

論文 アラミド繊維シート補強による RC 桁の曲げ剛性回復

松元香保里^{*1}・藤田学^{*2}・中井裕司^{*3}・藤原保久^{*4}

要旨：本稿では、RC 桁の曲げ剛性に関して、桁の固有振動数に着目し、固有振動数と劣化・損傷程度との関係、およびアラミド繊維シート補強による曲げ剛性の回復について検討を行った。その結果、劣化・損傷した RC 桁をアラミド繊維シートで補強すると、曲げ剛性は有効曲げ剛性に換算して30%程度増加すること、増加した曲げ剛性は、初期の曲げひび割れ荷重時に初期降伏剛性まで低下することが分かった。また、RC 桁の固有振動数と有効曲げ剛性は高い相関が見られた。

キーワード：アラミド繊維シート、曲げ剛性、衝撃加振試験、固有振動数

1. はじめに

アラミド繊維シートは、既設 RC 橋脚の耐震補強としてじん性・せん断補強のみならず、曲げ補強としても利用されている。材料レベルの観点にたてば、アラミド繊維シート自体の剛性は小さいため、シート接着による剛性付与は微小と考えられる。しかしながら、劣化・損傷により曲げ剛性の低下した既設橋脚を、アラミド繊維シートで軸方向に補強した場合、ひび割れ間のテンションスティフィネスは向上するため、曲げ剛性の回復が期待できる。

本稿では、この補強効果を確認することを目的として、人工的な損傷を与えた RC 桁をアラミド繊維シートにより補強し、この時の曲げ剛性の回復について検討した。評価方法は、衝撃加振試験により固有振動数と固有振動モードを同定し、桁の曲げ剛性を推定する方法である。この評価方法は、構造物が劣化・損傷した場合、健全

時に比べ固有振動数が低下する特性を利用したもので、構造物の健全度調査における非破壊試験で用いられている。

2. 試験方法

2.1 試験の流れ

試験の流れを図-1に示す。静的載荷試験（処女載荷）により試験体を人工的に劣化させ、衝撃加振試験（ハンマリング試験）を行い、劣化に伴う固有振動数の変化を調べた。処女載荷では引張鉄筋の降伏まで載荷し、その後、60tf級のテクノラ製アラミド繊維シートにより桁の補強を行った。補強量は桁の軸方向および軸直角方向共に各1枚とし、スパン内全面にわたり巻立てた。補強後の桁を試験体とし、処女載荷試験時と同様の静的載荷試験（補強後載荷）および衝撃加振試験を行い、アラミド繊維シートによる曲げ剛性の回復について確認した。

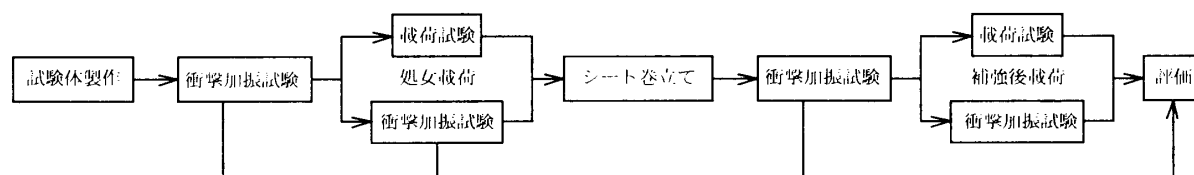


図-1 試験の流れ

*1 住友建設（株） 技術研究所 （正会員）

*2 住友建設（株） 技術研究所主任研究員 工修 （正会員）

*3 住友建設（株） 技術部 （正会員）

*4 住友建設（株） 技術部

表-1 試験体の諸元

桁高 h (mm)	桁幅 b (mm)	長さ L (mm)	コンクリート設計基準 強度 f_{ck} (N/mm ²)	引張主鉄筋		腹鉄筋	せん断 スパン a (mm)	曲げ スパン (mm)	a/d
				鉄筋量	鉄筋比 (%)	鉄筋量			
400	400	5000	21	6@D22	1.829	D13@80	1750	500	5.5

