

## 論文 高性能吹き付けモルタルを用いた断面修復 RC 梁の疲労性状

黒川 章二<sup>\*1</sup>・鈴木 正志<sup>\*2</sup>・羅 黄順<sup>\*3</sup>・嶋野 慶次<sup>\*4</sup>

要旨：繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート(RC)梁において，断面修復用高性能吹き付けモルタルの疲労性状を明らかにするために，通常の健全な RC 梁，高性能吹き付けモルタルを充填して断面を修復した RC 梁，ダウエル用鉄筋を立てて高性能吹き付けモルタルを充填して断面修復した RC 梁について，静的載荷試験および疲労試験を行った。その結果にもとづいて 3 種類の RC 梁における疲労性状を比較した。

キーワード：鉄筋コンクリート梁，断面修復，吹き付けモルタル，疲労試験，ひびわれ

## 1. はじめに

日本における既存社会資本の維持更新需要は，2020 年には 2000 年の 2.5 倍になると見込まれており，構造物の補修・補強の需要が年々増加する傾向にある<sup>1)</sup>。

近年，コンクリートやモルタルの剥落が一般市民に不安感を与えるようになってきた。その多くが鉄筋の腐食により，コンクリートひび割れが発生し，さらに剥離に至るものである。そのようなコンクリート構造物については，劣化したコンクリートを取り除いて，断面修復施工を行わねばならない。

断面修復材に対する一般的な要求性能として，圧縮強度，曲げ強度，引張強度などが既存コンクリートと同等以上であること，熱膨張係数，弾性係数，ポアソン比などが既存コンクリートと同等であること，乾燥収縮や硬化収縮が小さく接着性が高いことなどが挙げられている<sup>2)</sup>。

最近，弾性係数が小さいこと以外は，それらの要求性能を十分に満足し，とくに早期に強度を発現し，厚付けが容易なモルタル吹き付け材が開発された。断面修復材の使用にあたり，構造物の機能を低下させないこと，鉄筋の耐久性を

守ることが実証されなければならない。

新開発された修復材により断面修復した RC 梁について，耐荷力およびひび割れ性状などを調べるための静的載荷試験，繰返し荷重に対する修復部分の剥落の有無，有害ひび割れ発生の有無，疲労強度，変形性能などを調べるための疲労試験を行った。断面修復した RC 梁には旧コンクリートと修復部との水平方向界面にひび割れが発生して分離に至る可能性があり，その対策として，ダウエル用鉄筋を埋め込んだ RC 梁についても静的載荷試験および疲労試験を行った。それらの試験により，RC の断面修復に新開発された修復材を使用する場合の繰返し荷重に対する知見が得られたので報告する。

## 2. 実験に用いた修復材

この修復材は，特殊セメント，珪砂，特殊フィラー，特殊混和材，ビニロン繊維をプレミックスした粉体に現場で水を加えて練混ぜる吹き付け用モルタルである。材料の分離抵抗が大きい，吹き付け時のリバウンドがきわめて少ない，付着性能に優れている，強度が大きい緻密な構造のため劣化因子が進入しにくい硬化体となる，

\*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科教授 (正会員)

\*2 東電工業 工事本部 (正会員)

\*3 計測リサーチコンサルタント 企画開発部 (正会員)

\*4 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 (正会員)

熱膨張率がコンクリートとほぼ同じでひび割れが発生しにくいなどの特徴をもつ。その物性は、表 1 に示すとおりであり、弾性係数が幾分小さい以外は断面修復材に要求される性質を十分に満足する。引張強度が大きく弾性係数が小さいことは、ひび割れが出にくいので、鉄筋の保護の面からは有利である。ホンプなどで吹き付け、こてで押さえることにより平滑面をつくることができる。

