して計算した塑性率比、破線は腐食に

よる帯筋の降伏強度の低下も考慮して計算した塑性率比を示す。なお、塑性率の計算値は主筋断面が減少するにしたがって微増する傾向であったため、主筋については実験値のみを示した。

図-9によれば、主筋および帯筋の腐食によりRC柱の塑性率比は小さくなる傾向が見られた。しかし、主筋の腐食に着目すると、腐食による構造的な低下は、じん性と比較して耐荷重の方が敏感であった。主筋の腐食がじん性に少なからず影響を及ぼすことは推測されるが、その評価方法については今後の検討としたい。

一方、帯筋の腐食に着目すると、平均質量減少率を考慮するよりも、最大質量減少率を考慮する方が塑性率を安全側に評価できた。これより、軸力作用下におけるRC柱のじん性についても、鉄筋の局所的な腐食に支配されやすいことが考えられる。ここで、じん性の低下が顕著であった試験体Bにおいて、腐食による鉄筋の最大質量減少は、柱基部から高さ50mmに位置する帯筋で生じていた。これは、躯体変形の局所化が確認された範囲である。したがって、鉄筋腐食によるじん性の低下についても、躯体変形の柱基部への局所化が大きな影響を及ぼしていることが考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 一定軸力作用下において正負交番水平荷重を受けたRC柱の構造的な性能は、鉄筋の局所的な腐食に影響された。
- (2) 本研究の範囲では、RC柱の耐荷重は主筋の腐食により、じん性は、特に帯筋の腐食に影響されることがわかった。

参考文献

- 1) 加藤絵万ほか：繰返し荷重を受ける RC はりの構造的な性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，港湾空港技術研究所資料，No.1079，2004
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2002

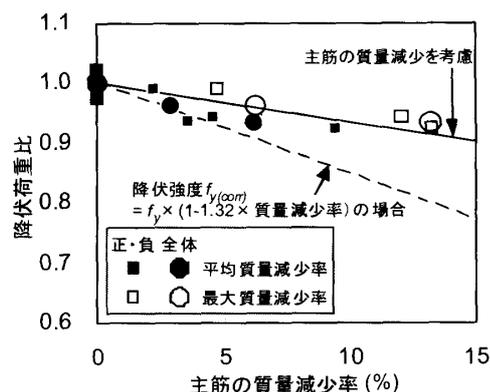


図-7 降伏荷重と主筋の質量減少率の関係

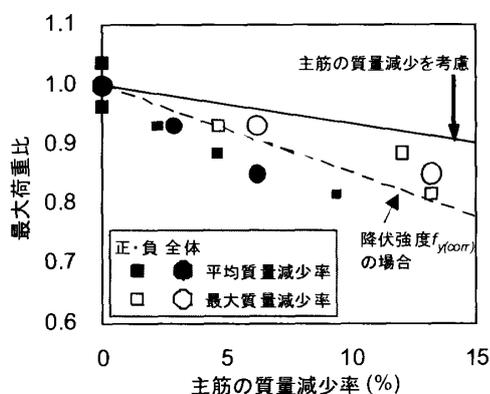


図-8 最大荷重と主筋の質量減少率の関係

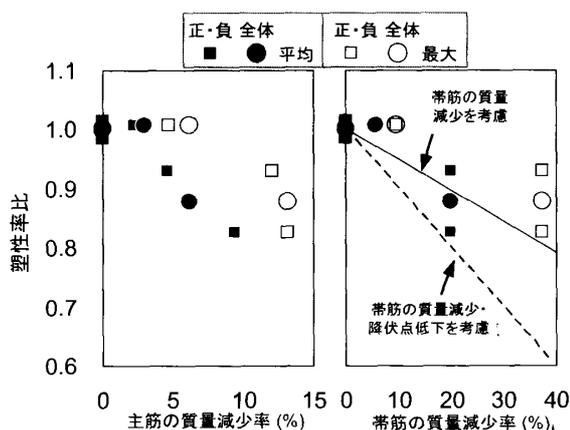


図-9 塑性率と鉄筋の質量減少率の関係

- 3) 岩波光保ほか：正負交番荷重下における軽量コンクリート柱部材の構造的な性能評価，JCI 年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1633- 1638，2004
- 4) 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，pp.1-110，1998