

光ファイバーを用いた断面修復済み鉄筋コンクリート梁底面の引張変位計測

Optical Fiber Sensor Measurement on Retrofitted RC Beam Bottom Tensile Displacement

黒川章二*・羅 黄順**

Shoji KUROKAWA and Sunaryo SUMITRO

嶋野慶次***・青木優介*****

Keiji SHIMANO and Yusuke AOKI

- *正会員 木更津工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒292-0041 木更津市清見台東 1-11-1)
**正会員 (株) 計測リサーチコンサルタント企画開発部 (〒140-0013 東京都品川区南大井 3-22-7)
***正会員 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒292-0041 木更津市清見台東 1-11-1)
****正会員 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒292-0041 木更津市清見台東 1-11-1)

The problems related to concrete structure maintenance can be indicated as unavailability of (i) precise and economical monitoring system and (ii) safe and durable repair and retrofit engineering construction method. In recent years, early-strength, freezing-thawing resistance, high-durable and easy thickly-spray shotcrete has been developed. In this research, optical fiber sensory technology was utilized to monitor the deformational properties of shotcrete-retrofitted RC beams. Previously, the reliability and stability of the optical fiber sensory system has been verified by examining the steel expansion coefficient of a steel plate. By investigating crack propagation characteristic, it is confirmed that the fiber sensory technology can be applied to grasp the deformational behavior of retrofitted RC structures.

Key Word : Optical fiber sensor, RC, repaired structure, crack

1. まえがき

社会が健全に発展していくために、社会資本のストックは徐々にでも増やしていかなければならないし、既存ストックの維持管理を継続的に実施しなければならない。わが国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、構造物の診断、補修補強の需要が年々増加する傾向にある¹⁾。構造物を診断し、余寿命や余耐力を確実に予測して、安全な維持管理を行うためには、構造物の現有性能を継続的にモニタリングすることが必要である。土木構造物は屋外に暴露された長大構造物であることから、全構造物に精度のよい非破壊検査法を適用することは非現実的である。したがって、目視などの熟練を要する経験的な点検法が現状では主流であるが、その合理化を意図したモニタリング法の開発が活発に行われつつある²⁾。

多数の長大な土木構造物について効率よく経済的に精密検査を行うためには、大スパンにわたる検査に適した計測方法により、まず精密検査を必要とする異状部分を検出して限定し、つぎにその部分の精密検査をすればよい。著者らは、磁気特性を利用したEMセンサによる鋼

材の現存応力測定方法を開発し、現場構造物の応力モニタリングへの利用をはじめた^{3~5)}。これは鋼材応力についての局部的精密計測法である。既設鉄筋コンクリートにおける鉄筋の応力モニタリングにおいてこのセンサを低コストで有効活用するためには、精密計測が必要な場所の選定が重要である。

分布型光ファイバーセンサは、光ファイバーの長さ方向の任意の点がセンサ機能を持つため、光ファイバーに沿って物理量を連続的に計測することができ⁶⁾、鉄筋コンクリートの局所ひびわれや局所領域のひびわれ損傷を計測することができる⁷⁾。本研究では、鉄筋コンクリート部材の全長や断面修復区間に1本の光ファイバーセンサを設置し、それによりひびわれなどの変状を検出しようとするものである。そこで、最大50mまでのセンサスパンが取れる光ファイバーセンサにより、通常の鉄筋コンクリート梁底面引張変位の計測実験を行った。

最近、早期に強度を発現、凍結融解作用に対して劣化せずに耐久性が増進し、さらに厚付けが容易なモルタル吹き付け材が開発された。供試体は、下部コンクリートの剥落を想定して、それにより断面を修復した鉄筋コンクリート梁である。修復部に光ファイバーセンサを装着

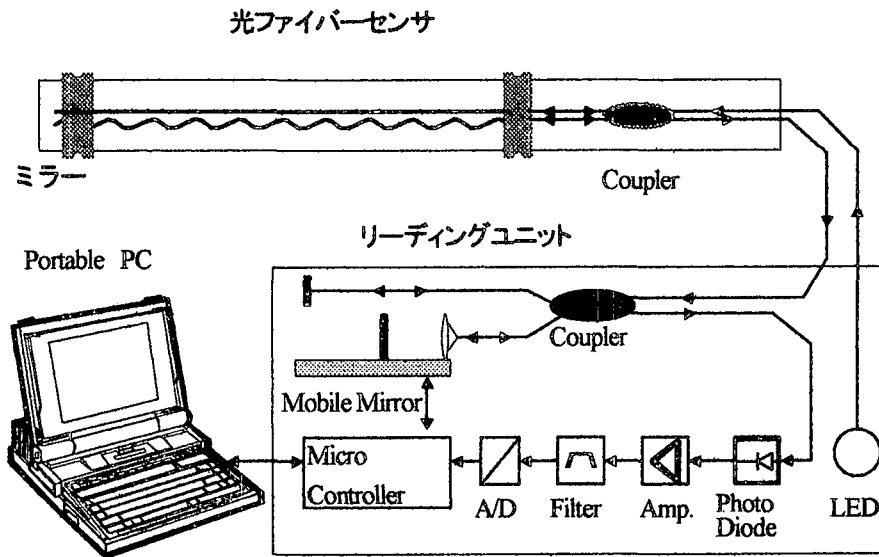


図-1 光ファイバーを用いた計測システム

して梁の変形計測を実施した。最初に、温度変化に対する光ファイバーセンサの特性を調べるために、鋼板について温度変化に対する光ファイバーの作動実験を行った。鋼板の線膨張率を精度よく捉えることができた。鉄筋コンクリート梁の載荷試験により、光ファイバーセンサによる梁底面の変位計測および修復した鉄筋コンクリート梁の力学的挙動について考察した。