表 - 1 修復材の物性

試験項目		測定値
練り水量/混合粉体 (%)		19
フロー値 (mm)		179
硬化体密度 (g/cm <sup>3</sup> )		2.22
硬化時間 (時:分)	始発	1:32
	終結	3:53
圧縮強度 (養生 20 気 中)(MPa)	材齢 3 日	30.0
	材齢 7 日	45.8
	材齢 28 日	56.0
引張強度 (養生 20 気中) (MPa)	材齢 3 日	2.0
	材齢 7 日	2.7
	材齢 28 日	4.4
曲げ強度 (養生 20 気中) (MPa)	材齢 3 日	4.9
	材齢 7 日	6.0
	材齢 28 日	8.2
静弾性係 数 (養生 20 気中) (MPa)	材齢 3 日	1.5 × 10 <sup>4</sup>
	材齢 7 日	2.0 × 10 <sup>4</sup>
	材齢 28 日	2.5 × 10 <sup>4</sup>
付着強度 (建研式付 着力試験) (MPa)	材齢 1 日	1.0
	材齢 28 日	2.3
凍結融解への抵抗性		300 サイクル異常なし
熱膨張係数 (1/ )		10.0 ~ 11.0 × 10 <sup>-6</sup>

### 3. 供試体

供試体は、図 1 および表 - 2 に示すような 3 種類の RC 梁である。A 梁は、通常の健全な RC 梁である。終局時に曲げ引張破壊が生じるように設計した。B 梁は、コンクリート打設時、下底部に幅 150mm、かぶりの 2 倍にあたる深さ 60mm、長さ 1400mm の空間を作り、材齢 4 日にワイヤブラシでこすりながらの水洗いをした後、修復材を押し詰めた。C 梁は、コンクリー

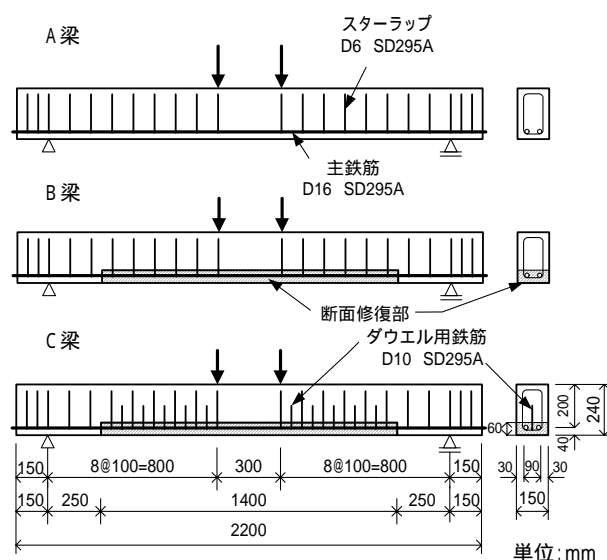


図 1 供試体

表 2 供試体の記号・特徴・用途

	呼称	供試体 記号	用途
A 梁	通常の健全な RC 梁	A-1	静的載荷試験
		A-2	疲労試験
		A-3	疲労試験
		A-4	疲労試験
B 梁	高性能吹き付けモルタルを充填して断面を修復した RC 梁	B-1	静的載荷試験
		B-2	疲労試験
		B-3	疲労試験
		B-4	疲労試験
C 梁	ダウエル用鉄筋を立て高性能吹き付けモルタルを充填して断面を修復した RC 梁	C-1	静的載荷試験
		C-2	疲労試験
		C-3	疲労試験
		C-4	疲労試験

ト打設時，スターラップ間の中央に長さ120mmのD10鉄筋をダウエル用に挿し込んだ。材齢4日にB梁と同様にして断面修復を行った。使用した鉄筋はすべてSD295Aの異

表 3 コンクリートの示方配合

粗骨材 の最大 寸法	スラ ンプ	水セメ ント比	空気 量	細骨材 率	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメ ント	細 骨 材	粗骨 材	混和 剤
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)					
20	8	60	4.5	43	155	258	798	1110	0.645

形鉄筋で，主鉄筋はD19，スターラップはD6である。コンクリートの示方配合は表-3に示すとおりであり，早強ポルトランドセメントを用いた。RC梁と同じように室内気中養生をしたコンクリートの強度試験結果を表4に示す。

表 4 コンクリートの強度試験結果

材齢	圧縮強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (MPa)
7日	27.7	2.33	
28日	33.8	2.51	2.83 × 10 <sup>4</sup>
60日	35.2	2.50	2.78 × 10 <sup>4</sup>