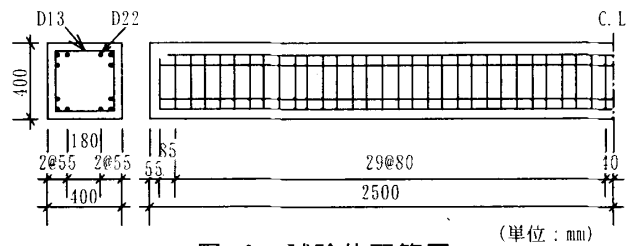


図-2 試験体配筋図

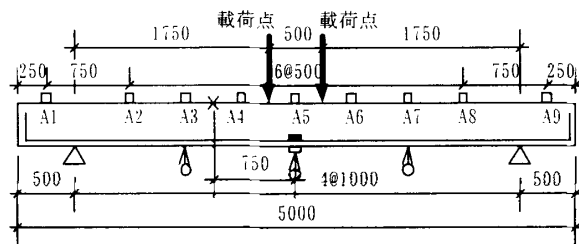


図-4 計測位置

表-2 計算固有振動数

支 境 界 条 件	計算固有振動数 (Hz)	
	1 次	2 次
単純支持 (スパン 4m)	34.6	138.4
自 由 (スパン 5m)	50.2	138.4

2.2 試験体

試験体は、寸法 400mm × 400mm × 5000mm の RC 桁とし、せん断スパン $a=1750$ mm、曲げスパン 500mm で荷重した。コンクリートの設計基準強度は 21N/mm^2 とした。試験体の諸元を表-1に、配筋図を図-2に示す。

2.3 試験方法

(1) 処女載荷

静的荷重試験では、試験体の支持条件は単純支持とした。荷重はアムスラーにより行い、せん断スパン $a=1750$ mm ($a/d=5.5$) の 2 点荷重とした (図-4)。図-3 に示す荷重サイクルに従い、曲げ剛性が初期剛性の約 60% に低下した $P_{0.6}$ (275kN) まで荷重-除荷を 7 回繰り返す、最後にもう一度 200kN まで荷重後除荷した。ハンマリング試験は、荷重サイクルの計 27 段階 (D*) において行い、各段階ごとの試験回数は 3 回とした。ハンマリングは鋼製ハンマー (1.2kg) を使

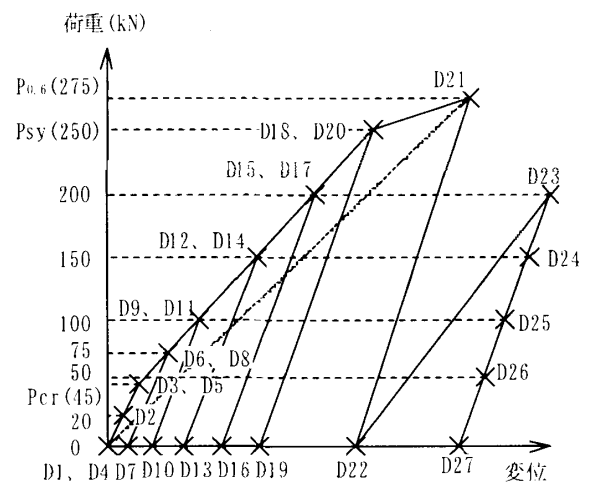


図-3 処女載荷パターン

表-3 鉄筋の材料物性

(単位: N/mm ²)	降伏強度	弾性係数
軸方向鉄筋 (D22)	415	1.76×10^5
帯鉄筋 (D13)	375	1.78×10^5

表-4 コンクリートの材料物性

(単位: N/mm ²)	圧縮強度	割裂強度	弾性係数
コンクリート	22.15	2.19	2.23×10^4

用し、スパン中央から 750mm 離れた部材幅中央の位置を打撃した。この時の振動加速度を試験体上面部材幅中央に取り付けたひずみ型加速度計 (5G) により計測した。劣化前における全断面有効とした場合の試験体の計算固有振動数を表-2に示す。計測項目は、荷重荷重、加速度、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ、変位とし、加速度データの取り込みはサンプリング周波数 400Hz で行った。計測位置を図-4に示す。