ひびわれ性状に大きな違いが現れた通常の鉄筋コンクリート梁および断面修復済み鉄筋コンクリート梁のひびわれ特性に応じた梁底面の変位を計測することができた。

2. 光ファイバーセンサを用いた計測システム

計測システムは、図-1に示すように、光ファイバーセンサ、リーディングユニット、パーソナルコンピュータにより構成される。分解能は $2\mu\text{m}$ であり、測定精度は0.2%である。コンクリートの場合、光ファイバーセンサをコンクリート表面あるいはコンクリート内部に設置す

ることができる。

光ファイバーセンサにはブレンションをかけて配置した計測用光ファイバーとたるませて配置した参照用光ファイバーを内蔵する。計測用光ファイバーは計測対象物と一体になって伸縮するが、参照用光ファイバーは、計測対象物の変形と関係なく温度変化により伸縮する。

LEDから発射した光(波長 $1.3\mu\text{m}$)がファイバーの先端に置かれたミラーで反射して戻ってくる光波の位相差を測定する。2本の光ファイバーの位相差を比較することにより、温

度変化による光ファイバー自体の伸縮を補正して、計測対象物の伸縮を直接に計測することができる。

3. 光ファイバーセンサを用いた計測システムの作動実験

3.1 実験方法

目的は、光ファイバーセンサの温度に対する出力特性の確認である。実験は、温湿度範囲 $+5^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}/40\%\sim 95\%\text{R}\cdot\text{H}$ 、温湿度精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/\pm 3\%\text{R}\cdot\text{H}$ で環境設定ができる環境試験装置の室内で行った。供試体はSS400鋼材で、幅150mm、長さ1200mm、厚さ19mmの鋼板である。写真-1に示すように、鋼板をスパン1000mmで単純支持した。上部のパイプが測定スパン1000mmの光ファイバーセンサ(LA1000と呼ぶ)であり、鋼板のスパン中央対称として上縁から25mmの位置で材軸に平行に置き、図-2のように取り付けた。また、測定スパン500mmの光ファイバーセンサ(LA500と呼ぶ)を下縁から25mmの位置に設置

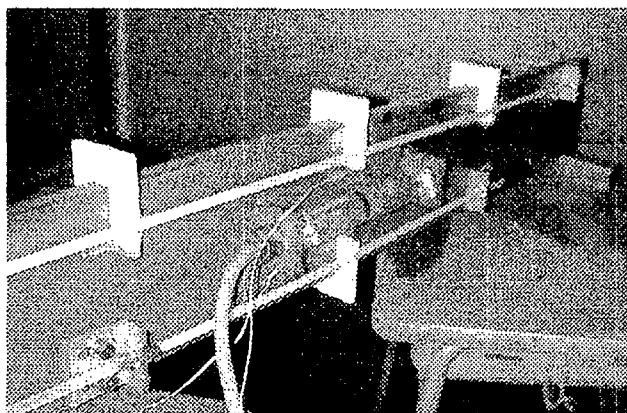


写真-1 供試体および光ファイバーセンサ

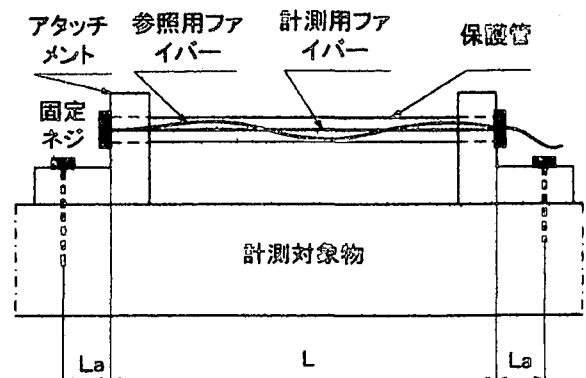


図-2 光ファイバーセンサの取付概略図

した。裏面にも同様に2本の光ファイバーセンサを設置した。両側面の軸線スパン中央位置に温度センサを装着した。固定用ネジによりL型のアルミニウム製アタッチメントを鋼板に固定した。計測用ファイバーにテンションを加えた状態で光ファイバーセンサをアタッチメントに取り付けた。測定スパンは $L=1000\text{mm}$ である。アタッチメントの固定点からセンサ取付け位置までの距離は $L_a=25\text{mm}$ である。参照用ファイバーは保護管の中で供試体の変形による影響を受けないように余裕を持たせている。湿度80~90%の室内において、 $10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で温度変化を与えた。温度ステップは $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ として、各ステップごとに供試体の伸縮を計測した。供試体の温度が一樣になるように1ステップに30分の時間をかけた。

3. 2 実験結果

環境試験装置がおかれた実験室の温度を基準にして、温度に対する光ファイバーセンサ区間の鋼板の伸縮計測値を図-3に表した。実験結果は、鋼板の伸びと温度との関係で整理し帰帰曲線で表すと、いずれも相関係数が0.995以上の直線式がえられた。この結果により鋼板の線膨張率について解析する。