#### 4. 静的載荷試験

##### 4.1 実験方法

材齢28~32日に、図-1のような対称2点振り分け荷重を載荷した。荷重は、ひび割れが発生するまで1kN刻みで増加させて除荷し、再度

表 5 静的載荷試験による主な結果

供試体	断 面 修 復	ダウ エル 用鉄 筋	ひびわ れ荷重 (kN)	終局荷 重(kN)	ひび割れ		破壊形式
					北側面 (本)	南側面 (本)	
A-1	無	無	8.0	100.0	14	11	曲げ引張破壊
B-1	有	無	5.0	100.3	18	19	曲げ引張破壊
C-1	有	有	6.0	99.1	20	18	曲げ引張破壊

載荷し、ひび割れが修復部水平界面(下縁から60mm)に成長するまでは1kN刻みで、その後10kNまで載荷し、以後は5kN刻みでRC梁が破壊するまで載荷した。ひずみゲージによるひずみ測定、ゲージによるひずみ測定、変位計によるたわみ測定をした。倍率20倍の光学的クラック計により、荷重が10kNまでの各荷重段階、その後、20,30,50,70,90kNの荷重段階においてひび割れを観測した。

##### 4.2 実験結果および考察

静的載荷試験における主な結果は表-5に示すとおりである。いずれの梁も曲げ引張破壊し、終局荷重はほぼ等しい。通常のRC梁A-1と比較して、修復RC梁B-1およびダウエル用鉄筋を埋めて修復したRC梁C-1ではひび割れ本数

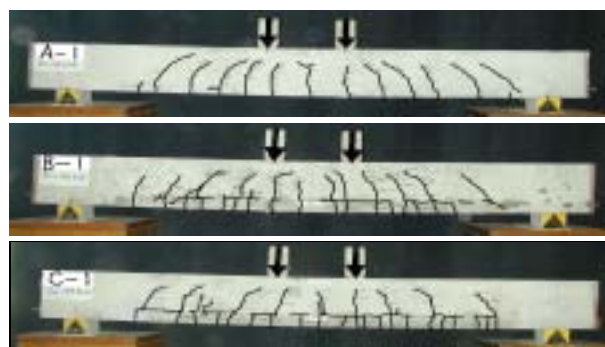


図 2 ひび割れ状況

が多く、ひび割れ発生荷重はB-1,C-1の順に小さい。修復したRC梁のひび割れ発生荷重が小さい原因として、修復材の収縮を旧コンクリートと鉄筋が内部拘束したことによる表層部引張応力の発生が考えられる。なお、修復材は梁が破壊するまで剥離しなかった。梁表面コンクリー

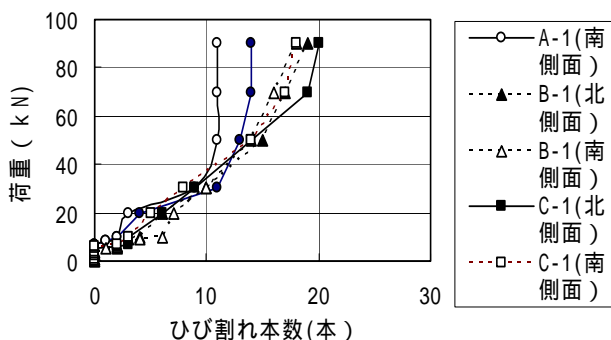


図 3 荷重とひび割れ本数との関係

トのひび割れ状況を図 - 2 に示した。断面修復した B 梁においては、修復材と旧コンクリートとの界面に剥離が発生し、成長した。図 - 2 および図 - 3 に示したように、修復部においては、両引きされたコンクリートのようにならびひび割れが発生し、ひび割れ分散が顕著である。ダウエル作用の効果を期待した C 梁においても、B 梁と同様のひび割れ状況が現れた。図 - 4 は、荷重と最大ひび割れ幅との関係である。荷重に対する最大ひび割れ幅は、A 梁で直線的に拡大するが、B 梁および C 梁では終局荷重の約 50%までは直線的に拡大し、その後拡大が緩和され、終局荷重の 90%において、最大ひび割れ幅は、B 梁で 0.30mm、C 梁で 0.23mm である。ダウエル用鉄筋は、高荷重段階においてひび割れを分散させ最大ひび割れ幅の拡幅を抑制した。通常の RC 梁と比べて、修復した RC 梁の最大ひび割れ幅は、終局荷重の 50%まではほぼ同じで、それより大きい荷重段階では小さくなる。その原因として、修復部がタイロッド化したと考察される。耐久性への影響に対して懸念された修復部の最大ひび割れ幅は、通常の RC 梁よりも低レベルである。

