

RC 部材の付着破壊とエポキシ樹脂注入による補修効果に関する研究

BOND FAILURE OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS AND EFFECTIVENESS
OF REPAIRS BY EPOXY RESIN INJECTION

尾坂 芳夫*・鈴木 基行**・石田 博樹***・宮本 幹****

By Yoshio OZAKA, Motoyuki SUZUKI, Hiroki ISHIDA and Miki MIYAMOTO

The objective of this study is to experimentally investigate the effectiveness of repairs by injecting epoxy resin in reinforced concrete (RC) members which have failed due to loss of bond between reinforcement and concrete.

For this purpose, loads are first applied to RC beams having lap splices and RC beams with cutoff of one-half of main tension reinforcing bars, and bond failures are made to occur. Subsequently, epoxy resin is injected in the cracks formed using low pressure and as much time as practicable for injection.

As a result, although the behavior modes of members after repairs may be altered, it is ascertained that capacities, deformabilities, and energy absorptions are not less than those with the beams in their original conditions. Accordingly, it may be said that epoxy resin injection is extremely effective as a method of repairing RC members in which bond failure has occurred.

1. ま え が き

最近、RC 部材の補修や補強方法に関心が高まっている。これは、ごく最近起きた宮城県沖地震、浦河沖地震さらに日本海中部地震において、ラーメン高架橋、橋脚、建築物等数多くの RC 構造物に被害が生じ、取り壊さずに構造物の機能や性能を回復させる必要が生じたこと、各種 RC 構造物に対し被害の程度に応じた補修や補強方法を確立し、その効果をあらかじめ調べておくことは震災の復旧を迅速に行ううえで是非とも必要であること、等の理由によるものと思われる。

RC 部材の補修工法は、生じたひびわれの幅や補修目的により表面処理工法、充填工法、注入工法とに分類できる¹⁵⁾。この中で、エポキシ樹脂を用いた注入工法はさまざまな原因により生じたひびわれの補修工法として広く用いられてきている。これは、エポキシ樹脂が他の樹脂に比べ接着性に優れ硬化時に収縮しないこと¹⁶⁾、耐久

性や防水性等の性能の回復が優れていること、さらに構造部材の耐力や変形性能の回復も十分期待できること、等の理由によるものと思われる。エポキシ樹脂注入により部材の耐力や変形性能が回復することは、主として、はり¹¹⁻⁷⁾、¹⁹⁾、柱⁸⁾、⁹⁾、壁¹⁰⁾~¹³⁾、スラブ¹⁴⁾等を対象に実験的に調べられてきており、震害を受けた橋脚やラーメン高架橋¹⁷⁾さらに建築物¹⁸⁾等、実構造物へ適用した例もいくつかある。しかし、これら補修に関する実験は、主として曲げあるいはせん断破壊が生じた部材を対象としており、付着破壊が生じた部材を対象にエポキシ樹脂注入の補修の効果を調べた研究はきわめて少ないのが現状である。

付着破壊を起こす RC 部材の挙動はきわめて脆性的であるため、このような破壊形態は設計において避けるべき限界状態の1つである。しかし、過去の地震において RC 短柱²³⁾、²⁴⁾や橋脚²²⁾が付着の損失により大きな被害を受けた例も報告されている。付着破壊を起こした RC 部材を対象にエポキシ樹脂注入による補修効果は、石橋ら²⁵⁾、小林ら²⁶⁾、²⁷⁾により行われてはいる。これらの研究は、引張主鉄筋をコンクリート引張部に途中定着（以後 cut off とよぶことがある）させた部材を対象にしたものである。しかし、実験に用いられた供試体は全部で6体で、他の破壊形態を示す部材の補修実験に比べきわめ

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

** 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科 (同上)

*** 正会員 木更津工業高等専門学校助教授
(〒292 木更津市清見台東 2-11-1)

**** 工修 地域振興整備公団産炭地域振興事業部
(〒100 千代田区霞が関 3-8-1)

て少ないのが実情である。

そこで、本研究は付着破壊を起こしやすい部材として引張鉄筋の重ね継手部²⁸⁾および引張鉄筋をコンクリート引張部に途中定着させた部分^{20)~22)}を取り上げ、主として鉄筋とコンクリートとの付着の損失により耐力を失ったこれら部材のひびわれにエポキシ樹脂を注入しその補修の効果を部材耐力や変形性能の観点から実験的に調べることを目的とした。なお、重ね継手部の実験を「実験Ⅰ」、cut off部材の実験を「実験Ⅱ」とした。

2. 実験概要

(1) 実験Ⅰ(重ね継手部の実験)の概要

a) 供試体諸元

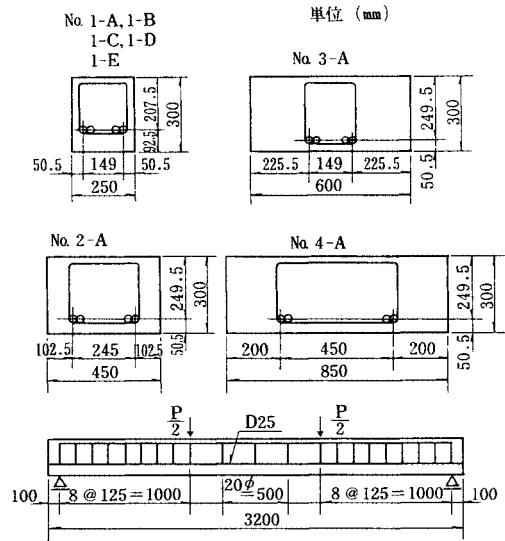
異形鉄筋の重ね継手は鉄筋とコンクリートとの付着作用により、一方の鉄筋の応力を隣接する鉄筋に伝達しようとするものであるが、施工や検査の容易さ、経済性のため溶接継手や機械的継手などの継手に比べ多く用いられている。しかし、応力伝達が鉄筋周囲のコンクリートの性質に依存し、いわゆるリングテンションにより重ね継手部で鉄筋に沿った縦ひびわれが発生しやす²⁸⁾、これが原因となって破壊を生じることがある。重ね継手部の破壊形態は、Tepfers²⁹⁾、Jirsa³⁰⁾、Ferguson³¹⁾らにより、供試体寸法、鉄筋かぶり、鉄筋間隔等を要因として3~6通りに分類されている。

実験Ⅰでは、これら既往の研究を参考に重ね継手における代表的4通りの破壊形態(side split failure, face and side split failure, 台形破壊, V-notch failure)を想定し、断面寸法、かぶり等を決定した。純曲げを受ける重ね継手部の耐力や破壊に至るまでの挙動を調べ、耐力を失った供試体のひびわれ部にエポキシ樹脂を注入

