コンクリート切り欠き試験体の曲げ試験による ひびわれ補修材料の評価

EVALUATION OF CRACK REPAIR MATERIALS BY MEANS OF BENDING TEST ON NOTCHED CONCRETE SPECIMEN

橘 高義典*, 上村 克郎**, 中村 成春***

Yoshinori KITSUTAKA, Katsuro KAMIMURA and Shigeharu NAKAMURA

Restoration of strength properties of crack repaired concrete specimen has been studied. Three-point bend tests were carried out on undamaged notched concrete specimens and damaged ones which crack repaired by epoxy resin, and restoration of the specimen was evaluated by means of fracture mechanics parameters such as the fracture energy G_F and the bending strength. The bending strength of repaired concrete specimen was proportional to the E-modulus of resin, and inversely proportional to the width of crack. The fracture energy (G_F) of repaired concrete specimens decreased with increasing the E-modulus of resin. The G_F value of repaired concrete were did not monotonously increase with increasing compressive strength of concrete, and had a tendency of decrease at low water cement ratio.

Keywords : crack, repair, fracture energy, high-strength concrete

ひびわれ, 補修, 破壊エネルギー, 高強度コンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物のひびわれは, 構造物の安全性, 耐久性, 耐水性等を損なう原因であり, その適切な補修方法の確立は重要な研究課題である。特に荷重作用等によって構造部材に発生したひびわれの補修は構造物の機能回復や安全性回復の点で重要であり, それらをどのような材料・工法で補修し強度回復を図るかは今日的な課題となっている。

近年, ひびわれの補修方法としてエポキシ樹脂あるいはポリマーセメントスラリー等の接着材料を用いた注入工法が注目されている¹⁾。これは, ひびわれ空隙内に適度な粘性を持つ接着材を加圧注入し硬化させることにより, ひびわれ空隙を硬化材で充填し, 漏水の防止ならびに部材強度の回復を図るものである。注入工法によるひびわれ補修の利点としては, 適度な接着力および強度を有する接着材料でひびわれ面を固着することによりひびわれ発生以前のコンクリート部材と同等の強度回復が期待できる点が挙げられるが²⁾, さらに伸び能力を有する接着材料を使用することにより, 接着材料の変形能が靱性の向上に寄与し, 元来コンクリートが持つ脆性的な性質

の改善も期待できるものと考えられる。特にエポキシ樹脂による梁部材の注入補修では他の補修方法よりも靱性ならびに靱性回復が優れるとの報告もある³⁾。

また最近では, 高強度コンクリートの建築構造物への適用・研究が盛んであるが, 従来の普通強度のコンクリートに加えて高強度域のコンクリートの補修の必要性も考慮すると, 広範囲なコンクリート強度での補修材料の補修効果を明らかにする必要がある。特に強度の増大に伴い, コンクリートの破壊は脆性的な傾向を示すことが指摘されており^{4), 5)}, その補修については強度回復のみならず靱性の向上も付与できることが望ましい。

以上の諸点を明らかにするためには, さまざまな強度およびひびわれ幅を有するコンクリートの補修後の強度性に及ぼす補修材料の性質を材料レベルで明確にする必要があるが, これらに関する研究例は少ない。ひびわれ内部への樹脂の充填性に関しては筆者らが樹脂の性質, ひびわれ幅, 注入圧等に関し定式的な関係を明らかにしている⁶⁾。今泉・国原らは接着された部材の力学的性状に関する研究^{7)~9)}で, ひびわれ補修後のコンクリートの純引張強度および割裂強度に及ぼす接着剤の性質の影響

* 宇都宮大学工学部建設学科 助手・工博

** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

*** 宇都宮大学 大学院生

Research Assoc., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Utsunomiya Univ.