修復部と旧コンクリートとの界面のひび割れを調べるために、測定スパン 50mm の型ゲージを用いてひずみ測定を行った。図 5 は、鉛直界面を跨ぐ型ゲージによるひずみ測定結果である。測定スパンの伸びを旧コンクリートと修復部との界面の拡幅量とみなすと、荷重に対して界面は連続的に拡幅するが、終局荷重時の拡

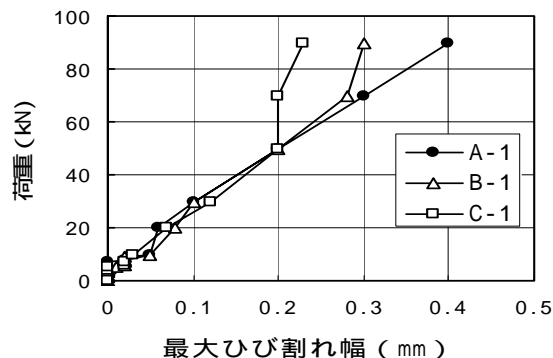


図 4 荷重と最大ひび割れ幅

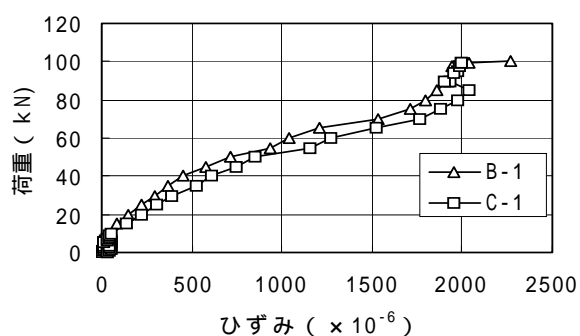


図 5 鉛直界面を跨ぐゲージのひずみ

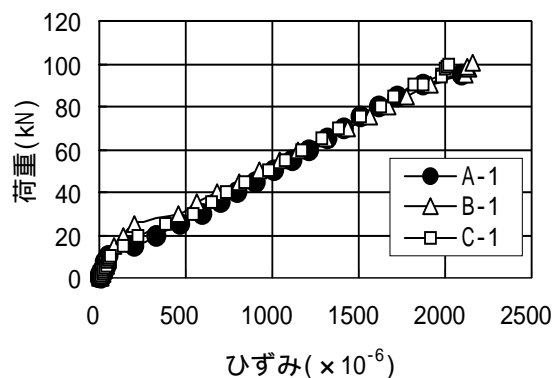


図 6 荷重とスパン中央鉄筋ひずみ

幅量は、B-1 において、 $0.12\text{mm}$  ( $2400 \times 10^{-6}$ )、 $0.10\text{mm}$  ( $2000 \times 10^{-6}$ ) である。心配された界面での突然の分離は起きなかった。

図 - 6 は、スパン中央における鉄筋のひずみである。終局荷重の 60%までは B-1 のひずみが他の梁に比べて小さく、その後大きくなる。これは、修復材が剥離して形成された鉄筋と修復材によるタイロッドにおいて修復材の剥離によるアンボンド化が進行したことによると考察される。

## 5. 疲労試験

表 6 疲労試験の内容と主な結果

### 5.1 実験方法

材齢55日から172日にかけて、図-1に示す2点荷重で4.2Hzの正弦波荷重を作用させた。ひずみゲージによるコンクリートおよび鉄筋のひずみ測定、差動トランス型変位計によるスパン中央のたわみ、型ゲージによる修復部と旧コンクリートの鉛直界面部のひずみ測定を行った。表-5に示したA-1の静的荷重試験結果によると、鉄筋の200万回設計疲労強度は50kNである。これをもとにして、表-6に示すような疲労試験を実施した。各供試体について、200万回荷重の低荷重疲労試験を行ってから、引き続き破壊までの高荷重疲労試験を行った。