光ファイバーセンサの計測値 δ_m は、計測用光ファイ

バーと参照用光ファイバーの位相差から捉えた、光ファイバーの温度変化を補正した測定対象物（鋼板）の伸縮である。温度変化 ΔT と機械的外力作用とにより生じる測定対象物（鋼板）の伸縮を δ とすれば、計測用センサが一体となってそれと同じ伸縮をする場合に、 δ_m は次のように表される。

$$\delta_m = \delta - \alpha_f \cdot (L + r) \cdot \Delta T \tag{1}$$

ここに、

α_f センサファイバーの線膨張率

L 計測用センサの長さ

r 参照用センサと計測用センサの長さの差

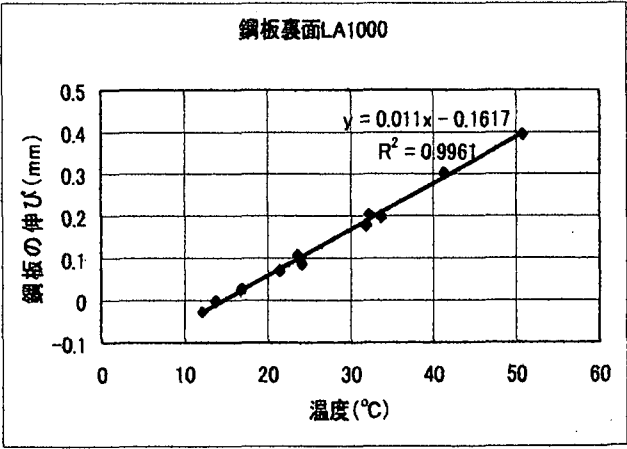
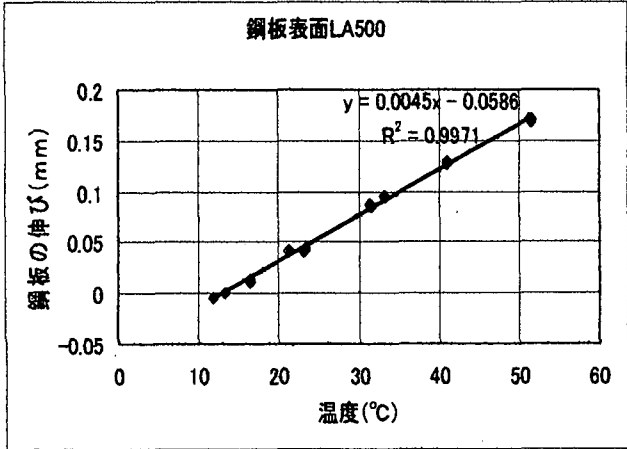
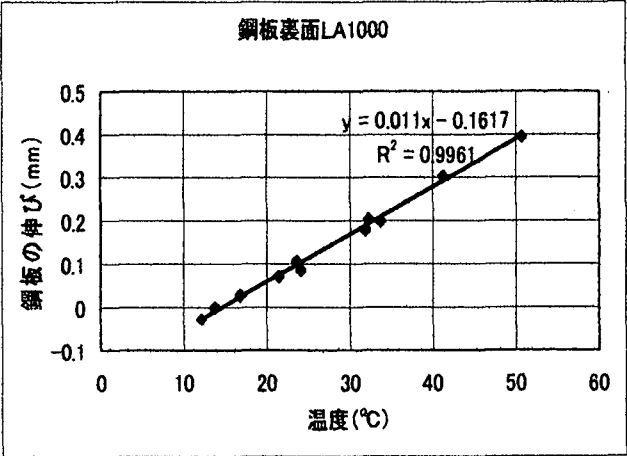
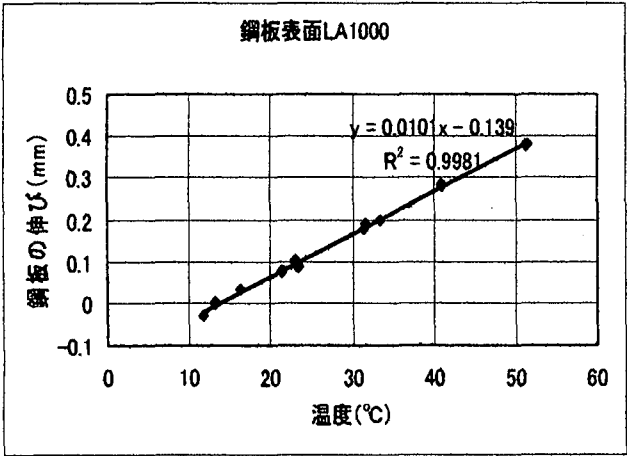
温度変化により図-2に示す測定対象物（鋼板）が $\Delta T^{\circ}\text{C}$ の温度を受けて一様に伸縮し、機械的外力により計測位置にひずみ ε が生じた場合、軸方向の測定対象物（鋼板）の温度変化による伸縮を δ_T 、機械的外力による伸縮を δ_ε とすれば

$$\delta_T = \{\alpha_s(L + 2L_a) - \alpha_a \cdot 2L_a\} \Delta T \tag{2}$$

$$\delta_\varepsilon = \varepsilon(L + 2L_a) \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_T + \delta_\varepsilon \\ &= \{\alpha_s(L + 2L_a) - \alpha_a \cdot 2L_a\} \Delta T + \varepsilon(L + 2L_a) \end{aligned} \tag{4}$$