を検討している。H. D. Kleinschrodt¹⁰⁾ は、硬化樹脂により補修したコンクリートの破壊エネルギーを求めた結果、補修前よりも破壊エネルギーはやや向上する傾向にあるとの報告を行っている。しかしながら、広範囲の強度域およびひびわれ幅を有するコンクリートの補修後の強度性状および靱性に及ぼす硬化樹脂の性質に関して検討を行った例は見られない。

本研究は、エポキシ樹脂によりひびわれ補修したコンクリートの強度回復性を、切り欠きを有するコンクリート直方試験体の曲げ試験により評価することとし、補修前後の試験体の曲げ強度ならびに破壊エネルギーに及ぼすコンクリート強度、ひびわれ幅、エポキシ樹脂の引張弾性係数等の影響を明らかにすることを目的とする。

2. ひびわれ補修材料の評価方法

ひびわれ補修後の強度性状の評価方法には、モルタル試験体の曲げ試験によるもの¹¹⁾、コンクリート円柱供試体の割裂試験を用いたもの^{8),9)}、純引張試験としたもの⁷⁾、せん断試験¹²⁾によるものなどがある。また、部材欠損を有するコンクリート試験体の補修性能を曲げ試験により評価している例¹³⁾もある。しかしながら、強度評価と同時に靱性評価を行うためには、安定した荷重-変位曲線から、破壊時までの吸収エネルギーを精度よく求める必要がある。そこで本研究では、近年そのコンクリート工学への適用が検討されている破壊力学的手法に着目し、モードⅠの破壊靱性試験により補修前後のコンクリート試験体の評価を行うこととした。すなわち、中央に切り欠きを有するコンクリート試験体の3点曲げ試験を、健全試験体および曲げ破壊後リガメント部（ひびわれ破壊部分）を補修した試験体について行い、荷重-変位曲線を求め最大曲げ強度および破壊靱性値を求めた。破壊靱性値は、荷重-変位曲線で囲まれた面積を破壊面の投影断面積で除した破壊エネルギー G_F ¹⁴⁾とした。

なお、本評価方法では、ひびわれ補修を行う試験体には荷重履歴により微細ひびわれの蓄積したいわゆるフラクチャープロセスゾーンが形成されており、健全なコンクリートを樹脂で接着した場合での評価値とは異なる。また、補修後の試験体にも切り欠き部から強制的にひびわれを発生されるものである。したがって、本試験方法は、補修材料の強度回復性状を相対的に評価する一試験方法と位置づけられる。

切り欠き試験体での曲げ強度 f_b (kgf/cm²) は下式により求めた¹⁰⁾。

$$f_b = \frac{1.5 l \cdot (F_{\max} + mg/2)}{a \cdot b^2} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

l : スパン (cm)

$F_{\max}$: 最大荷重 (kgf)

mg : 試験体自重 (kgf)

a : リガメント幅 (cm)

b : リガメント高さ (cm)

また、破壊エネルギー G_F (kgf/cm) は RILEM が提唱する下式¹⁴⁾で求めた。

$$G_F = \frac{W_0 + mg \cdot \delta_0}{A_{lig}} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

W_0 : 荷重-変位曲線下の面積 (kgf·cm)

mg : 試験体の自重 (kgf)

δ_0 : 破断時の垂直変位 (cm)

A_{lig} : リガメントの垂直投影面積 (cm²)

3. 実験概要

3.1 コンクリートの種類

コンクリートの強度は、通常使用される強度に加え高強度域を考慮し、水セメント比を 25, 35, 50, 65 % の 4 条件とした。水セメント比 25 % および 35 % の条件では高性能減水剤（アニオン型特殊活性剤、WH 2000）を使用した。また、粗骨材の絶対容積はいずれの水セメント比でも 400l/m³一定とした。使用した骨材の性質を表—1 に、コンクリートの調合条件を表—2 に示す。また、フレッシュコンクリートの性質ならびに材令 9 週（補修試験体試験材令）での強度性状を表—3 に示す。

表—1 骨材の性質

骨 材 の 種 類		産 地	最大 寸法mm	表乾比重	吸水率 %	単位容積 重量kg/l	実積率 %	粗粒率 F.M.	40t 破砕率%
細骨材	川 砂	鬼怒川	5	2.65	1.85	1.72	—	2.96	—
粗骨材	川砂利	鬼怒川	20	2.60	0.41	1.69	65.4	6.67	13.8

表—2 コンクリートの調合条件

記号	水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	粗骨材絶対容積 l/m ³	混和剤 SP ⁺ C×%	単 位 量 kg/m ³			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
C25	25	42.7	400	3.6	129	516	790	1040
C35	35	42.7	400	1.0	153	438	790	1040
C50	50	42.7	400	—	179	358	790	1040
C65	65	42.7	400	—	197	303	790	1040
備考	* セメント重量に対する重量比							