した後、再び曲げ荷重を行い補修の効果を調べた。実験Ⅰの供試体諸元を表一に、断面寸法および配筋の一例を図一に示す。供試体は8体とも単鉄筋単純はりであり中央部に重ね継手部を設けた。全供試体とも引張主鉄筋は同一で、D25を2本(重ね継手部では2組)配筋した。供試体の変動要因は、断面幅、有効高さ、かぶり、鉄筋のあき、および継手部の横方向拘束筋(スターラップ)量である。

b) 使用材料

コンクリートの示方配合を表二に示す。セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材には川砂、粗骨材には砕石を用いた。表三にコンクリートの強度試験結果(円柱供試体φ100×200mmによる)のをせる。また、引張主鉄筋として用いた鉄筋は横フシ異形鉄筋D25(SD35)で引張試験によると降伏強度3710kg/cm²、

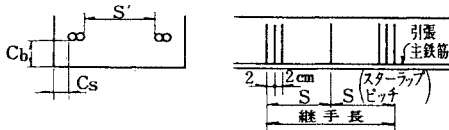


図一 実験Ⅰ 断面寸法と配筋の一例

表一 実験Ⅰ 供試体諸元一覧表

供試体 No	幅 b(cm)	有効高さ d(cm)	かぶり Cs(cm)	かぶり Cb(cm)	あき S'(cm)	継手長 ℓ(cm)	横方向拘束筋 ²⁾ 配筋 ρw(%)
1-A	25	20.75	3.8	8.0	7.4	20φ(50)	D6 @ 25 端部1本 0.15
1-B	25	20.75	"	"	"	10φ(25)	" 0.30
1-C	25	20.75	"	"	"	30φ(75)	" 0.10
1-D	25	20.75	"	"	"	20φ	D6 @ 25 端部2本 0.25
1-E	25	20.75	"	"	"	20φ	D6 @ 25 端部4本 0.46
2-A	45	24.95	9.0	3.8	17.0	20φ	D6 @ 25 端部1本 0.08
3-A	60	24.95	21.3	"	7.4	20φ	D6 @ 25 端部1本 0.06
4-A	85	24.95	18.75	"	37.5	20φ	D6 @ 25 端部1本 0.04

注) 1)Cs,Cb,S'のとり方は下左図参照。
2)横方向拘束筋は、継手両端部、中央にそれぞれ1本ずつ配置し、鉄筋量を増す場合には端部に2cmピッチで配置した(下右図参照)



表二 コンクリート示方配合表

組骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (±)	水セメント比 W/C (%)	細骨材比率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	組骨材 G	混和剤
20	12±2	3±1	58	44	173	298	764	1028	0.745

表三 コンクリート強度試験結果

供試体 No	元の梁			補修後の梁		
	材令(日)	圧縮強度	引張強度	材令(日)	圧縮強度	引張強度
1-A	10	249	16	37	350	23
1-B	11	250	17	37	350	23
1-C	13	259	18	39	350	23
1-D	13	259	18	41	350	23
1-E	14	278	19	42	320	23
2-A	10	250	19	39	345	28
3-A	11	262	21	40	345	28
4-A	12	274	19	32	345	28

• 単位 (kg/cm²)
• 試験値は3本のテストピースの平均値

引張強度は 5 900 kg/cm² であった。

c) 荷重方法

荷重は図-1 に示すように 2 点对称荷重とし破壊に至るまで静的に単調漸増荷重を行った。重ね継手部は純曲げ区間内にあり、せん断スパン部分は破壊が先行しないよう十分にせん断補強を施した。

(2) 実験Ⅱ (cut off 部材の実験) の概要

a) 供試体諸元

引張主鉄筋がコンクリート引張部に途中定着された部材の挙動は Ferguson²⁰⁾、著者ら²¹⁾等により明らかにされてきている。実験Ⅱにおいては、著者らの研究²¹⁾において破壊まで荷重された供試体の一部について、エポキシ樹脂注入による補修効果を実験的に調べることを目的とした。

供試体諸元を表-4 に示す。供試体は断面寸法を一定 (幅 $b=50$ cm, 有効高さ $d=40$ cm, はり高 $h=45$ cm) とした RC 単鉄筋はりである。引張主鉄筋は片側のせん断スパン (試験側) の所定の 1 か所で cut off し、その割合は橋脚や擁壁の実際の場合を考え 1/2 とした。他のせん断スパン (補強側) では、引張主鉄筋は cut off せずすべて支点を越えて配筋した。補強側の腹部はスターラップで十分補強し、破壊は試験側せん断スパンでのみ生じるようにした。スパン中央での引張主鉄筋比はすべて同一で 6 D 19, $\rho_t=0.830\%$ (0.860%) である。この値は通常橋脚等で採用されている引張主鉄筋比に対応するものである。試験側スパンでのスターラップ比は $\rho_w=0$ あるいは 0.151% (0.169%) である。 $\rho_w=0.151\%$ は現行 RC 示方書³²⁾によるはりに関する最少スターラップ比にはほぼ対応するものである。なお、実験Ⅱで用いる鉄筋比は鉄筋の長さ重量とから公称断面積を求め、それらをもとに算出した値である。JIS G 3112 で示される公称断面積を用いた場合の鉄筋比を参考のため () の中に示す。表-4 のスターラップの項で 2 D 6 とは D 6 を 2 組、同一位置に配筋したことを表わす。また、スターラップの 1 組は必ず cut off 点から荷重点側 5 cm の位置に配筋した。供試体寸法、配筋の一例を図-2 に示す。

b) 使用材料

コンクリートの示方配合を表-5 に示す。セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材には川砂、粗骨材には碎石を用いた。円柱供試体 ($\phi 100 \times 200$ mm) によるコンクリートの強度試験結果を表-4 に載せる。補修前後においてコンクリート強度にはほとんど差はなかった。鉄筋は引張主鉄筋として横フシ異形鉄筋 D 19 (SD 35) を、試験側スパンのスターラップとして D 6 (SD 30) を用いた。鉄筋の引張試験結果を表-6 に示す。表中、加工品とは JIS Z 2201 に従い異形鉄筋を円形断面に加

表-4 実験Ⅱ 供試体諸元一覧表

供試体 No.	a/d	せん断スパン長 a	引張主鉄筋 (スパン中央) 使用鉄筋比 ρ_t	カットオフ点 鉄筋の距離 Lcut	スターラップ 鉄筋比 ρ_w	コンクリート強度 圧縮 f_c	引張 f_t
L-8	2.5	100	$\rho_t=0.830$	35	0.35	205	26.2
M-9				50	0.36	245	26.6
M-11				60	0.43	270	30.4
M-13	3.5	140		70	0.50	267	28.4
M-14				80	0.57	203	24.9
M-16				46.5	0.33	205	25.4

・単位 : a, Lcut, s [cm], ρ_t, ρ_w [%], f_c, f_t [kg/cm²]