ここに、



図—3 鋼板の伸びと温度との関係

表-1 鋼板の線膨張率計測結果

センサ No.	表裏	測定長	取付長	参照用光 ファイバ ー長	鋼板の線膨張 率推定値 α_s
		L (mm)	2La (mm)	L+r (mm)	
1	表	1002	50	1020	$11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
2	裏	1004	50	1020	$12.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
3	表	497	50	510	$11.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
4	裏	497	50	510	$11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
平均	—	—	—	—	$11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

L_a アタッチメントの取付長

α_s 測定対象物（鋼板）の線膨張率

α_a アタッチメントの線膨張率

したがって、機械的外力による伸縮として、

$$\delta_{\varepsilon} = \delta_m - \{\alpha_s(L + 2L_a) - \alpha_a \cdot 2L_a\} \Delta T + \alpha_f(L + r) \cdot \Delta T \quad (5)$$

機械的外力が作用しない場合に、 $\delta_{\varepsilon} = 0$ において、測定対象物（鋼板）の線膨張率は次式により計算することができる。

$$\alpha_s = \frac{1}{(L + 2L_a)} \left\{ \alpha_f(L + r) + 2\alpha_a L_a + \frac{\delta_m}{\Delta T} \right\} \quad (6)$$

式(5)は温度変化の影響を除去した場合の鋼板の伸縮である。すなわち、機械的外力作用のみによる鋼板の伸縮はこの式により算定することができる。式(6)は鋼板の線膨張率の算定式である。式(5)および(6)による算定結果を式(2)および(4)に代入すれば、鋼板の温度変化による伸縮 δ_T 、温度変化と機械的外力作用とにより生じる測定対象物〔鋼板〕の伸縮 δ を算定することができる。

短スパンの変形を計測する場合には、温度変化に対するアタッチメントの伸縮の影響を無視することができなくなる。温度変化が大きい環境において精密な計測をするためには、上式のように、参照用光ファイバーの余裕長および光ファイバーの線膨張率の影響を考慮して計測することが必要である。

測定対象物（鋼板）の線膨張率を解析するにあたり、アタッチメントの線膨張率は $23.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、光ファイバーの線膨張率は $1.00 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。なお、参照用ファイバーの余裕長は、LA1000の場合に20mm、LA500の場合に10mmである。計測結果を表-1に示した。LA1000による計測値の平均は $11.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、LA500の場合には $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。総平均は $11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。実験した温度範囲における鋼板の線膨張率のミルシート記載値は $11.9 \sim 12.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。ミルシート記載値と比較して、LA1000を使用した場合にはほぼ同等の結果が得られ、LA500の場合には幾分小さい計測結果となった。

この光ファイバーセンサによる計測は、取付け条件な

表-2 修復材料の物性

試験項目		測定値	備考
練り水量 (%)		19	水/(修復材料)重量比
フロー値 (mm)		179	JIS R 5201 に準拠
硬化体密度 (g/cm^3)		2.1	
硬化時間 (時:分)	始発	1:32	JIS R 5201 に準拠
	終結	3:53	
圧縮強度 (N/mm^2) (養生温度 20°C)	材齢1日	24.5	JIS R 5201 に準拠
	材齢7日	46	
	材齢28日	59.5	
曲げ強度 (N/mm^2) (養生温度 20°C)	材齢1日	5.9	JIS R 5201 に準拠
	材齢7日	6.7	
	材齢28日	8.8	
付着強度 (N/mm^2) (養生温度 20°C)	材齢1日	1.0	連研式簡易引張試験装置使用(下地:コンクリート歩道板)
	材齢7日	—	
	材齢28日	2.3	
凍結融解への抵抗性		300cycle 異常なし	JIS A 8204 に準拠

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^3)				
					水	セメ ント	細骨 材	粗骨 材	混和 剤
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)					
20	8	60.1	4.5	42.8	155	258	798	1110	0.65
※呼び強度: 24 N/mm^2 、早強ポルトランドセメント使用									

どを考慮して計測すれば、温度変化にたいして、精度の高い計測が可能である。長スパンの光ファイバーセンサにより鉄筋コンクリート梁の変状を検出することができると考えられる。

4. 断面修復済み鉄筋コンクリート梁底面の引張変位計測

4. 1 修復材料

修復材としてモルタル吹き付け材を使用した。表-2に示すように、早期に強度を発現し、凍結融作用に対して、劣化せずに耐久性が増進する。さらに容易に厚付けすることができる。モルタルポンプなどで吹き付け、こてで押さえることにより平滑に仕上げることができる。

4. 2 供試体および実験方法

供試体は終局時に曲げ引張破壊が生じるように設計した3種類3本の鉄筋コンクリート梁である。各供試体の特徴を表-4に示した。コンクリートの示方配合は表-3に示すとおりである。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。供試体の設計図および光ファイバーセンサの設置位置を図-5に示した。A梁は、通常の健全な鉄筋コンクリート(RC)梁である。B梁は、コンクリート打設時にRC梁の下底部に幅150mm、深さ60mm、長さ1400mmの空間を作った。すなわち、修復深さはかぶりの2倍である。材齢4日でワイヤブラシを用いて表面処理を行い、修復材を押し詰めた。C梁は、コンクリート打設時に100mm間隔のスターラップの中間に長さ120mmのD10鉄筋をコンクリートに80mm挿し込んだ。材齢4日でB梁と同様に断面修復をおこなった。使用した鉄筋はすべてSD295Aの異形鉄筋で、主鉄筋はD19、スターラップはD6である。