(2) 補強後

静的荷重試験およびハンマリング試験方法は、(1) 処女載荷と同じとした。荷重サイクルおよびハンマリング時期を図-5に示す。荷重は、圧壊により破壊するまで荷重-除荷を 10 回繰り返す、ハンマリング試験は、荷重サイクルの計 21 段階 (R*) で行った。計測項目は、荷重荷重、加速度、鉄筋ひずみ、変位とした。

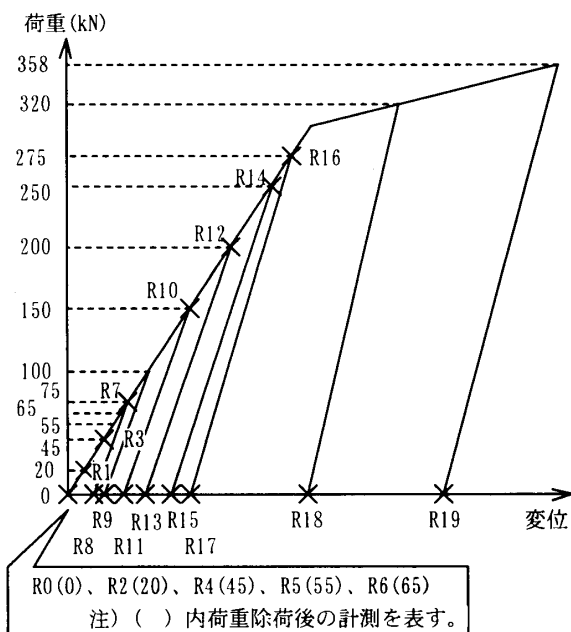


図-5 補強後载荷パターン

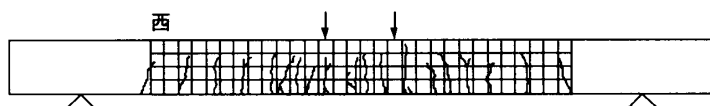


図-7 ひび割れ図

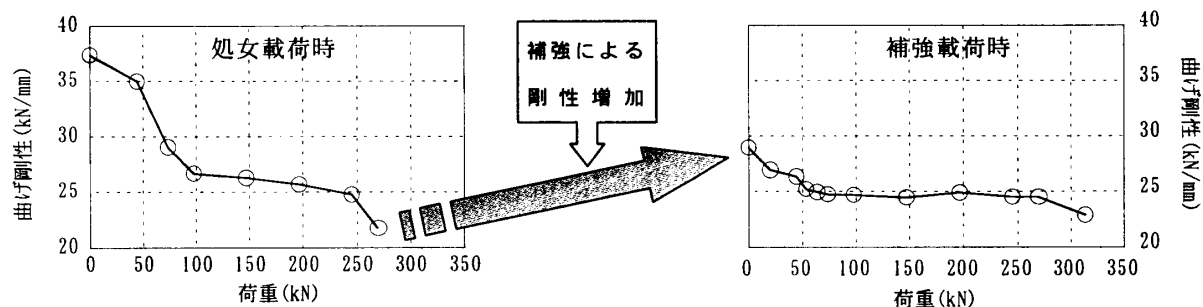


図-8 接線剛性の変化

3. 材料試験結果

使用した鉄筋および試験時におけるコンクリートの材料物性の平均値を表-3～4に示す。

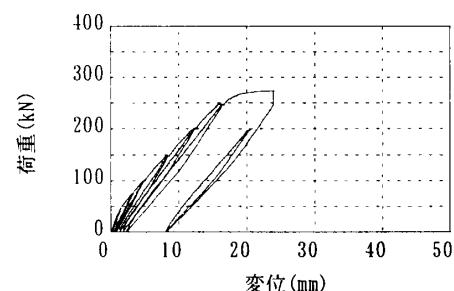
4. 試験結果

4.1 静的载荷による剛性の算定

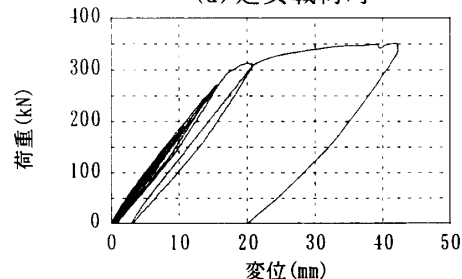
静的载荷試験で得られた荷重－変位の関係を図-6に、諸荷重を表-5に示す。処女载荷時のひび割れ荷重は45kNで、降伏荷重は275kNであった。処女载荷終了時のひび割れ図を図-7に示す。残留ひび割れ幅は曲げスパンで最大1.2mm、せん断スパンで0.04mm～0.20mmであった。ひび割れ間隔は100～300mmであった。

表-5 諸荷重

(単位：kN)	試験値	計算値
ひび割れ荷重	45	41
降伏荷重	275	287
補強後の破壊荷重	359	355



(a) 処女载荷時



(b) 補強後载荷時

図-6 荷重－変位関係

本試験では、試験体の有効曲げ剛性を部材全長にわたり一定として評価した。有効曲げ剛性は、図-6に示される荷重－変位の関係のうち、目的荷重を载荷、除荷後再载荷の初期接線剛性として評価し、その評価区間は、荷重5kN～20kNの間とした。これは、衝撃加振試験の剛性評価において、除荷後の自由振動時を対象として評価していることから決定した。評価結果を図-8に示す。