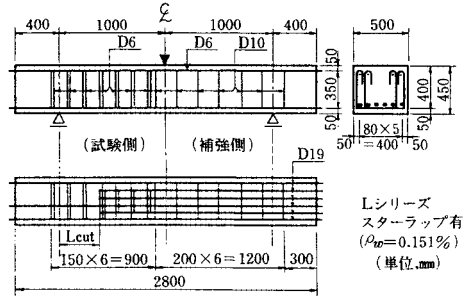


図-2 供試体寸法・配筋の一例

表-5 コンクリート示方配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材の割合 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	8 ± 2	3.5 ± 0.5	62	52	183	295	927	898	なし

表-6 鉄筋引張試験結果

	呼び径	規格	断面積 (cm ²)	降伏応力 (kg/cm ²)	時歪 (Z)	引張強度 (kg/cm ²)	伸び (%)	ひびき (%)	ヤング率 ×10 ⁶ (kg/cm ²)
加工品 (円形断面)	D 6	SD30	—	4000	1980	6200	24	49	2.23
	D 19	SD35	—	4100	2020	6000	21	54	2.01
非加工品	D 6	SD30	0.2835	3900	2210	6000	20	—	2.09
	D 19	SD35	2.766	3800	2130	5600	16	—	1.87

工して試験片としたものであり、非加工品とは母材のまま試験片としたものである。なお、非加工品の断面積は試料の重量と長さから求めたものである。

c) 荷重方法

M-16 を除き、荷重は図-2 に示すようにスパン中央に集中荷重として破壊に至るまで漸増させ加えた。ロードセルで荷重を検出させながら各ステップで荷重、たわみ、鉄筋やコンクリートに生じるひずみおよび試験側スパンにおけるひびわれの発生や進展状況を追跡した。M-16 については片振り荷重を行った。なお、両支点ともローラー支承で支点反力は線荷重として作用し、荷重点ではヒンジおよび幅 10 cm の荷重板を介して荷重を加えた。

(3) エポキシ樹脂の材料特性と注入工法

表一七 エポキシ樹脂の材料特性

	圧縮強度	ヤング率	曲げ強度	引張強度
試験方法	JIS K 7208	JIS K 7208	JIS K 7203	JIS K 7113
試験値	623	1.91×10 ⁴	523	329

(注)・試験値は各5本の試験片の平均値・単位：[kg/cm²]

RC 部材に注入された樹脂と同一条件（室温約 20℃）で 7 日間養生した樹脂について JIS に従い材料試験を行い表一七のような材料特性を得た。なお、使用したエポキシ樹脂の粘度は 20℃ で 500 ± 200 c. p, 可使時間は 20℃ で約 90 分であった。

エポキシ樹脂の注入工法には高圧、高速で短時間に注入する方法と低圧、低速で時間をかけて注入する方法とがあるが、本実験では後者、特にバルーンの圧力（約 2.5 kg/cm²）を利用し時間をかけて（樹脂の可使時間に至るまで）注入する工法を採用した。この工法により樹脂がどの程度のひびわれにまで注入されたかを確認するため、樹脂に蛍光塗料を混ぜはりの載荷試験終了後コアを抜き取り検査した結果、少なくとも 0.05 mm 程度のひびわれにまで樹脂が注入されていたことが確認できた。また、鉄筋や骨材周囲に生じた微細な間隙にまで注入されていたことから、この工法を用いれば、構造物内部においてひびわれが連続していれば、その先端にまで十分注入されることが確認できた。樹脂が注入される経路さえあれば引張鉄筋周囲に発生する内部ひびわれにまで注入され得ると推測される。

3. 重ね継手破壊とエポキシ樹脂注入による補修効果

(1) Tefpers, Jirsa による耐力式

実験結果を表一八に示す。この表には Tefpers²⁹⁾および Jirsa³⁰⁾による重ね継手端部の引張主鉄筋に生じる応力度の計算値を載せてある。

Tefpers による破壊型式および耐力式をまとめると以下のとおりである。

① Side Split failure (図一三 (a) 参照)

$C_b > C_s$ で割裂面が鉄筋軸を含む水平面となり、両側面に縦ひびわれが発生し破壊するタイプ。

$$2 \cdot \tau_u \cdot \tan \alpha \cdot n \cdot \phi = [2 \cdot C_s + (n-1)s'] \sigma_{ct} + \frac{m \cdot A_{st}}{a} \cdot \epsilon_{ct} \cdot E_s \dots (1)$$

② Face and Side Split failure (図一三 (b) 参照)

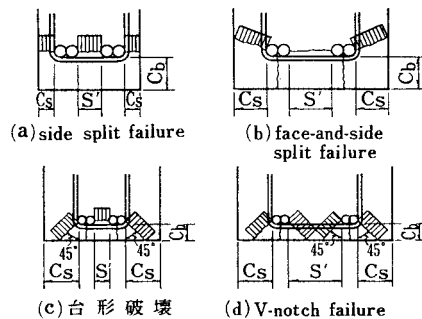
$C_s > C_b$ で底面と両側面に縦ひびわれが発生し破壊するタイプ。

$$2 \cdot \tau_u \cdot \tan \alpha \cdot \phi = \left[C_s + \frac{\phi}{2} \right] \sigma_{ct} + \frac{A_{st}}{a} \epsilon_{ct} \cdot E_s + \frac{A_{st}}{a} \sigma_{st} \dots (2)$$

表一八 実験 I 実験結果一覧表

供試体 No.	曲ひびわれ発生荷重 (ton)	割裂発生荷重 (ton)		破 壊 荷重 (ton)	型 態	継手端部鉄筋応力実験値 (kg/cm ²)		破壊時鉄筋応力計算値 (kg/cm ²)		実験値 / 計算値		
		Bottom	side			割裂時	破壊時	Tefpers	Jirsa	Tefpers	Jirsa	
1-A	前	2.0	なし	8.0	9.0	S	2560	2870	1920	2970	1.49	0.97
	後	1.0	なし	10.5	10.5		—	3150	3340	4330	0.94	0.73
	比	0.5		1.31	1.17			1.10				
1-B	前	1.7	なし	4.0	4.0	S	—	1220	1050	2020	1.16	0.60
	後	1.5	6.3	5.5	6.3		1370	1770	1400	2380	0.74	0.74
	比	0.88		1.38	1.58			1.45				
1-C	前	1.5	なし	6.9	10.9	S	2110	3490	3200	4010	1.09	0.87
	後	1.0	なし	4.0	13.5		970	3700	曲 ²⁾	曲 ²⁾	—	—
	比	0.67		0.58	1.24		0.46	1.06				
1-D	前	2.0	なし	5.0	8.5	S	1520	2750	2870	3250	0.96	0.85
	後	0.6	11.0	5.9	11.5		1600	3640	4050	4585	0.90	0.79
	比	0.3		1.18	1.35		1.05	1.32				
1-E	前	2.0	なし	7.5	9.0	S	2340	2900	2980	3820	0.97	0.76
	後	1.0	なし	2.0	11.4		370	3700	4050	4870	0.93	0.77
	比	0.5		0.27	1.27		0.16	1.28				
2-A	前	4.0	11.0	13.5	13.5	F S	2650	3380	3940	2980	0.86	1.13
	後	2.0	14.5	なし	15.0		3600	3700	5060	3500	0.75	1.09
	比	0.5	1.32		1.11		1.36	1.10				
3-A	前	3.0	10.0	なし	11.5	台	2350	2800	3770	3050	0.74	0.92
	後	1.0	12.0	なし	14.5		3000	3360	4720	3500	0.71	0.96
	比	0.33	1.2		1.26		1.28	1.20				
4-A	前	5.2	10.0	なし	14.5	V	2340	3700	3100	3120	1.20	1.19
	後	2.0	17.7	なし	17.7		—	3700	4505	3500	1.04	1.34
	比	0.38	1.77		1.22			1.00				