計測スパンが1000mmの光ファイバーセンサLA1000をRC梁の下底に梁のスパン中央で対称になるように設置した。計測スパンが500mmの光ファイバーセンサLA500を梁端から300mmの位置を起点として旧コンクリートと修復材の打継目を跨がせて設置した。なお、光ファイバーの中心高さは底面から下方10mmである。

載荷実験においては図-5のように対称2点振り分け荷重を載荷した。荷重は、ひびわれが発生するまで1kN刻みで増加させて除荷し、再度載荷し、ひびわれが修復部の境界(下縁から60mm)に成長するまでは1kN刻みで、その後、10kNを載荷し、以後は5kN刻みでRC梁が破壊するまで載荷した。各荷重段階において、光ファイバーセンサにより梁底面の引張変位、ストレインゲージによるひずみ、変位計によるたわみを測定した。倍率100倍のクラック計により、荷重が10kNまでの各荷重段階、その後、20kN、30kN、50kN、70kN、90kNの荷重段階においてひびわれをトレースし、梁全域の下縁のひびわれ幅を測定した。

4. 3 RC梁の力学的挙動

主な載荷実験結果をまとめて表-5に示す。いずれの供試体とも曲げ引張破壊が生じた。3種類の供試体の破壊荷重はほぼ等しい。A梁と比較して、B梁およびC梁にひびわれ発生数が多く、ひびわれ発生荷重はC梁、B梁の順に小さい。修復したRC梁のひびわれ発生荷重が小さい原因として旧コンクリートの拘束による応力の発生が考えられ、修復材の収縮特性を明らかにしなければならない。なお、RC梁が破壊するまで修復材の剥離現象は生じなかった。

各種鉄筋コンクリート梁のひびわれ状況を図-6に示す。通常のRC梁であるA梁の場合、まず曲げひびわれが発

表-4 供試体の記号と特徴

記号	供試体の特徴
A 梁	通常の健全な鉄筋コンクリート梁 (コンクリートの材齢28日引張強度2.5N/mm ²)
B 梁	引張部で主鉄筋を包みこんで修復した鉄筋コンクリート梁 (修復材の材齢28日引張強度3.99N/mm ²)
C 梁	引張部で旧コンクリートに鉄筋を挿入して、主鉄筋および挿し筋を包みこんで修復した鉄筋コンクリート梁 (修復材の材齢28日引張強度3.99N/mm ²)

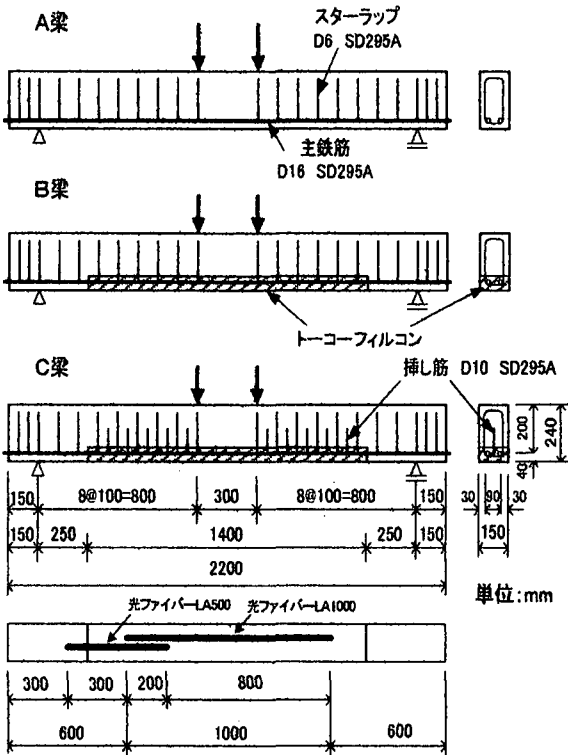
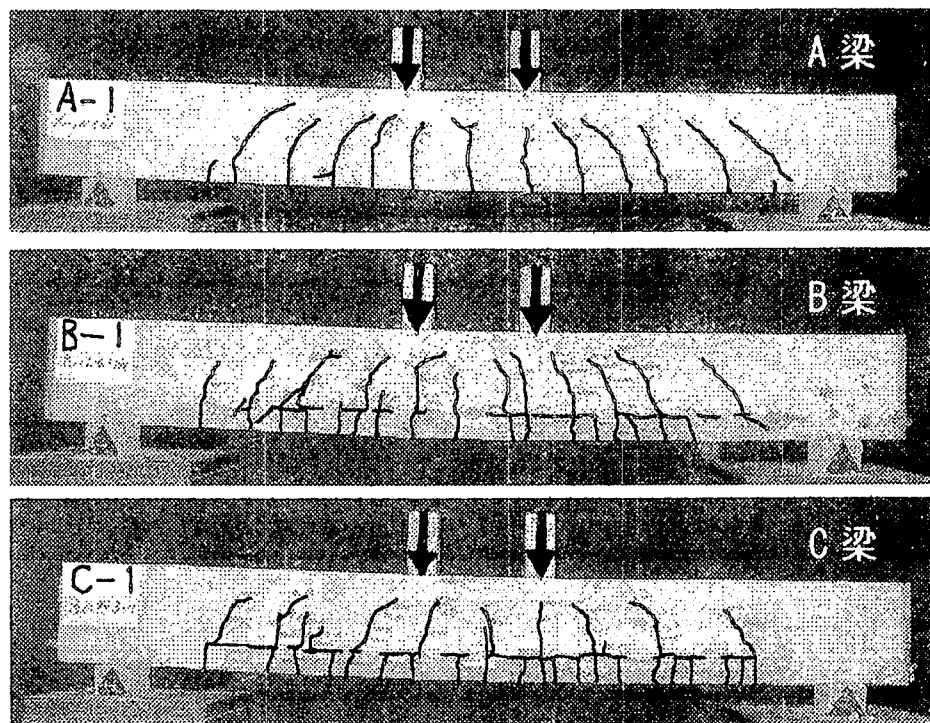