表—3 フレッシュコンクリートの性質および材令 9 週での強度性状

記号	線温度 T °C	スランブ SL cm	スランブフロー値 mm	空気量 (圧力法) %	圧縮強度 f_c kgf/cm ²	割裂強度 f_t kgf/cm ²	弾性係数 E_c ×10 ⁵ kgf/cm ²
C25	29.5	24.0	475×450	2.4	738	40.0	4.01
C35	28.0	17.5	325×310	2.4	592	33.2	4.22
C50	26.5	16.0	245×240	1.5	489	34.9	3.13
C65	22.0	20.5	400×430	0.6	292	31.0	2.51
備考	* $f_c/3$ 割線法による弾性係数						

表—4 エポキシ樹脂の調合

記 号	R1	R2	R3	R4
主 剤	エポキシ樹脂E-815	100	100	100
硬化剤 No. 1	変性脂肪族ポリアミン	60	20	—
硬化剤 No. 2	変性芳香族ポリアミン	20	40	60
骨 材	標準砂	—	—	640
備 考	表中の数字は、主剤を100とする重量比			

表—5 エポキシ樹脂の性質

記 号	R1	R2	R3	R4
粘 度 (c p)	475	1000	1920	—
引張弾性係数 Ee (kgf/cm ²)	10	14000	21000	26000
引張破断強度 (kgf/cm ²)	34	440	400	100
引張破断伸び率 (%)	215	3.8	2.1	0.4
コンクリート 平滑面への 付着強さ試験	強さ ^{*1} (kgf/cm ²)	14.4	51.3	50.3
	破断状況 ^{*2}	A	A	A
接 着 強 さ 試 験	モルタル母材の強度 (kgf/cm ²)	圧 縮	596	540
		曲 げ	76.1	73.8
	接 着 強 さ (kgf/cm ²)		77.8	68.5
	変 動 係 数 (%)		8.1	12.4
	破 断 状 況 ^{*2}		M	M
備 考	^{*1} コンクリート下地と4×4cm金属治具との接着引張強さ ^{*2} A: 金属治具との界面破断, R: 樹脂破断, M: 母材破断			

3.2 エポキシ樹脂の種類

今回は補修材料の特性として引張弾性係数に着目し、補修材料には硬化材の調合条件により引張弾性係数を制御できるエポキシ樹脂を使用することとした。使用した樹脂は主剤がエポコート 815、硬化剤 No.1 が変性脂肪族ポリアミン、硬化剤 No.2 が変性芳香族ポリアミンであり、硬化剤 No.1 と No.2 の混合比率を変えることにより引張弾性係数を変化させた。すなわち実施工で用いられているエポキシ樹脂の弾性係数よりも広範囲の条件を設定することとし、計4種類の調合条件を設定した。なお、最も引張弾性係数の大きい条件では骨材を混入し、それにはセメントの物理試験用に用いられている豊浦産標準砂を使用した。樹脂の重量調合比を表—4 に示す。

3.3 エポキシ樹脂の性質

表—5 中にはエポキシ樹脂の各種性質を示した。樹脂の引張弾性係数、引張破断時強度、引張破断時伸び等は JIS K 6911 に従った。試験体はひびわれ補修に用いたものと同様の条件で作製、養生 (20°C, 60 % RH) し、試験材も補修後の曲げ試験と同一とした。コンクリート平滑面への付着強さは、樹脂のコンクリート面への接着強さの参考値として求めた。40×40 mm の付着面積をもつ金属治具をグラインダー処理したコンクリート面に樹脂で接着し、1週間後に引張試験を行い最大荷重を接着面積で除し付着強さとした。使用したコンクリート

図—1 試験体の概要

強度は 400～600 kg/cm² の範囲であった。接着強さは JIS A 6024 「建築補修用注入エポキシ樹脂」に準じて求めた。すなわち、JIS R 5201 により作製した 40×40×160 mm のモルタル試験体の曲げ試験を行い、その後 40×40 mm の型枠脱型面 2 面を 1 mm の鋼線を介し挟み、その間に樹脂を注入し接着させ、1週間養生後曲げ試験を行い、曲げ強度を求め接着強さとした。