(注) 1) 前：元の梁、後：補修後の梁、比=補修後/元の梁
2) 破壊型態 S: side split failure, FS: face and side split failure
台: 台形 failure, V: V-notch failure 曲: 曲げ圧縮破壊



図一三 重ね継手の破壊型態の模式図

スターラップに働く応力 σ_{st} は次式から求められるが、この式は 2 本の引張鉄筋の中央点でモーメントのつり合いを考えたものである (図一四 参照)。

$$\sigma_{st} \frac{A_{st}}{a} \cdot e_1 - \epsilon_{ct} \cdot E_s \cdot \frac{A_{st}}{a} \cdot \sqrt{2} \cdot e_2 - \sigma_{ct} \left(C_s + \frac{\phi}{2} \right) \sqrt{2} \cdot e_3 = 0 \dots (3)$$

③ 台形破壊 (図一三 (c) 参照)

底面に縦ひびわれが発生し台形状に割裂破壊するタイプ。

$$2 \cdot \tau_u \cdot \tan \alpha \cdot n \cdot \phi = \left[2 \left(C_b + \frac{\phi}{2} \right) + (n-1)s' \right] \sigma_{ct} + \frac{m \cdot A_{st}}{a} \epsilon_{ct} \cdot E_s + \frac{n \cdot A_{st}}{a} \cdot \sigma_{st} \dots (4)$$

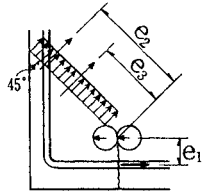


図-4 力のつり合い

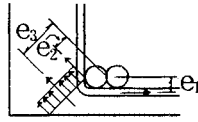


図-5 力のつり合い

スターラップに働く応力 σ_{st} は次式から求められる (図-5 参照)。

$$\sigma_{st} \frac{A_{st}}{a} e_1 - \epsilon_{ct} \cdot E_s \frac{A_{st}}{a} \sqrt{2} \cdot e_2 - \sqrt{2} \sigma_{ct} \left(C_b + \frac{\phi}{2} \right) e_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

④ V-notch failure (図-3 (d) 参照)

$C_s \gg C_b$ で底面に縦ひびわれが発生し鉄筋軸から V 字形に割裂し破壊するタイプ。

$$2\tau_u \cdot \tan \alpha \cdot \phi = 2 \left(C_b + \frac{\phi}{2} \right) \sigma_{ct} + \frac{2 \cdot A_{st}}{a} \epsilon_{ct} \cdot E_s \dots\dots\dots (6)$$

重ね継手破壊時の引張主鉄筋に生じる継手端部の応力度 f_s は上式より付着応力度 τ_u を求め $f_s = \pi \phi l \tau_u / A_s$ から算出される。

これに対し、Jirsa は重ね継手破壊時の鉄筋応力度 σ_{su} を破壊型態にかかわらず次式で与えている。

$$\sigma_{su} = \left[1.2 + \frac{3C}{\phi} + \frac{50\phi}{l} + \frac{A_{st} \cdot f_{yt}}{500 \cdot a \cdot \phi} \right] \cdot \sqrt{f'_c} \frac{4 \cdot l}{\phi} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、単位は in, in², psi である。

ここに、 τ_u ：継手に縦ひびわれが発生したときの付着応力度、 a ：支圧力が鉄筋軸となす角度 (ここでは $\alpha = 45^\circ$ とした)、 ϕ ：鉄筋径、 C_s ：側面かぶり、 C_b ：底面かぶり、 C ： C_b 、 C_s のうち小さい値、 s' ：鉄筋のあき、 σ_{ct} ：コンクリート引張強度、 f'_c ：コンクリート圧縮強度、 f_{yt} ：スターラップ降伏強度、 ϵ_{ct} ：コンクリート終局伸びひずみ (ここでは $\epsilon_{ct} = 150 \mu$ とした)、 A_{st} ：スターラップ断面積 (ここではスターラップとして用いている鉄筋断面積)、 a ：継手部スターラップピッチ、 E_s ：鉄筋ヤング率、 m ：割裂面を横切るスターラップの本数、 n ：継手の数

(2) 破壊性状と耐力

1-A~1-E の元のはりではすべて side split failure を起こした。重ね合せ長さ l が 10ϕ と短い 1-B では側面に縦ひびわれが発生した後、ただちに破壊したのに対し、 l が 20ϕ 、 30ϕ である 1-A、1-C では側面に縦ひびわれ発生後、それぞれ約 13%、58% の耐力増加後破壊した。また、 l が 20ϕ と同一でスターラップ補強量が異なる 1-A、1-D、1-E の割裂発生荷重には若干の差があるものの破壊荷重はおよそ 9t と同一であった。この程度のスターラップ量では継手部の割裂破壊に対しその効果を

期待できないものと思われる。これは、1-A、1-D ではスターラップのみでは割裂直前の割裂力を受け持てないためであり、1-E ではひびわれ発生直前の割裂力をスターラップのみで受け持たせるよう十分配筋したが、側面に進展したひびわれがスターラップと有効に交わっていなかったためと推測される。

Tepfers による耐力式はこの破壊型態を示す継手強度をやや小さめに評価する (実験値/計算値の平均 1.17) のに対し、Jirsa による計算値ではやや大きめに評価した (実験値/計算値の平均は 0.81)。これは、付着応力度 τ に寄与するスターラップ以外の寄与分 (コンクリート分) に Jirsa 式では重ね合せ長さ l が考慮されているため Tepfers 式に比べてかなり大きく評価されることになる (1.17~1.76 倍) ためと思われる。 τ に及ぼすスターラップの寄与分の絶対値は Tepfers、Jirsa 式とも差はない。本実験では、この破壊型態をする継手強度の評価は Tepfers 式によるものの方が実験値との適合性はよいようである (表-8 参照)。

2-A の元のはりでは、まず継手底面に縦ひびわれが発生し、2.5t の荷重の増加後、側面に縦ひびわれが発生し破壊した (face and side split failure)。3-A、4-A ではまず底面の継手直下に縦ひびわれ発生後、1.5t あるいは 4.5t の荷重の増加後、継手鉄筋軸から底面へ斜めにひびわれが進展し破壊に至った (3-A は台形破壊、4-A は V-notch failure)。これらの供試体の場合、耐力計算値は Tepfers によるものより Jirsa によるものの方が実験値との適合性はよい。