供試体	低荷重疲労試験			高荷重疲労試験			
	上限荷重 (kN)	下限荷重 (kN)	備考	上限荷重 (kN)	下限荷重 (kN)	疲労寿命 (万回)	破壊形式
A-2	8	0.8	200万回	70	5.0	89.10	曲げ引張破壊
B-2	8	0.8	200万回	70	5.0	45.35	曲げ引張破壊
C-2	8	0.8	200万回	70	5.0	72.52	曲げ引張破壊
A-3	24	2.4	200万回	80	5.0	34.25	曲げ引張破壊
B-3	24	2.4	200万回	80	5.0	15.83	曲げ引張破壊
C-3	24	2.4	200万回	80	5.0	24.98	曲げ引張破壊
A-4	50	5.0	200万回	破壊までの疲労試験をせずに海岸における暴露試験用に使用			
B-4	50	5.0	200万回				
C-4	50	5.0	200万回				

5.2 実験結果および考察

低荷重疲労試験においては、設計荷重程度の繰返しによる旧コンクリートと修復部の分離の有無、鉄筋の耐久性に大きく影響する鉛直界面でのひび割れ性状を調べることに主眼をおいた。界面の分離やひび割れの成長はたわみに現れるものと想定して、たわみ振幅の変動を測定した。図-7によれば、荷重繰返しに対するたわみ振幅は、上限荷重が50kNのB-4で増加し、他の場合はほぼ一定である。ダウエル用鉄筋が有効に作用している。すなわち、終局荷重の50%においてB梁では変形が進行するが、この変形は鉄筋の挿入により抑えることができる。

### 5.2 実験結果および考察

図-8によれば、修復端鉛直界面におけるひずみ振幅は、B梁、C梁、A梁の順に大きく、荷重繰返しに対して、上限荷重が8kNおよび24kNの場合には一定である。200万回荷重時のゲージ標点間の伸びはそれぞれ0.015および0.011mmである。実験に用いたRC梁のかぶり30mmで異形鉄筋の許容ひび割れ幅は、一般環境で0.15mm、腐食性環境で0.12mm、特に厳しい腐食性環境で0.105mmである<sup>3)</sup>。したがって、終局

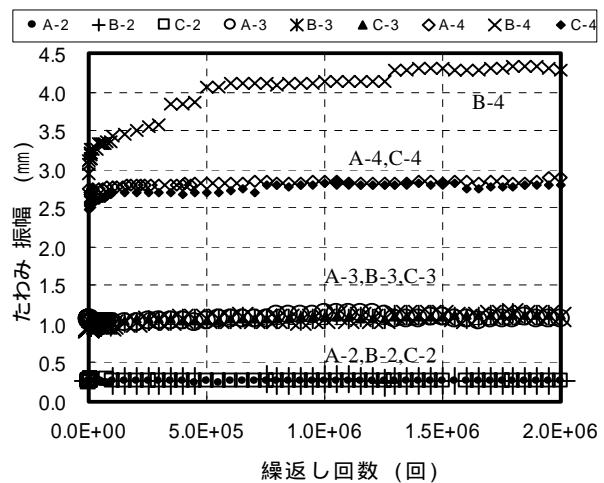


図 7 たわみ振幅と繰返し荷重の関係 (低荷重疲労試験の場合)

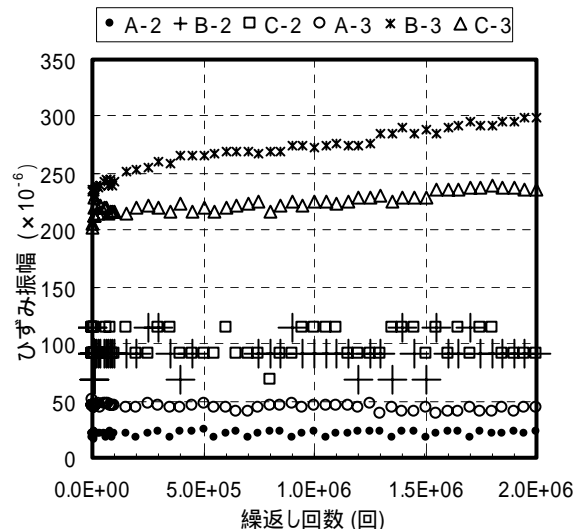


図 8 ゲージによるひずみ測定値 (低荷重疲労試験の場合)

荷重の50%までの上限荷重200万回荷重に対して、この修復材による断面修復はひび割れに対

してかなり安全であるといえる。

疲労寿命試験値を図 - 9 に示した。破壊形式はいずれの場合も曲げ引張疲労破壊である。A 梁に対する修復した RC 梁の疲労寿命は、上限荷重が終局荷重の 70% の場合、B 梁が 50.9%、C 梁が 81.4% であり、上限荷重が終局荷重の 80% の場合、A 梁に対して、B 梁が 46.2%、C 梁が 72.9% である。すなわち、断面修復した RC 梁の疲労寿命は、健全な RC 梁の半分程度である。