3.4 試験体概要

3点曲げ試験に用いるコンクリート試験体の寸法は 100×100×450 mm で、リガメント長さは試験体せいの 1/2 の 50 mm とし、試験体数は各条件について 3 体とした。試験体の概要を図—1 に示す。試験体は鋼製型枠に打設後 2 日で脱型、以後 20°C で水中養生とした。材令 8 週目に切り欠き試験体の曲げ試験を行った。試験体の切り欠きは試験直前にコンクリートカッターで作製した。曲げ試験後の破断試験体は 20°C, 60 % RH の恒温恒湿室で 24 時間乾燥後、破断面をエポキシ樹脂により接着補修した。

3.5 補修方法の概要

エポキシ樹脂による接着補修の手順は以下のとおりである。曲げ試験により破断した試験体の切り欠き間に木製スペーサーを挟み継ぎ合わせ、リガメント間に所定の隙間幅を作る。試験体はリガメント部が下面になるよう横に置き、ひびわれ部をはく離性ウレタン系シール材で上面以外を除き 3 面シールする。3 時間後シール材が硬化してから、スペーサーを外し、エポキシ樹脂を注射器を用いひびわれ間にひびわれ上部から注入する。5, 6 時間後にさらに予備注入を行い隙間を完全に樹脂で充填する。その後再度スペーサーを切り欠き部に挟み 3 日間養生し、シール材を剥し曲げ試験まで約 4 日間養生する。なお、粘度が最も大きい樹脂 R4 ではひびわれへの注入が不可能であったため、ひびれ面へ樹脂を直接塗布し、所定のひびわれ幅が得られるように切り欠き部にスペーサーを挟みひびわれ面を接着させることとした。

ひびわれ条件は、0.5, 1.5, 3.0 mm の 3 段階とした。あらかじめ曲げ試験による破断前ならびに樹脂補修後に試験体側面に貼った標点間の距離をコンタクトゲージにより測定し、その差からひびわれ幅を求めることとし、

図-2 実験手順

図-3 曲げ試験概要

所定のひびわれ幅が得られるようスパーサーの厚さを調節した。

補修後の試験体の曲げ試験は材令8週の曲げ試験から1週間後の9週目に行った。

以上の実験手順を図-2にまとめて示す。

3.6 曲げ試験の概要

曲げ試験は以下の要領で行った。油圧サーボ型載荷試験機に試験体を図-3のように取り付け、試験体中央に一定速度 (10~12 kg/sec) で載荷した。垂直荷重は500 g 感度のロードセルにて検出し、裁荷点下部の垂直変位は治具に取付けた0.005 mm 感度の変位計により2点測定し、いずれもデータアナライザに入力し0.1 secの間隔で記録した。変位計の取付治具は支点部のめり込みの影響を除去するとの意図による。XYレコーダーに荷重-変位曲線を同時に記録した。荷重-変位曲線の安定性を確認するために、リガメント端部 (試験体中央) の開口変位も参考値としてクリップゲージにて計測した。ひびわれ破断時の垂直変位 δ_0 は、データアナライザに

図-4 曲げ試験結果 (補修前コンクリート)

図-5 セメント水比と強度性状 (補修前コンクリート)

記録したデータを分析し変位が急激に増加し始めた点とした。

4. 実験結果および考察

4.1 補修前の試験体に関する結果および考察

図-4に材令8週での健全試験体の荷重-変位測定結果例を示す。荷重-変位曲線は破断時まで安定した曲線となっている。本図より低水セメント比の試験体ほど最大耐力ならびに初期の剛性は増加するが、最大荷重後の荷重-変位曲線の落ち込みの程度が大きくなる傾向にあり、曲線で囲まれる面積は必ずしも増大していない。

図-5に材令8週目での曲げ強度および破壊エネルギー測定値とセメント水比との関係を示す。試験体総数は36本でありその平均値で示した。曲げ強度はセメント水比が大きくなるほど増大する傾向にあるが、破壊エネルギーはセメント水比に単純に比例せず高セメント水比で頭打ちの傾向がある。すなわちペーストマトリックスの強度が増大するほどコンクリートの強度は大きくな