次に、エポキシ樹脂注入補修後の供試体の破壊性状と耐力をみる。元のはりでは、縦ひびわれは鉄筋周囲に発生するリングテンションにより、かぶりの最も薄い部分に生じたが、補修後のはりではこの部分は引張強度がコンクリートのそれに比べはるかに大きいエポキシ樹脂が注入されているため割裂されず、その隣接する部分に縦ひびわれが生じた。実際、1-A、1-D、1-E の側面での縦ひびわれは元のはりの縦ひびわれ発生位置より約 4cm 離れたところ、1-B ではすぐ脇に発生した。このように、補修後のはりでは割裂面積が元のはりの場合と比べて増加すること、および今回の実験では補修後の載荷時においてコンクリート引張強度が増加したこと、が耐力の増加の原因となっているものと思われる。また、重ね継手長が 30ϕ と長い 1-C では補修後に継手破壊せず曲げ破壊した。

補修後の 2-A、3-A、4-A では底面の継手直下に縦ひびわれが発生し最大荷重に至った。側面や鉄筋軸から底面に斜めに進展するひびわれは発生しなかった。しかし、3-A、4-A では荷重-変位曲線の下降域において鉄筋軸から斜めに進展するひびわれが発生した。2-A、3-A、

4-Aの補修後の載荷で生じた縦ひびわれは元のはりの縦ひびわれ発生位置のすぐ脇に発生したため、割裂面の面積の増加はほとんどなかったといえる。しかし、補修後のはりの載荷が元のはりの載荷の約20日後であったため、コンクリート引張強度が20 kg/cm²から28 kg/cm²へと増加していた。このことが補修後のはりの耐力の増加の原因と思われる。

補修後のはりについても継手破壊時の引張主鉄筋に生じる応力度をTepfersおよびJirsaの式を用いて算定した結果を表-8に示してある。曲げ破壊をした1-Cを除いた1-A~1-Eは補修後もside split failureをしたが、元のはりの場合と同様、Tepfersによる計算値の方がJirsa式によるものより実験値とよく一致した。他の破壊形態をしたものについてはJirsa式の方が実験値とよく合うようである。

Tepfers式においては付着応力度 τ に及ぼすスターラップ以外の寄与度が特に大きく評価されることが特徴であり、Jirsa式では破壊形態によらず同一の付着応力度を与えることが特徴である。Tepfers式、Jirsa式で求めた補修後の耐力値は元のはりの耐力計算値に比べ、それぞれ12~45%、28~74%増加しているが、これは主として材令の増加に伴うコンクリート引張強度の増加およびside split failureをしたはりではコンクリート割裂面積の増加が原因と思われる。

(3) 荷重-変位関係 ($P-\delta$ 関係)

図-6に供試体に加えた荷重 P とはり中央のたわみ δ との関係を示す。(a)、(b) 図から side split failure を起こした供試体では重ね合せ長さ l やスターラップ量にかかわらず $P-\delta$ 曲線において最大荷重に至る剛性はほぼ同一であり、補修後のはりの剛性も元のはりのそれとほぼ同一であることがわかる。また、(c) 図から他の

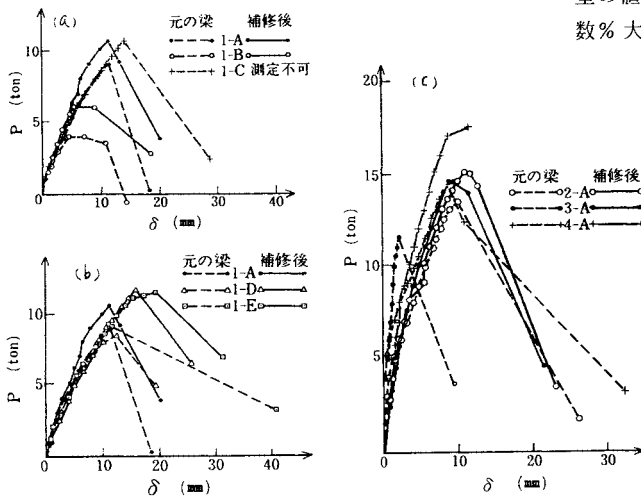


図-6 $P-\delta$ 曲線

表-9 補修前後の P と W との比較

供試体 No.	耐力		元の梁 P/P'	吸収エネルギー		
	元の梁 P	補修後 P'		元の梁 W	補修後 W'	W'/W
1-A	9.0	10.5	1.17	50.23	62.83	1.25
1-B	4.0	6.3	1.58	9.46	12.92	1.37
1-C	10.9	13.5	1.24	—	—	—
1-D	8.5	11.5	1.35	54.33	90.55	1.67
1-E	9.0	11.4	1.27	48.64	111.90	2.30
2-A	13.5	15.0	1.11	75.15	88.36	1.18
3-A	11.5	14.5	1.26	—	—	—
4-A	14.5	17.7	1.22	73.63	121.67	1.65

*1-C, 3-Aは変位計の設置ミスのため測定できず。
単位 P, P' : [ton], W, W' : [ton·mm]

破壊形態を示す場合も補修後のはりの最大荷重に至る部材剛性は元のはりのそれらを下回らないことが確認できた。

表-9は元のはりと補修後のはりの耐力 P および最大荷重に達するまでに $P-\delta$ 曲線を囲む面積 (吸収エネルギー W) とを比較したものである。補修後のはりの耐力は元のはりの耐力と比べ少なくとも10%は増加すること、および吸収エネルギーも破壊形式によらず増加することがわかる。

図-7は各供試体において割裂した部分の総面積と破壊荷重との関係を示したものである。元のはりおよび補修後のはりとも、割裂面積の増加とともに部材耐力は直線的に増加することがわかる。鉄筋のかぶりが増えたり、重ね継手長が長くなれば割裂面積も増加するので当然の結果といえるが、補修後も元のはりの場合とほぼ同様の傾向があることが確認された。

(4) 鉄筋ひずみ

ひずみの測定結果から、元のはりおよび補修したはりとも引張主鉄筋の重ね継手部のひずみ分布はほぼ三角形とみなすことができた。しかし、同一ひずみを生じる荷重の値をみると、一般に補修したはりの方が数%~20%大きく大きくなっていた。これは、鉄筋周囲のひびわれ

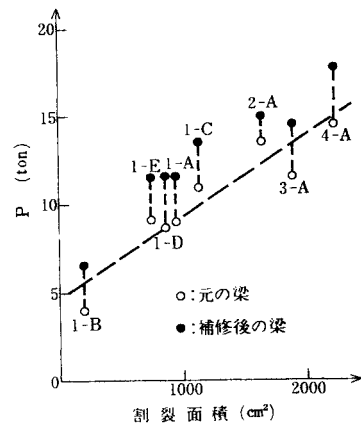


図-7 割裂面積と耐力との関係

発生領域へエポキシ樹脂が注入されたことにより鉄筋とコンクリートとの付着特性が改善されたため、および補修後は元のはりと異なる箇所でのひびわれが発生したこと、等が原因と思われる。