载荷の進行に従うアラミド繊維シートとコンクリートとの付着劣化は、打音検査および目視では確認できなかった。また、終局は圧縮側コンクリートの圧縮破壊であった。

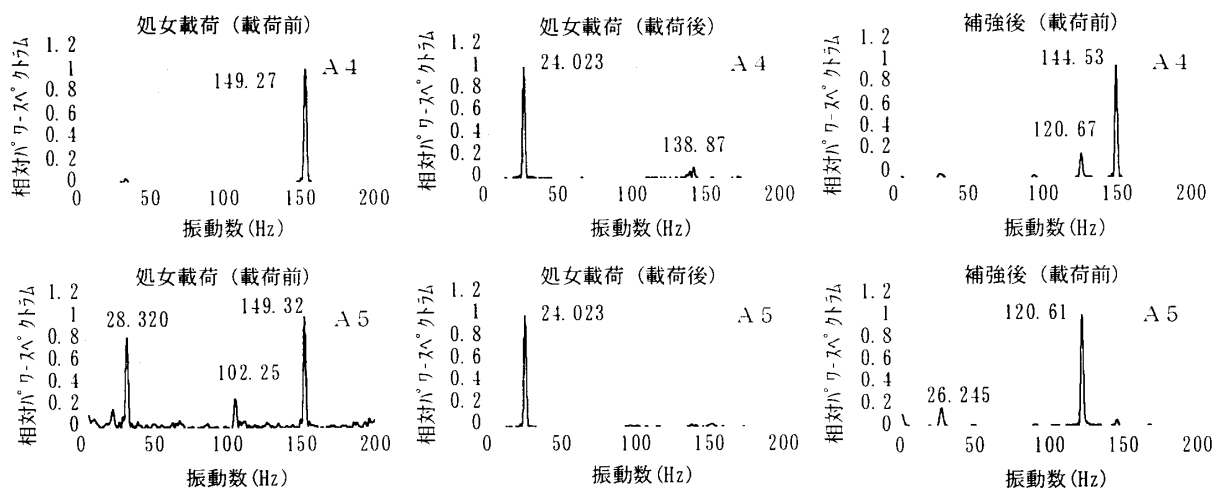


図-9 周波数特性

表-6 固有振動数一覧

荷重 (kN)	固有振動数 (Hz)			
	1 次モード		2 次モード	
	補強前	補強後	補強前	補強後
0	28.320	26.245	149.27	144.53
20	—	26.123	—	143.98
45	28.223	25.513	144.53	143.37
55	—	25.513	—	143.13
65	—	25.269	—	142.88
75	28.223	25.330	143.80	142.64
100	27.441	25.269	142.14	142.09
150	27.344	25.330	139.89	141.78
200	26.758	25.208	142.04	141.24
250	—	25.146	—	140.87
275	24.023	25.024	138.87	140.26
315	—	24.597	—	138.98
358	—	23.010	—	132.14
計算①	34.603		138.41	
計算②	50.201		138.38	
対数減衰率	0.010		0.005	

注) 計算①の境界条件: 両端ヒンジ、スパン 4m

計算②の境界条件: 両端自由、スパン 5m

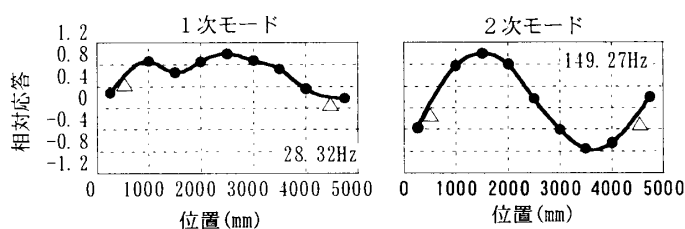


図-10 振動モード

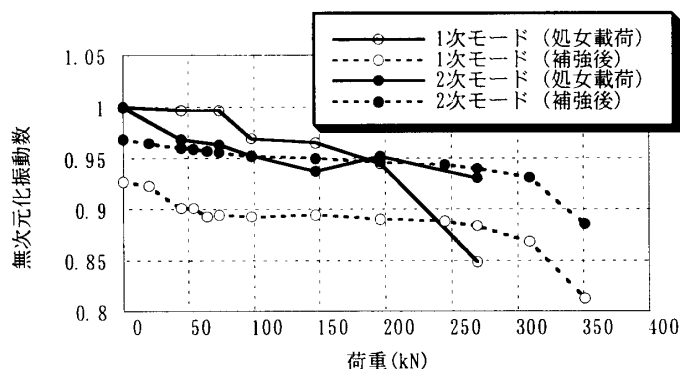