図-5 供試体および光ファイバセンサ設置位置

表-5 載荷実験による主な結果

供試体	修復材	挿し筋	ひびわれ荷重(kN)	破壊荷重(kN)	ひびわれ		破壊形式
					北側面(本)	南側面(本)	
A 梁	無	無	8.0	100.0	14	11	曲げ引張
B 梁	有	無	5.0	100.3	18	19	曲げ引張
C 梁	有	有	6.0	99.1	20	18	曲げ引張



図—6 各種鉄筋コンクリート梁のひびわれ状況

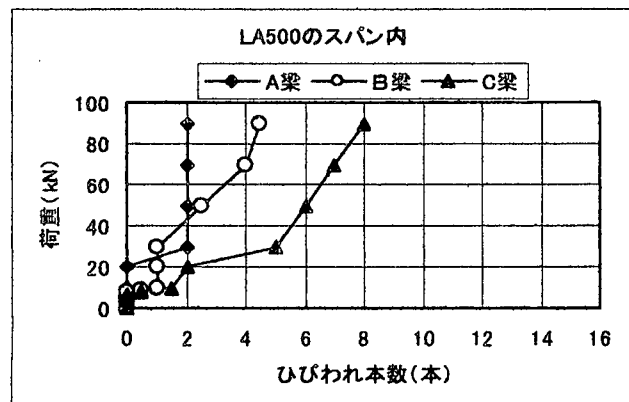
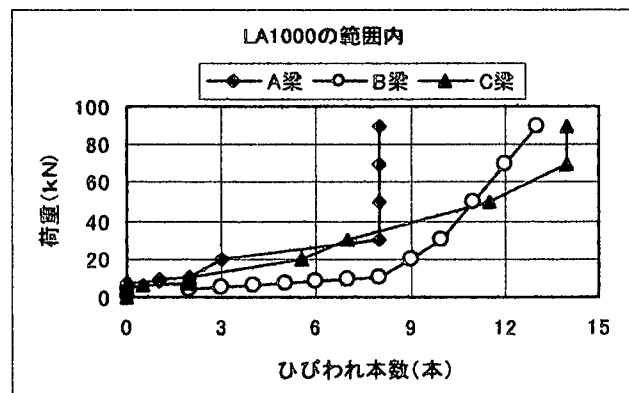
生し、曲げ区間においては上方に成長し、せん断区間においてせん断力の作用により傾きながら成長する。修復したRC梁であるB梁およびC梁においては、修復部に上向きに多くのひびわれが発生し、旧コンクリートとの

境界線を越えて成長するひびわれの数がかなり少なくなる。修復したB梁においては旧コンクリートと修復部との境界にひびわれ（層間せん断ひびわれと呼ぶ）が発生した。B梁の境界面を層間せん断補強をするために挿し筋を入れたC梁においても旧コンクリートと修復部との境界に層間せん断ひびわれが発生した。

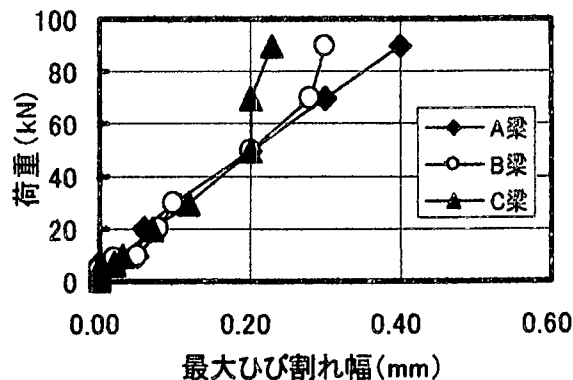
荷重に伴い光ファイバーセンサの測定スパン内に発生したひびわれ本数を図-7に示す。LA1000の範囲は純曲げ区間を含んでいる。LA500の範囲は旧コンクリートと修復部との垂直境界面を跨いでいる。いずれの範囲においてもA梁では低荷重レベルでひびわれの発生が

止まるが、B梁およびC梁では終局時近くまで荷重の増加に伴ってひびわれが発生する。

図-8は、荷重と最大ひびわれ幅との関係である。荷重に対する最大ひびわれ幅は、A梁で直線的に拡大するが、B梁およびC梁では破壊荷重の50%までは直線的に拡大し、その後拡大が緩和され破壊荷重の90%において、B梁で0.30mm、C梁で0.23mmである。挿し筋は、高荷重においてひびわれを分散させ最大ひびわれ幅の拡幅を抑制した。通常のRC梁と比較して、修復したRC梁の最大ひびわれ幅が破壊荷重の50%まではほぼ同じで、それより大きい荷重において小さくなる原因として、修復部がタイロッド化し、図-7に見られるように顕著なひびわれ分散が考察される。耐久性への影響から懸念された修復部の最大ひびわれ幅は、通常のRC梁よりも低レベルで