(5) ま と め

純曲げ区間に重ね継手を設け載荷実験を行い、さらに継手破壊を起こした供試体のひびわれ部にエポキシ樹脂を注入し、再度載荷しその補修効果を調べた結果、以下の結論を得た。

- 1) 重ね継手部の破壊パターンは、特にかぶり厚と重ね合せ長さとの影響を受けることが確認できた。
- 2) side split failure を起こす重ね継手の耐力については Tepfers 式によるものが実験値との対応がよく、他の破壊形態をするものについては Jirsa 式によるものが実験値との対応がよい。このことは、補修後のはりの耐力についてもいえる。
- 3) エポキシ樹脂注入により補修された重ね継手部の耐力は、元のはりの耐力を下回らないことが確認できた。補修後のひびわれ発生位置は元のはりのひびわれ発生位置の脇であり、割裂面積の増加および補修後のコンクリート引張強度の増加が部材耐力の増加に寄与しているものと思われる。重ね合せ長さが長くなる (30φ) と、補修後のはりは曲げ破壊を起こすことがある。
- 4) 重ね継手部の割裂した部分の総面積と耐力とはほぼ直線関係にある。この関係は補修後のはりに対してもあてはまる。
- 5) はりの P-δ 曲線の最大荷重に至る部材剛性は、補修後も元のはりの剛性とほぼ同等で、吸収エネルギーは耐力が増加する分だけ増加する。

このように、エポキシ樹脂注入が適切に行われている限り、補修後の重ね継手部の強度、変形性能とも元の部材のそれらを下回らないことが、各種の破壊形態に対し確認できた。

4. 引張主鉄筋途中定着による RC 部材の付着せん断破壊とエポキシ樹脂注入による補修効果

(1) 破壊性状と耐力

注) 引張主鉄筋が途中定着された RC 部材の挙動は、部材の降伏、および終局をもたらず原因により次の 4 種に分類できる。

- I 型：引張鉄筋が降伏することなく、斜めひびわれの発生により部材降伏と終局とがほぼ同時に起こるタイプ。
- II_a 型：cut off 点で cut off していない引張鉄筋が降伏することにより部材降伏が生じ、cut off 点から発生した斜めひびわれが進展することにより終局を迎えるタイプ。
- II_b 型：部材の最大曲げモーメント点の引張鉄筋の降伏により、部材降伏が生じ、cut off 点から発生した曲げせん断ひびわれの進展が原因となりせん断破壊を起こすタイプ。
- III 型：典型的な曲げ降伏、曲げ圧壊タイプ。

実験結果の一覧表を表-10 に示す。表中に示した挙動の分類は文献 21) による分類法⁴⁾である。本研究で対象とした供試体の元のはりの挙動形態は主として II_a 型である。このタイプは引張主鉄筋を cut off したときにみられる典型的なもので、通常の曲げ圧縮破壊をする場合に比べ、部材降伏荷重や耐力および塑性変形能力が劣るのが特徴である。

元のはりの破壊形態は文献 21) に詳述してあるが、要約すると次のとおりである。II_a 型タイプの部材では必ず cut off 点から発生した曲げひびわれが斜めひびわれへと進展し、縦ひびわれの発生を伴った付着せん断破壊が生じる。これに対しエポキシ樹脂注入補修したはりのひびわれ状況は次のとおりである。L-8 では、元のはりのひびわれ発生位置とほぼ同じ位置にせん断ひびわれが発生した。M-9 では、斜めひびわれが圧縮縁 10 cm の位置にまで進展したころ、はり中央部の曲げひびわれが大きく進展し、これら両者のひびわれ幅がともに広がることにより部材の終局を迎えた (図-8 参照)。M-11 では、cut off 点近傍にはひびわれは発生しないで、

表-10 実験結果一覧表 (実験 II)

供試体 No.		破壊につな がる曲げひ びわれ発生		破壊につな がる斜ひび われ発生		破 壊 時 Su ²⁾ 型態 ⁴⁾	挙動 分類 ⁵⁾	吸 収 エネルギー ⁶⁾
		Sc ²⁾ 位置 ³⁾	Sd ²⁾ 位置 ³⁾	Su ²⁾ 位置 ³⁾	Su ²⁾ 位置 ³⁾			
L-8	前	13.0	35	20.7	35	21.8 BS	II _a	196.3
	後	16.3	30	16.3	30	25.1 BS	不明	245.6
	比	1.25		0.79		1.15		1.25
M-9	前	11.2	50	12.8	50	18.9 BS	II _a	367.3
	後	12.9	55	18.8	55	22.5 FC,S	II _a	2436.8
	比	1.15		1.47		1.19		6.63
M-11	前	11.9	62	11.9	62	16.5 BS	II _a	501.0
	後	9.0	76	9.0	76	19.1 FC	II _b III	682.0
	比	0.76		0.76		1.16		1.36
M-13	前	10.0	70	11.0	70	16.7 BS	II _a	451.9
	後	9.0	90	13.4	90	18.9 S	II _b	977.0
	比	0.9		1.22		1.13		2.16
M-14	前	6.9	71	10.4	71	10.4 BS	II _a	51.4
	後	7.3	84	8.3	84	12.3 S	I	57.7
	比	1.06		0.80		1.18		1.12
M-16	前	14.0	46.5	14.0	46.5	20.0 BS	II _b	
	後	14.0	55	14.0	55	22.0 FC	III	
	比	1.0		1.0		1.10		

(注) 1)前：元の梁、後：補修後の梁、比=補修後/元の梁
 2)Sc,Sd,Su：せん断力(単位ton) 3)位置：支点からの距離(cm)
 4)BS：付着せん断破壊、FC：曲げ圧縮破壊、S：せん断破壊
 5)文献21)参照 6)最大荷重までの吸収エネルギー(ton-cm)

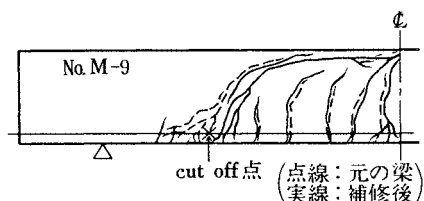


図-8 ひびわれ状況の一例

cut off 点の内側約 20 cm の位置から発生したひびわれが載荷点方向に進展した。部材降伏はスパン中央の引張鉄筋の降伏により生じたので、挙動はⅡ_bあるいはⅢ型へと移行したと思われる。M-13も cut off 点近傍に発生した曲げひびわれは斜めひびわれへと進展しないで、スパン中央の引張鉄筋の降伏により部材降伏をもたらし、cut off 点の内側約 20 cm の位置に発生したひびわれの進展により終局を迎えた。このことから、挙動はⅡ_bへ移行したと判断される。M-14は試験側スパンにスターラップ補強をしていない供試体で、元のはりでは cut off 点の引張鉄筋の降伏により部材降伏を生じたことからⅡ_a型と判断されたが、補修後のはりでは cut off