図-11 固有振動数の変化

4.2 衝撃加振試験による振動特性の同定

計測点 A4 および A5 (図-4 参照) における無次元化したパワースペクトルを図-9に示す。何れの場合も、30Hz 程度あるいは150Hz 程度に卓越した振動数が観測された。これら卓越振動数における振動モードを図-10に示す。これより30Hz 程度の卓越振動数は1次モード、150Hz 程度の卓越振動数は2次モードであることが分かる。モード形状は荷重前後および補強前後で変わらなかった。なお、1次モードおよび2次モードの計算固有振動数²⁾は、境界条件を両端ヒンジ、スパン 4m とした場合で 34.6 Hz および 138.4 Hz、両端自由、スパン 5m とした場合で

50.2 Hz および 138.4 Hz である。固有振動数の変化を表-6 および図-11に示す。図-11の縦軸は、各段階で得られた1次および2次の固有振動数を、初期状態における各々の固有振動数で除して無次元化している。また、モード減衰は荷重による損傷や補強状態により変化しなかった。

5. 考察

静的荷重試験と衝撃加振試験により、試験体の剛性を推定した。前述のように、ここでは試験体の曲げ剛性を部材全長にわたり一定と仮定している。静的荷重試験では、試験体の荷重を4点曲げ試験で行っているため、損傷の進行は試験

体の純曲げ区間に集中する傾向を有する。従って、この仮定は局部的な損傷を考慮していないため、概算であることは否めない。

試験体の载荷試験の変形モードと衝撃加振試験による1次固有振動モードは概ね一致していることから、ここでは衝撃加振試験結果のうち、1次固有振動数を用いて剛性の評価を行った。評価方法は次式である。