表—6 曲げ強度測定結果

樹脂の種類		R1		R2		R3		R4	
Ee kgf/cm ²		10		14000		21000		26000	
W/h幅 h mm	コンクリートの種類	f b 平均値 kgf/cm ²	変動 係数 %	f b 平均値 kgf/cm ²	変動 係数 %	f b 平均値 kgf/cm ²	変動 係数 %	f b 平均値 kgf/cm ²	変動 係数 %
0.5	C25	17.3	33.1	—	—	54.7	3.7	63.7	—
	C35	34.9	22.6	68.2	11.9	69.1	6.4	70.0	—
	C50	45.1	4.8	44.4	25.4	32.1	17.7	46.0	11.9
	C65	25.6	28.1	47.7	10.4	51.2	—	—	—
1.5	C25	17.3	13.8	60.5	20.4	73.9	14.9	79.8	8.0
	C35	22.4	17.8	73.7	22.2	73.7	10.6	72.0	9.8
	C50	33.1	3.3	63.3	8.8	73.0	13.4	66.9	10.8
	C65	—	—	—	—	39.1	—	44.6	7.8
3.0	C25	9.2	20.2	40.1	18.4	74.0	5.1	78.0	8.8
	C35	11.9	7.5	55.0	2.9	63.4	8.4	71.6	11.5
	C50	22.3	12.1	47.2	9.9	60.6	3.2	84.2	7.6
	C65	15.0	—	34.3	—	55.4	—	56.6	12.7

表—7 破壊エネルギー測定結果

樹脂の種類		R1		R2		R3		R4	
Ee kgf/cm ²		10		14000		21000		26000	
W/h幅 h mm	コンクリートの種類	GF 平均値 kgf/cm	変動 係数 %	GF 平均値 kgf/cm	変動 係数 %	GF 平均値 kgf/cm	変動 係数 %	GF 平均値 kgf/cm	変動 係数 %
0.5	C25	0.274	8.4	—	—	0.201	18.4	0.206	—
	C35	0.689	8.1	0.501	6.8	0.280	14.2	0.250	—
	C50	0.752	8.0	0.381	3.4	0.175	19.6	0.171	12.3
	C65	0.518	33.5	0.282	8.2	0.142	—	—	—
1.5	C25	0.467	14.3	0.324	5.3	0.253	24.6	0.289	7.9
	C35	0.619	8.6	0.344	8.1	0.207	7.3	0.245	8.7
	C50	1.010	8.7	0.458	26.8	0.318	22.5	0.151	20.5
	C65	—	—	—	—	0.178	—	0.183	40.6
3.0	C25	0.294	18.2	0.313	9.6	0.211	40.0	0.301	22.5
	C35	0.733	4.8	0.488	9.7	0.347	21.6	0.251	22.5
	C50	0.664	13.0	0.276	24.6	0.137	13.8	0.147	25.1
	C65	0.522	—	0.432	—	0.186	—	0.267	15.1

表—8 曲げ試験での破壊状況

樹脂の種類		R1			R2			R3			R4		
Ee kgf/cm ²		10			14000			21000			26000		
W/h幅 h mm	コンクリートの種類	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.5	C25	I	I	I	—	—	—	CI	—	CI	—	—	C
	C35	I	I	I	CI	C	CI	C	C	C	C	C	C
	C50	I	I	—	C	C	CI	CI	C	C	—	C	C
	C65	I	I	I	C	C	CI	—	C	—	—	—	—
1.5	C25	I	I	I	CI	CI	CI	CI	CI	CI	C	C	C
	C35	I	I	I	CI	CI	CI	C	C	C	C	C	C
	C50	I	I	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C
	C65	—	—	—	—	—	—	CI	—	C	C	C	CI
3.0	C25	I	I	I	CI	CI	CI	CI	CI	CI	C	C	C
	C35	I	I	I	CI	CI	CI	C	C	C	C	C	C
	C50	I	I	I	C	C	CI	C	C	C	C	C	C
	C65	I	—	—	CI	CI	—	C	—	C	C	C	C

るが、吸収エネルギーは比例して増加せず、脆性的になる傾向があるといえる。このような脆性化の理由としては、ペーストマトリックスの強度が大きくなるほど、ひびわれの進展は骨材とペースト界面間の伝播から骨材を貫通する破壊モードに移行し、骨材のブリッジング効果が減少することが挙げられる⁵⁾。このことは、破断面の観察結果からも推察でき、C50、C65等の高水セメント

図—6 曲げ試験結果 (補修後コンクリート)