点およびスパン中央点の引張鉄筋とも降伏せずに終局を迎えた。このことからⅠ型挙動に移行したと思われる。しかし、補修後のひびわれは元のはりの場合とほぼ同じ軌跡をたどった。M-16は片振り载荷を行った供試体である。図-9に示すように cut off 点で曲げひびわれが発生した荷重で5回、さらに、M-16と同一諸元を有する供試体の単調漸増载荷時の耐力 P_u (40.8 t) の 70, 80, 90…% の荷重で各5回ずつ片振り载荷を行った。その結果、元のはりでは P_u の 70% に相当する $P=28$ t の1サイクル目のとき cut off 点から曲げおよび斜めひびわれが発生した。その後 0.9 P_u に相当する $P=36$ t では、斜めひびわれは圧縮縁から約 5 cm の位置にまで進展したが耐力の低下はみられなかった。 P_u に相当する $P=40$ t の1サイクル目の载荷中 38.2 t で斜め引張破壊が生じ耐力を失った。これに対し、補修後では 0.7 P_u に相当する $P=28$ t の2サイクル目に支点から 55 cm の位置に曲げひびわれが発生し、同一荷重の4サイクル目にこのひびわれが斜めひびわれへと進展した。終局は 1.1 P_u に相当する $P=44$ t の1サイクル目のとき、曲げ圧縮破壊により生じた。すなわち、挙動型態はⅡ_bからⅢ型へと移行した。

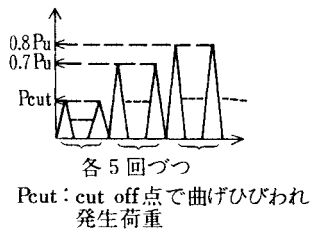


図-9 片振り载荷パターン (M-16)

補修後のはりの破壊型態が、縦ひびわれの発生を伴ったせん断破壊 (BS) から縦ひびわれの発生がみられないせん断破壊 (S) へと変化しているものがあるが、これは最初発生した縦ひびわれの発生部分、さらには引張鉄筋周辺に発生している内部ひびわれにまでエポキシ樹脂が十分注入され、縦ひびわれの発生が防止されたことによるものと思われる。

単調漸増载荷の場合で補修後のはりの耐力は元のはりの耐力に比べ 13~19% 増加し、片振り载荷を行った M-16 も 10% の耐力の増加を示した。元のはりにおいて発生するひびわれは最も破壊しやすい箇所に発生するのに対し、補修後はこの部分は引張強度のきわめて大きいエポキシ樹脂で置換されるため、補修後のひびわれは樹脂注入部分の脇に発生し、このため耐力の増加がもたらされるものと思われる。

エポキシ樹脂注入前 (荷重 0) の斜めひびわれの幅を引張鉄筋と交差する位置、はり高中央の位置、圧縮縁から 10 cm の位置の 3 か所で測定した結果、L-8 では、下から 12 mm, 7 mm, 7 mm, M-13 では 8.5 mm, 7 mm, 4.5 mm であった。エポキシ樹脂注入が可能となるひびわれ幅に限界があるろうが、幅 10 mm 程度のひびわれに対しても補修可能であることが確認された。

(2) 荷重-変位関係 ($P-\delta$ 曲線)

図-10 は各供試体について供試体に加えた荷重 P とはり中央のたわみ δ との関係を描いたものである。補修後の $P-\delta$ 曲線においては、初期剛性がやや低下する

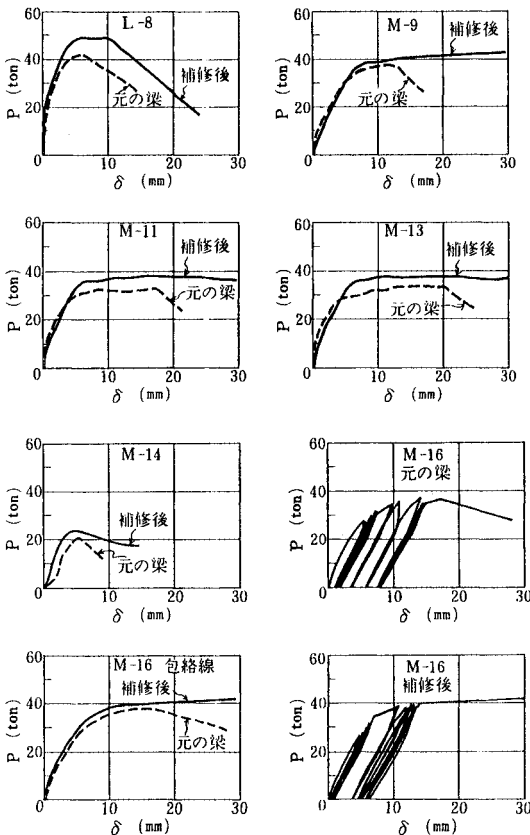


図-10 $P-\delta$ 曲線

ものの降伏荷重、耐力および降伏以降の変形性能は元のもののそれらをいずれも上回っている。補修後において初期剛性が低下する理由として、生じたひびわれのすべてにエポキシ樹脂が注入されていない可能性があること、十分に補修されたとしても樹脂のヤング率はコンクリートのそれに比べて小さいこと、等が挙げられる。また、最大荷重に至るまでに部材が吸収したエネルギーを表一10に示すが、いずれの供試体においても元のものの吸収エネルギーを上回ることがわかる。これは、補修後において耐力、変形性能とも向上したためである。片振り載荷を行った M-16 についても補修後の包絡線は元のものの包絡線を上回っているのが確認できる。

(3) ま と め

以上、引張主鉄筋が cut off された部材を破壊に至るまで載荷した後、ひびわれ部にエポキシ樹脂を注入し再載荷した結果、初期剛性はやや低下するものの部材耐力、変形性能は元のもののそれらを下回ることがないことが確認された。よって補修後の部材耐力、変形性能は元のもののそれらを用いても十分安全であるといえる。

補修後において発生するひびわれは、元のものにおいて生じたひびわれの脇に発生するが、補修後のものの破壊形態や挙動形態は、元のものにおいてどの程度損傷を受けたか、さらに、その部分がどの程度エポキシ樹脂で置換されたか、に依存するようである。

5. 結 び

付着破壊を生じる RC 部材として、重ね継手部と cut off 部材を取り上げ、エポキシ樹脂注入による補修効果を、主として静的単調漸増荷重のもとで実験的に調べた結果、以下のような結論を得た。

(1) 本実験で採用されたエポキシ樹脂注入工法では、樹脂の可使時間以内であれば幅 0.05 mm 程度のひびわれや、骨材、鉄筋周辺の微細な間隙にまでエポキシ樹脂が注入されることが確認された。また、幅 10 mm 程度のひびわれに対しても補修可能であることが確認された。