①静的载荷試験による場合

$$k_i = \frac{P_{i,P=20\text{ kN}} - P_{i,P=5\text{ kN}}}{\delta_{i,P=20\text{ kN}} - \delta_{i,P=5\text{ kN}}} \quad (1)$$

$$\frac{K_i}{K_0} = \frac{k_i}{k_0} \quad (2)$$

②固有振動数を用いる場合

$$\omega_d = \alpha \cdot \sqrt{\frac{K_i}{M}} \quad (3)$$

$$K_i = \frac{1}{\alpha} \cdot M \cdot \omega_{di}^2$$

$$= \left(\frac{2\pi}{\alpha} \right)^2 \cdot M \cdot f_i^2 \quad (4)$$

$$\frac{K_i}{K_0} = \left(\frac{f_i}{f_0} \right)^2 \quad (5)$$

ω_d : 固有角振動数

α : モードに依存する定数

M : 質量

f : 固有振動数

K : 剛性

評価結果を図-12に示す。縦軸は初期剛性に対する各载荷荷重の剛性の割合で、横軸は補強前後の履歴最大荷重を示す。

静的载荷による剛性の変化を見ると、処女载荷ではひび割れ荷重後急激に剛性が低下し、安定区間後、鉄筋の降伏により剛性低下が加速され、最終的に初期剛性の58%まで低下した。補強後、剛性は初期剛性の78%まで回復するが、以後、ひび割れの開口に従い剛性は低下する。

衝撃加振試験による剛性の変化を見ると、処女载荷ではひび割れ荷重前後の安定区間後、鉄筋によるテンションスティフネスの低下とともに剛性は低下し、鉄筋降伏後、初期剛性の72%まで低下した。補強後、剛性は初期剛性の95%ま

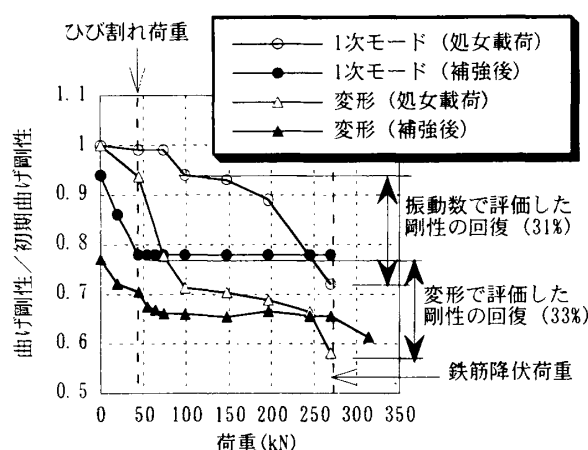


図-12 有効曲げ剛性の評価

で回復するものの、曲げひび割れ荷重到達後、初期剛性の78%に停留する。

2つの測定方法による曲げ剛性の評価は、定性的に同一の傾向であるが、定量的には異なる。この原因は、有効曲げ剛性算定時の仮定と損傷状況の差異、および変形モードの差異などが考えられる。

両評価手法によれば、降伏するほどの損傷を受けた試験体の有効曲げ剛性は、アラミド繊維シートで補強することにより約1.3倍に回復したと考えられる。これは、補強後の载荷による剛性低下状況の観察より、損傷により消失した鉄筋とコンクリートの付着を、アラミド繊維シートが補完したためと考えられる。

6. 実構造物に適用した場合の補強効果

本試験では、断面寸法400mm×400mmの軸力を作用させていないRC桁に関して、静的载荷によって低下した曲げ剛性を、アラミド繊維シートによる補強で回復できる事を確認した。しかしながら、この補強効果は、ひび割れ荷重以降では小さくなっている。

ここでは、本補強工法を実構造物に適用した場合、どの程度の補強効果が得られるかを推定するため、実構造物と試験体の応力度レベルを比較した。実構造物として、断面寸法600mm×600mm、高さ7000mmの標準的な鉄道RCラーメン高架橋脚を想定し、死荷重などの算出は文献4に従った。実構造物モデルの部材断面および諸