図—7 荷重とひびわれ発生数との関係



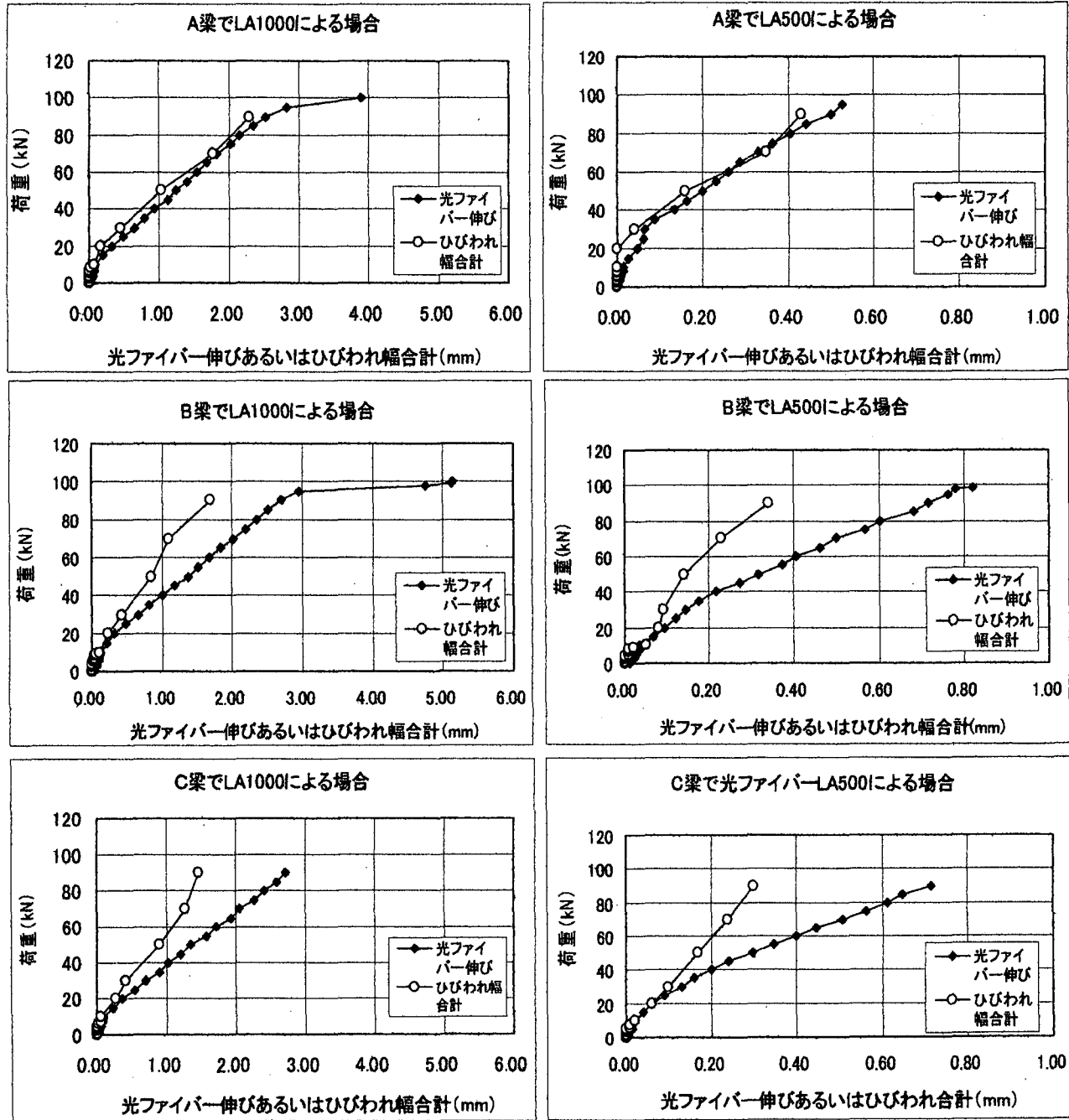
図—8 荷重と最大ひびわれ幅との関係

あるといえる。

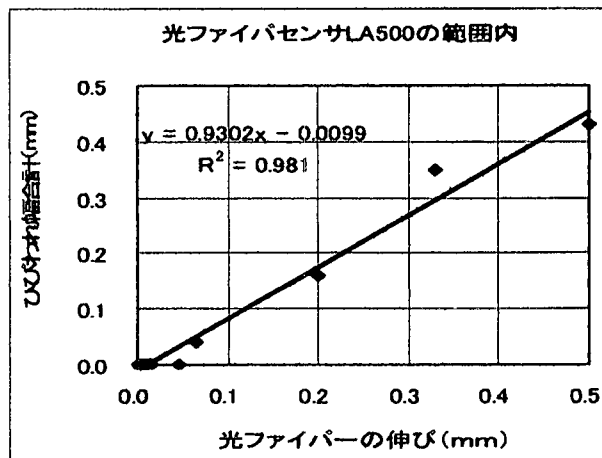
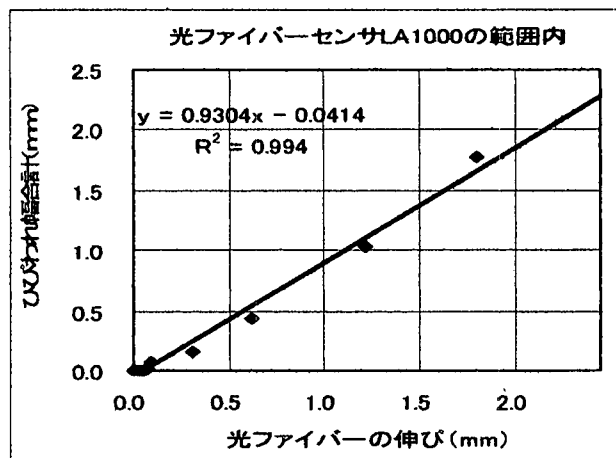
4. 4 光ファイバーセンサによるRC梁底部の引張変位計測