比試験体の破断面では骨材が破断せず凹凸状となっているのに対し、C25等の低水セメント比試験体の破断面では骨材が破断し平坦になる傾向があった。

4.2 補修後試験体の実験結果

表—6に補修後の曲げ試験で得られた曲げ強度平均値および変動係数を、表—7に破壊エネルギーの平均値および変動係数をまとめて示した。

表—8に補修試験体破壊後の破壊状況をまとめて示した。破壊の状況により、C：コンクリート破断（コンクリート母材が破断する）、I：界面破断（樹脂とコンクリート面が剥がれて破断する）、CI：CとIの複合に分類した。なお、いずれの条件でも樹脂自体の破断は観察されなかった。全体的に樹脂の引張弾性係数が大きくなるほど破壊モードは界面破壊からコンクリート破壊に移行する傾向にある。なお、樹脂RIはすべての条件で樹脂の一部のみが界面破断となり試験体は完全破断には至っていない。これは樹脂RIの伸び能力に起因するものである。したがって、垂直変位は明確な最大値を示さないが、 G_f を求める場合には荷重がほぼ0となる垂直変位4mmを最大値とした。

図—6に補修後の曲げ試験で得られた荷重-変位曲線の測定例を示す。水セメント比35%，ひびわれ幅3.0mmの場合について示した。エポキシ樹脂の引張弾性係数が小さくなるほど荷重-変位曲線は偏平な曲線になり、荷重に対する変形量が大きくなる。ただし、最大荷重ならびに初期剛性は低下する。したがって、補修後の曲げ試験での荷重-変位特性は、使用したエポキシ樹脂の性質を反映しており、高引張弾性係数の樹脂を用いるほど強度ならびに剛性は大きくなり、低引張弾性係数の樹脂を用いるほど強度は低下するが変形能は大きくなる傾向がある。引張弾性係数の最も大きいエポキシ樹脂R4

図—7 補修試験体の曲げ強度と樹脂の引張弾性係数との関係

図—8 補修試験体の曲げ強度とひびわれ幅との関係

で補修した結果をみると補修前よりも最大荷重は大きくなっており耐力は向上している。また、荷重-変位曲線で囲まれた面積も増加しており、吸収エネルギーも増大している。したがって、適度な引張弾性係数のエポキシ樹脂を使用することにより、補修後の剛性ならびに靱性の向上が可能といえる。

4.3 曲げ強度に関する考察

図—7 に、補修試験体の曲げ強度と樹脂の引張弾性係数との関係を試験体の水セメント比別に示す。各水セメント比の条件においてエポキシ樹脂の引張弾性係数が大きくなるほど曲げ強度は増大する。引張弾性係数の最も大きい樹脂 R4 では、補修前の試験体とほぼ同程度の曲げ強度の回復が得られる。また、高引張弾性係数の樹脂では水セメント比が大きくなるほど補修後の曲げ強度は低下する傾向があるが、低引張弾性係数の樹脂 R1 では、試験体の水セメント比にかかわらず曲げ強度はほぼ同じ値を示す。すなわち、樹脂の引張弾性係数が大きくなるほど、曲げ強度はコンクリートの強度に依存し、樹脂の引張弾性係数が小さい場合には曲げ強度は樹脂の性質に依存するといえる。このことは、表—8 の曲げ試験での破断状況で、低引張弾性係数の樹脂の場合は樹脂とコンクリート界面で破断する場合が多いのに対し、高

引張弾性係数の樹脂の場合はコンクリート母材での破断が多くなることから推察できる。この理由には、接着剤の引張弾性係数が小さくなるほど接着界面に働く引張応力が高くなること¹⁵⁾、表—5 の実験結果に示すように、今回用いたエポキシ樹脂では引張弾性係数が小さいものほどコンクリート破断面との接着力が低下する傾向にあることなどが考えられる。

図—8 に曲げ強度とひびわれ幅の関係を水セメント比別に示した。引張弾性係数の低い樹脂では、ひびわれ幅が大きくなるほど補修後の試験体の曲げ強度は低下する傾向がある。しかしながら樹脂の引張弾性係数が大きくなるほどこの傾向は不明確になり、高引張弾性係数の樹脂では補修後の曲げ強度は補修前とほぼ同じ値か大きな値を示す。したがって、樹脂の引張弾性係数が小さくなるほど、補修後の強度はひびわれ幅の影響を受けやすいと考えられる。ひびわれ幅 0.5 mm において、曲げ強度が低下するものがあるがこれは樹脂の充填不良が原因と思われる。