(2) 重ね継手部および引張主鉄筋が cut off された部材を破壊まで載荷した後、ひびわれ部にエポキシ樹脂を注入することにより補修し、再び載荷実験を行った結果、部材耐力、変形性能とも元の部材のそれらを下回らないことが確認できた。よって補修後の部材耐力等の諸特性は元の部材のそれらを用いても十分安全であると判断される。

(3) 重ね継手部の割裂総面積と耐力とはほぼ直線関係にあり、補修後も同様の傾向を示す。

(4) 補修後の重ね継手耐力が上昇するのは破壊面積の増加によるところが大きい。また、重ね継手耐力式

(Tepfers 式, Jirsa 式) について実験値との適合性を検討した。

(5) エポキシ樹脂注入補修により、重ね継手部では補修後曲げ破壊するものもあり、cut off 部材では挙動形態が II_a や II_b 型から II_b や III 型へと移行するものもあり、耐震上より望ましい挙動形態へと移行することが確認できた。

エポキシ樹脂注入による補修の効果の程度は、注入工事にあたり入念な施工が行われたか否かに左右されるので施工にあたっては慎重に行う必要があろう。

謝 辞：本研究の供試体作製にあたりオリエンタル・コンクリート（株）仙台支店および同中新田工場の皆様に多大なご協力をして頂いたことに感謝します。また、実験にあたり久宮和彦氏（当時・東北大学在学、現在・地域振興整備公団）の協力を得ました。なお、本研究は文部省科学研究費補助金（No.585138 および 58850104）を受けて行ったものである。ここに付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Shephard, T. D. : Repair of a beam, Concrete, Vol.7, No.4, Apr., 1973.
- 2) Chung, H.W. : Epoxy-Repaired Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, Vol.72, No.5, May, 1975.
- 3) Fisher, J.M. : Repair of damaged reinforced concrete structure, Concrete, Vol.10, No.3, Mar., 1976.
- 4) 磯 健一・東 洋一：鉄筋コンクリート造の補修に関する実験的研究，第 2 回 JCI 年次講演会論文集，pp.313~316, 1980.
- 5) 松崎育弘・星野克征・坂本浩孝・由利隆之：せん断破壊した RC 部材のエポキシ樹脂の補強効果を知る実験研究，第 6 回 JCI 年次講演会論文集，pp.541~544, 1984.
- 6) 田才 晃・北山和宏・小谷俊介・青山博之：エポキシ樹脂で補修された鉄筋コンクリート梁の曲げ性状，第 6 回 JCI 年次講演会論文集，pp.625~628, 1984.
- 7) 尾坂芳夫・鈴木基行・石田博樹・加藤勝美：RC ばりのせん断破壊と補修法に関する研究，土木学会論文集，第 360 号/V-3, pp.119~128, 1985 年 8 月.
- 8) Hellesland, J. and Green, R. : Tests of Repaired Reinforced Concrete Columns, ACI Journal, Dec., 1972.
- 9) 町田篤彦・睦好宏史：補修された鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究，第 5 回 JCI 年次講演会論文集，pp.257~260, 1983.
- 10) 清水 泰・安達 洋・中西三和：初期ひびわれや打つき面等を有する鉄筋コンクリート造壁の耐震補修に関する実験研究，第 2 回 JCI 年次講演会論文集，pp.413~416, 1980.
- 11) 田才 晃・小谷俊介・青山博之：腰壁付き梁柱接合部のエポキシ樹脂注入補修に関する実験的研究，第 5 回 JCI 年次講演会論文集，pp.261~264, 1983.
- 12) 周 小真・東 洋一・遠藤利根徳・清水 泰：大変形後

- の鉄筋コンクリート造開口壁の補修に関する実験研究，第5回 JCI 年次講演会論文集，pp. 265～268，1983.
- 13) 本岡順二郎・小野 新・安達 洋・大森健太郎：震害を受けた鉄筋コンクリート造耐震壁の補修ならびに補修効果に関する実験的研究，第5回 JCI 年次講演会論文集，pp. 729～732，1984.
- 14) 東 洋一・小森清司・酒井 純：過大たわみとひびわれ傷害をうけた床スラブの補修と補強に関する実験的研究，第1回 JCI 年次講演会論文集，pp. 261～264，1979.
- 15) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひびわれ調査・補修指針，昭和55年5月.
- 16) 鶴田康彦：材料—合成樹脂を中心に—，コンクリート工学，Vol. 14，No. 12，pp. 65～69，Dec.，1976.
- 17) 国鉄仙台新幹線工事局：せんかんこう '78 宮城県沖地震特集号，1979. 12.
- 18) 建築研究振興協会：地震被害を受けた建物の復旧設計と工事，浪岡町立病院災害復旧工事の記録，昭和60年3月.
- 19) Mouton, Y. : Réparation des structures en béton fissurées par injection de liants époxydiques, Rapport de recherche LPC No. 86, Juin, 1979.
- 20) Ferguson, P.M. and Matloob, F.N. : Effect of bar cutoff on bond and shear strength of reinforced concrete beams, ACI Journal, Vol. 56, No. 4, pp. 5～23, July, 1959.
- 21) 尾坂芳夫・鈴木基行・寺澤正人・小林茂敏：RC はりのせん断耐力に及ぼす引張主鉄筋途中定着の影響に関する研究，土木学会論文集，第366号/V-4，pp. 133～142，1986年2月.
- 22) 建設省道路局ほか：静内橋地震災害調査報告書（1982年浦河沖地震），昭和57年12月.
- 23) 研究代表者 佐武正雄：1978年宮城県沖地震による被害の総合的調査研究，昭和53年度文部省科研費自然災害特別研究（1）No. 302041，昭和54年3月.
- 24) 研究代表者 乗富一雄：1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究，文部省科研費（No. 58022002），昭和59年3月.
- 25) 石橋忠良・古谷時春：橋脚の耐震補修，補強に関する実験的研究，第5回 JCI 年次講演会論文集，pp. 241～244，1983.
- 26) 森濱和正・小林茂敏：震災を受けた柱状 RC 部材の補修効果，第6回 JCI 年次講演会論文集，pp. 621～624，1984.
- 27) 小林茂敏・森濱和正・高橋正志・高橋弘人：破壊形式の異なる RC 梁の樹脂注入補修効果，セメント技術年報 37，昭和58年.
- 28) 後藤幸正・大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第294号，pp. 85～100，1980年2月.
- 29) Tepfers, R. : Lapped Tensile Reinforcement Splices, ASCE, Vol. 108, No. ST1, January, 1982.
- 30) Orangun, C.O., Jirsa, J.O. and Breen, J.E. : A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, ACI Journal, No. 74-11, pp. 114～122, March, 1977.
- 31) Ferguson, P.M. and Briceno, E. : Bond Stress Development Length for Lapped Splices in Reinforced Concrete Beams and Walls, Progress Summary, The Univ. of Texas at Austin, Austin, Texas, 1968.
- 32) 土木学会：コンクリート標準示方書，昭和55年版。
(1985. 10. 2・受付)