RC梁の底面に設置した光ファイバーの伸縮への影響因子は、ひびわれが発生するまではコンクリートのひずみ、ひびわれ発生後はひびわれ幅合計とひびわれの間のコンクリートの変形である。光ファイバーセンサによるコンクリートのひびわれモニタリングにおいて、最大ひびわれ幅を直接に捉えることが望まれるが、光ファイバーセンサによる伸び計測とコンクリートのひびわれ幅合計との相関を表すことができれば、計測区間のひびわれ変状

を察知することができる。そこで、RC梁の荷重実験において計測した光ファイバーセンサの伸びとひびわれ幅合計との関係について考察する。図-9は実験結果による荷重と光ファイバーの伸びあるいはひびわれ幅合計との関係である。通常のRC梁であるA梁においてはLA1000による光ファイバー伸び計測値とひびわれ幅には密接な関係がある。ひびわれ幅合計と光ファイバーの伸びとの関係は図-10のように相関係数0.994の直線式で近似される。LA500による場合には、図-10に示すように相関係数0.981の直線式で近似される。光ファイバーの伸びには、ひびわれ間のコンクリートひずみの影響が含まれるが、直線の傾きが1に近いことから、光ファイバーセ



図—9 荷重と光ファイバーの伸びあるいはひびわれ幅合計との関係



図—10 ひびわれ幅合計と光ファイバー伸びの関係（A梁の場合）

ンサを通常のRC梁のひびわれモニタリングに利用することができる。

修復したRC梁であるB梁およびC梁におけるいずれの光ファイバーセンサの場合も、コンクリートひびわれは、光ファイバーの伸びと比較して、破壊荷重の約20%までの荷重においてはほぼ同じであり、さらに荷重が増えるとなんわり小さくなる。これは修復部の変形特性によるものである。すなわち、光ファイバーセンサの伸びは、修復部境界に層間せん断ひびわれが発生するまでは通常のRC梁の場合と同じようにひびわれ幅合計とほぼ等しくなる。荷重が増大すると、層間せん断ひびわれの成長につれて旧コンクリートから部分的に分離してタイロッドを形成する。ここで用いた修復材のように付着強度および引張強度が大きい材料による修復部はロッド化によりひびわれ間で大きな変形をする。光ファイバーの伸びは、この変形をも含むことから、図-9に示したように、破壊荷重の約20%以上の荷重作用に対してひびわれ幅合計の大略2倍になっている。

5. まとめ

鋼板を供試体としたSOF0センサの作動検証実験、新開発された修復材で断面を修復したRC梁の載荷実験および通常のRC梁について実施した実験結果をまとめると

- (1) 光ファイバーセンサによる精密計測のために取付け状況に応じる解析方法を案出した。
- (2) 光ファイバーセンサによる変位計測は、取付け条件などを考慮して計測すれば、温度変化にたいして、精度の高い計測が可能であることが実証された。
- (3) 新開発された修復材により断面修復したRC梁は、通常のRC梁と比べて耐力がほぼ等しく、ひびわれ発生荷重が小さい。修復材の収縮特性についての研究が必要である。なお、梁が破壊するまでに修復材の剥離は生じなかった。
- (4) 修復したRC梁には旧コンクリートとの境界に層間せん断ひびわれが発生し荷重増大に伴い成長した。

- (5) 耐久性への影響から懸念された修復部の最大ひびわれ幅は、ひびわれがよく分散されて通常のRC梁よりも低レベルである。
- (6) 光ファイバーセンサにより、通常のRC梁底面におけるひびわれ幅の合計をかなりの精度で計測することができる。
- (7) 修復部に設置した光ファイバーセンサによる梁底面の伸び計測は、修復部と旧コンクリートとの境界に発生する層間せん断ひびわれの影響を大きく受ける。

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) 松本高志、石田哲也、阿部雅人：メンテナンスの力学問題、土木学会応用力学論文集、Vol. 5, pp. 755～766, 2002, 8
- 3) 黒川章二、羅黄順、Ming L. Wang、嶋野慶次：磁歪センサによる各種鋼材の応力計測、プレスとレストコンクリート技術協会、第11回シンポジウム論文集、PP. 101～106, 2001, 11
- 4) 黒川章二、羅黄順、Ming L. Wang、嶋野慶次：EMセンサを用いたPC鋼材の引張力モニタリング実験、土木学会応用力学論文集、Vol. 5, pp. 817～826, 2002, 8
- 5) Shoji Kurokawa, Sunario Sumitro, Keiji Shimano, Ming Wang : LONG TERM STRESS MONITARING USING ERASTO-MAGNETIC SENSOR, fib 2002 Congress W-97, 2002, 10
- 6) 倉嶋利雄、佐藤昌志：光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測、土木学会誌、VOL. 82, PP. 18～20, 1997, 12
- 7) 呉智深、高橋貴蔵、須藤桂一：光ファイバセンサによるひずみ・ひび割れのモニタリングに関する実験的研究、コンクリート工学論文集、第13巻第2号、pp. 139～148, 2002, 5

(2003年4月18日受付)