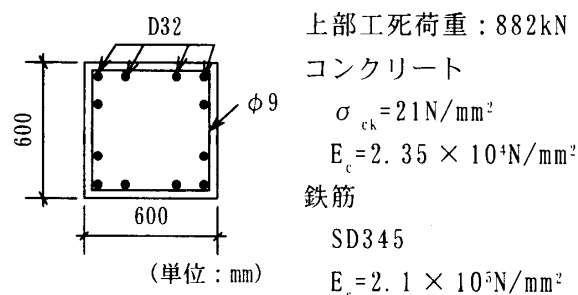


図-13 実構造物モデルの部材断面および諸元

元を図-13に示す。ここでは、使用状態として（死+活荷重）載荷、（死+活+制動荷重）載荷の2ケース、地震時として設計水平震度 $k_h=0.1$ とした計3ケースの荷重状態について検討した。検討方法は、まず実構造物モデルについて、各荷重状態ごとに構造解析を行い、断面力を求め、鉄筋およびコンクリートの応力度を算出した。次に、この応力度と試験結果から計算される試験体の応力度を比較した。結果を表-7にまとめる。これより、実構造物モデルの地震時における鉄筋応力度と、試験体のひび割れ荷重時における鉄筋応力度はほぼ等しいことから、同程度の荷重状態であることが推測できる。両者の比較より推定されることを以下にまとめる。

①試験体では、アラミド繊維シート補強により曲げ剛性は30%程度回復するが、ひび割れ荷重以後、その補強効果は小さくなる。一方、実構造物モデルでは、使用状態（死+活+制動荷重）において全断面圧縮であるため、通常の使用状態における剛性回復効果は十分に期待できる。

②試験体のひび割れ荷重は、実構造物モデルでは水平震度 $K_h=0.1$ 程度の地震時に相当する荷重であり、震度3～4程度の地震ではその補強効果は低下しないと考えられる。

7. まとめ

R C 桁の曲げ剛性に関して、桁の固有振動数と劣化・損傷程度との関係、およびアラミド繊維シート補強による曲げ剛性の回復について検討を行った。その結果以下のような知見が得られ

表-8 実構造物と試験体の比較

荷重状態	実構造物 (600mm×600mm×7000mm)				
	断面力			応力度	
	M (kN・m)	N (kN)	S (kN)	鉄筋 (N/mm²)	コンクリート (N/mm²)
使用状態 (1) (死+活)	28.42	1327.9	13.7	— (圧縮)	3.1
使用状態 (2) (死+活+制動)	151.9	1327.9	49.0	— (圧縮)	5.3
地震時 (死+地震 $k_h=0.1$)	245.0	729.1	72.5	62.4	6.5

状態	試験体 (400mm×400mm×5000mm)			
	断面力		応力度	
	載荷荷重 (kN)	M (kN・m)	鉄筋 (N/mm²)	コンクリート (N/mm²)
全断面有効	10.0	8.8	15.5	0.7
	20.0	17.5	31.2	1.5
ひび割れ荷重	45.0	39.4	70.1	3.0

た。

①劣化・損傷したR C 桁をアラミド繊維シートで補強することにより、初期曲げ剛性を回復させることができる。

②本試験では、R C 桁の曲げ剛性は、有効曲げ剛性に換算して30%程度回復した。

③本試験では、回復した曲げ剛性は、初期の曲げひび割れ荷重時に初期降伏剛性まで低下した。

④R C 桁の固有振動数と有効曲げ剛性には高い相関が見られた。

本試験は、静的載荷試験より補強効果を確認したものである。実構造物では、交通荷重による繰り返し荷重が作用するため、今後は、これらの影響を考慮した疲労の検討を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) 伊藤千浩：振動実験による構造物の劣化診断技術—主に橋梁、建築構造物を対称として—、電力中央研究所報告・調査報告、1988. 9
- 2) (社) 土木学会：構造力学公式集、1986. 6
- 3) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計—限界状態設計法の考え方と適用、pp. 214～219、1995. 6
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物設計標準・同解説—コンクリート構造物、1991. 11