しかし、ダウエル用鉄筋の利用によりかなり改善できることがわかった。

高荷重疲労試験の場合、図 10 によれば、荷重繰返しに対するたわみ振幅は、A-3 および C-3 で微増するが、B-3 では著しく増加する。これは、旧コンクリートと修復部の界面剥離によるものと考察される。

図-11 によれば、修復端鉛直界面のひずみ振幅は、いずれもほぼ一定値を保っている。旧コンクリートと修復部との境界のひび割れ幅に換算すると、最終測定値は、C-3 で 0.08mm、B-2 で 0.07mm、C-2 で 0.05mm であり、有害ひび割れ幅には至らなかった。

## 6. まとめ

実験結果による知見をまとめると、

- (1) 断面修復した RC 梁は、通常の RC 梁とくらべて、静的耐力はほぼ等しいが、疲労寿命がほぼ半減する。しかし、ダウエル用鉄筋を配置することによりかなりカバーできる。梁が破壊するまでに修復材の剥離は生じなかった。
- (2) 修復部のひび割れ分散が顕著で、修復部界面を含めて修復部のひび割れ幅は低レベルである。
- (3) 水平界面のひび割れ発生、成長が活発である。ダウエル用鉄筋による改善が見られるが、旧コンクリートの厳格な表面処理などによる界面付着性能の強化が必要である。

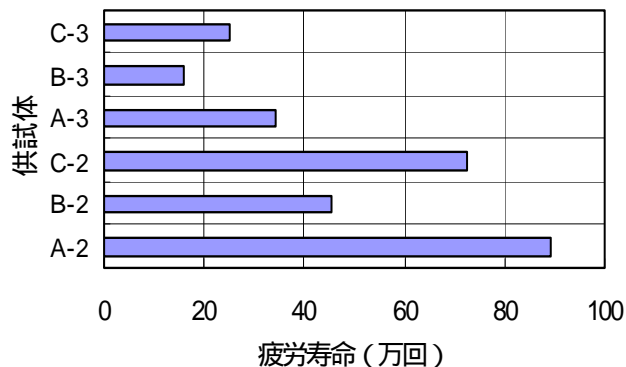


図 - 9 RC 梁の疲労寿命

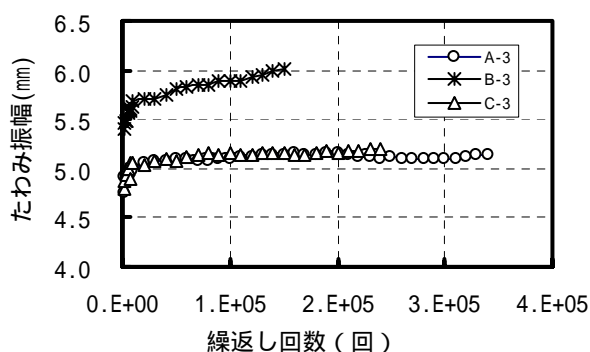


図 10 たわみ振幅と繰返し荷重の関係 (高荷重疲労試験の場合)

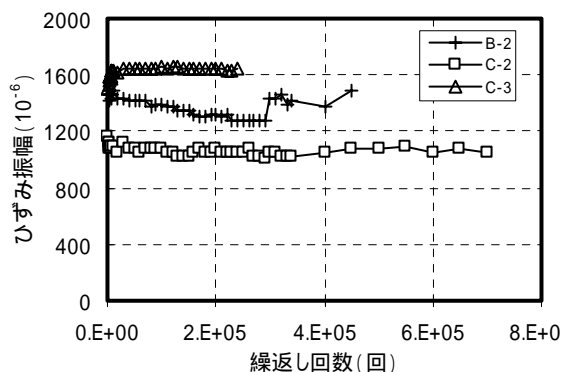


図 11 ゲージによるひずみ測定 (高荷重疲労試験の場合)

## 参考文献

- 1) 松尾稔 監修：建設産業はどう変わるか，鹿島出版会，2001,2
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2003-，日本コンクリート工学協会，2003,8
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造的能照査編]，土木学会，2002,3