4.4 破壊エネルギーに関する考察

図—9 に破壊エネルギー G_F と樹脂の引張弾性係数との関係を水セメント比別に示す。各条件において G_F は補修前よりも同等あるいはそれ以上となっており、樹脂

図—9 補修試験体の破壊エネルギーと樹脂の引張弾性係数との関係

図—10 補修試験体の破壊エネルギーと水セメント比との関係

を用い補修することにより吸収エネルギーの点では増加傾向が見られる。各水セメント比の条件において、樹脂の引張弾性係数が小さくなるほど G_F は直線的に増大し、曲げ強度とは逆の傾向を示す。すなわち、変形能の大きい樹脂ほど補修後のコンクリートの破壊エネルギーは大きくなる。また、樹脂の引張弾性係数が大きくなるほど破壊エネルギーは単純に減少せず、引張弾性係数 $2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 付近で最小値となり、それ以上の引張弾性係数では同等あるいはやや向上する傾向がある。特に水セメント比 50, 65 % の条件で顕著である。

ひびわれ幅と破壊エネルギーとの関係は明確ではなく、各ひびわれ幅の条件ともほぼ同じ破壊エネルギー値を示す。

図—10 に補修後の試験体の破壊エネルギーと水セメント比との関係を補修樹脂の引張弾性係数別に示した。各引張弾性係数の条件において、破壊エネルギーは水セメント比が小さくなるほど大きくなるが、 $W/C=35\%$ で最大となり、 $W/C=25\%$ では逆に減少する傾向がある。この傾向は低引張弾性係数の樹脂ほど顕著である。すなわち、コンクリート強度が増大すると、樹脂補修による靱性は単純に比例せず、あるコンクリート強度で最大となる。この理由としては、図—5 に示したように低

水セメント比ではコンクリート母材自体が脆性的になることが挙げられるが、他の要因として接着破壊面の状態の差異が考えられる。すなわち、低水セメント比のコンクリートでは組織が緻密になるため、樹脂が接着する際のアンカー効果が低下し接着力が十分得られないこと、補修前の曲げ試験によるコンクリート破断面が骨材の破断を含めた平滑面であるため、補修後の曲げ試験において骨材の凹凸によるひびわれ進展の抵抗効果が低減することなどが考えられる。

4.5 回復率に関する考察

図—11 には曲げ強度の回復度と樹脂の引張弾性係数との関係を示した。両者には比例関係が見られるが、ひびわれ幅 3.0 mm では、各水セメント比の条件とも樹脂の引張弾性係数が $2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 付近で回復率が 1 となる。ひびわれ幅が小さくなるほど、回復率と引張弾性係数との関係はコンクリートの条件によって異なる傾向にある。特に水セメント比 25 % の条件では他の条件よりも回復率が低くなる。したがって、ひびわれ幅が大きい場合には、強度の回復性は樹脂の性質に依存するが、ひびわれ幅が小さくなるほど、コンクリートの条件に影響を受けやすくなるといえる。

図—12 には、補修前後での破壊エネルギーの回復率

図—11 曲げ強度の回復率と樹脂の引張弾性係数との関係

図—12 破壊エネルギーの回復率と樹脂の引張弾性係数との関係

と樹脂の引張弾性係数との関係を示した。各ひびわれ幅の条件とも、樹脂の引張弾性係数が増加するほど回復率は減少し、樹脂の引張弾性係数 $2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 前後で回復率は1を示す。また、それ以上の引張弾性係数では回復率はやや上昇する傾向にある。水セメント比 25 % では回復率の変化は少ない。

5. 結 論

エポキシ樹脂によるひびわれ補修前後の試験体の曲げ強度ならびに破壊エネルギーに及ぼす樹脂の引張弾性係数、コンクリート強度、ひびわれ幅等の影響について検討した結果、本実験の範囲で以下が明らかになった。

- (1) 今回使用したエポキシ樹脂では引張弾性係数が大きくなるほど補修後の試験体の曲げ強度は大きくなる傾向がある。
- (2) 補修後の試験体の曲げ強度は、ひびわれ幅が大きくなるほど小さくなる傾向があり、それは樹脂の引張弾性係数が低くなるほど顕著に見られる。
- (3) 補修後の試験体の破壊エネルギーは、補修前よりも同等あるいはそれ以上となり、樹脂の引張弾性係数が小さくなるほど直線的に増大する。また、引張弾性係数が $2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 前後で最小値となる傾向があった。

(4) コンクリート強度が増大すると樹脂補修による破壊エネルギーは単純に比例せず、 $W/C=35\%$ 前後でピークとなりそれ以上は減少傾向を示す。これは低引張弾性係数の樹脂ほど顕著である。

今後の課題として、広範囲の材質の補修材料の評価、部材レベルでの評価への対応、混合破壊モードでの評価等が挙げられる。

謝 辞

実験試料にご協力頂きました、ダイヤリフォーム(株)、山宗化学(株)ならびにサンユレジン(株)に感謝いたします。また実験にご協力頂きましたスミセコンクリートエンジニアリング(株)ならびに金子和人氏(宇大技官)、高瀬憲克氏(元宇都宮大学院生、現住友建設)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 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・補強指針, pp. 89~103
- 2) Collins, F. and Roper, H. : Laboratory Investigation of Shear Repair of Reinforced Concrete Beams Loaded in Flexure, ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 2, pp. 149~159, March-April, 1990
- 3) Basunbul, I. A., Gubati, A. A., Al-Sulaimani, G. J.

- and Baluch, M.H. : Repaired Reinforced Concrete Beames, ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 4, pp. 348 ~ 354, July-August, 1990
- 4) Shah, S.P. : Fracture Toughness for High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 4, pp. 260 ~ 265, July-August, 1990
- 5) 野村希晶, 三橋博三, 鈴木 篤, 和泉正哲 : 非線形破壊力学手法に基づく高強度コンクリートの脆性化機構の考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 416 号, pp. 9 ~ 16, 1990. 10
- 6) 上村克郎, 小西敏正, 橋高義典 : コンクリートのひびわれ補修における樹脂の充填程度の数式化, セメント技術年報, No. 42, pp. 491 ~ 494, 1988. 12
- 7) 今泉勝吉, 青山 幹, 林 好正, 国原安彦 : 接着された部材の力学的性状に関する研究 (その 1 接着面積・接着層厚の接着強度・変形能に及ぼす影響の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 555 ~ 556, 1988. 10
- 8) 国原安彦, 今泉勝吉, 青山 幹, 林 好正 : 接着された部材の力学的性状に関する研究 (その 2 割裂接着強度試験による接着強度と接着層の変形能の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 831 ~ 832, 1989. 10
- 9) 国原安彦, 今泉勝吉, 青山 幹, 林 好正 : 接着された部材の力学的性状に関する研究 (その 3 ひびわれ性状が割裂接着強度に及ぼす影響の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 257 ~ 258, 1990. 10
- 10) Kleinschrodt, H.D. : Evaluation of Force-locking Epoxy-resin Injection in Concrete Cracks by Means of Fracture Mechanics Parameters, Fracture of Concrete and Rock : Recent Developments, Elsevier Applied Science, pp. 537 ~ 548, 1989
- 11) JIS A 6024 : 建築補修用注入エポキシ樹脂
- 12) 長滝重義, 岡本享久, 曾我寿考 : 断面修復した鉄筋コンクリートはりの力学挙動と合理的補修設計法の提案, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp. 1281 ~ 1286, 1990. 7
- 13) 柿崎正義, 枝広英俊 : コンクリート構造物の品質向上に向けて, その 2・補修方法はどれがよいか, セメント・コンクリート No. 512, pp. 52 ~ 66, Oct. 1989
- 14) 50-FMC Committee : Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched Beames, Materials and Structures, RILEM, Vol. 18, No. 106, pp. 285 ~ 290, 1985. 7, 8
- 15) Keer, J.G. and Emberson, N.K. : A Theoretical and Experimental Study on Concrete Members Repaired by Resin Injection, Proceedings of an International Symposium Organized by RILEM Technical Committee 52, sept. pp. 16 ~ 19, 1986

(1991 年 7 月 10 日原稿受理, 1991 年 11 月 28 日採用決定)