

論文 衝撃的上下動を受ける RC 橋脚の繊維補強に関する 実験的研究

原田 耕司 *1・石川 信隆*2・太田 俊昭 *3・香月 智*4

要旨:本研究は、衝撃的上下動を受ける RC 橋脚の繊維補強の効果について実験的に調べたものである。実験では、段落しを有するモデル供試体に衝撃的上下動を与え、モデル供試体のひび割れおよび鉄筋のひずみ等を観察することにより、補強方法の影響およびアラミド繊維、炭素繊維、ビロン繊維の補強効果等について検討を行った。実験の結果、繊維補強したすべてのモデル供試体において、段落し部の鉄筋の最大ひずみが、無補強モデル供試体に比べ著しく小さく、繊維による補強効果を確認できた。

キーワード: 衝撃的上下動, 水平輪切り状ひび割れ, 繊維, 補強, RC 橋脚

1. はじめに

兵庫県南部地震では、RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れや RC 煙突の破断などの被害事例が多々見られた。これらの破壊メカニズムとしては、水平地震動による交番曲げ破壊であるとの考えもあるが、その一方では、「ドンと突き上げるような揺れを感じた後に激しい横揺れを感じた」という被災者の証言等から衝撃的上下動に注目して、実際に衝撃システムによる突き上げ実験から、水平輪切り状ひび割れの再現を行い、損傷原因の一つとして衝撃的上下動を提案した報告¹⁾もある。

一方、兵庫県南部地震以降盛んに行われている橋脚補強は、せん断、じん性および曲げ性能のアップが目的であり、鋼板については衝撃的上下動についての補強効果に関する報告²⁾は見られるものの、その他の補強材料である炭素繊維あるいはアラミド繊維等については、衝撃的上下動によるひび割れ等に対する補強効果についての検討がなされていないのが現状である。衝撃的上下動によるひび割れは、直接的には構造物を破壊させるものではないが、その後

の水平地震動による橋脚の挙動に影響を及ぼす可能性が高いと考えられる。

そこで、本研究では段落しを有するモデル供試体に衝撃的上下動を与え、モデル供試体のひび割れや鉄筋のひずみ等を観察することにより、補強方法の影響およびアラミド繊維等の補強効果について検討を行った。なお、本報告では、引張耐力を揃えモデル供試体の全周を鉛直方向に繊維で縞状に補強したものを「全周ストライプ補強」、繊維の目付け量を揃え、鉛直方向にシート状の繊維を全周に巻立てたものを「全周巻立て補強」と呼ぶ。

2. 実験概要

2.1 実験方法

実験装置は、高速変形負荷装置と図一に示す突き上げ装置とで構成される。高速変形負荷装置は下方向に最大約 4.0m/s の速度で載荷する能力を有し、突き上げ装置は、高速変形負荷装置からの力を 2 つのアクチュエーターを組み合わせるにより上方向へと変換するも

*1 西松建設(株)技術研究所技術部土木技術課主任 工修(正会員)

*2 防衛大学校教授 土木工学科 工博(正会員)

*3 九州大学教授 工学部建設都市工学科 工博(正会員)

*4 防衛大学校助教授 土木工学科 工博

のである。具体的には、高速変形負荷装置の力を突き上げ装置の入力側アクチュエーターで受け、載荷力伝達ホースを介して油圧で出力側アクチュエーターに伝達し、突き上げ板（以下基盤）に固定したモデル供試体を衝撃的に突き上げ後、アルミ製ストッパーで強制的に停止させるシステムを取っている。この突き上げシステムの性能は、図-2の入力速度～時間関係に示すように、突き上げ開始後約8msで最高速度が約110cm/sに達した後、急停止することにより約2ms後に速度が約0cm/sになるものである。

実験方法は、基盤の上に橋脚をモデル化したモデル供試体を固定し、さらにその上に実橋脚の上部工モデルとして重錘（4.9KN）を固定した。この状態から瞬間的に基盤を突き上げ、ストッパーで急停止させることにより、モデル供試体に当初圧縮応力が、続いて引張応力が生じるものである。

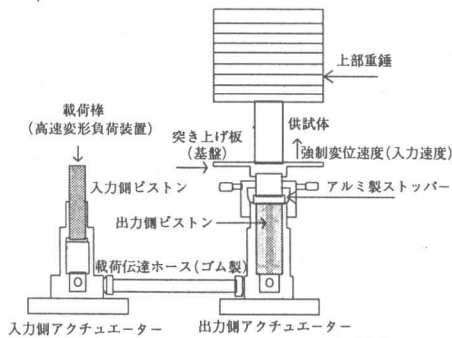


図-1 突き上げ装置

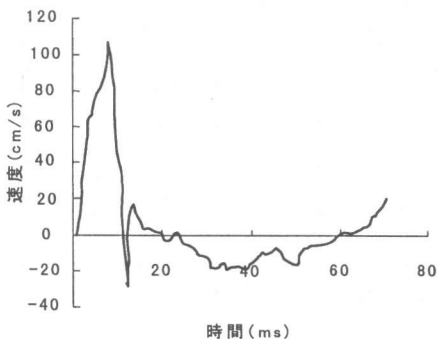


図-2 入力速度～時間関係

なお、重錘によるモデル供試体の初期圧縮応力は $0.6\text{N}/\text{mm}^2$ であり、実橋脚とほぼ同程度の値とした。

2.2 計測項目

図-3に実験装置の計測概要、図-4にモデル供試体の計測概要を示す。基盤と重錘の加速度を加速度計（計測範囲500G、応答周波数10KHz、固有振動数30KHz）で、基盤と重錘の変位量をレーザー式変位計（計測範囲300～100mm、応答周波数915Hz）により測定した。

なお、モデル供試体表面に貼付したモルタルのひずみゲージは、補強材料の接着剤との付着を無くすために、縁切り用のシートをゲージ上面に貼付した。

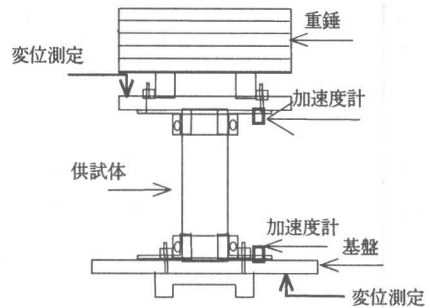


図-3 実験装置の計測概要

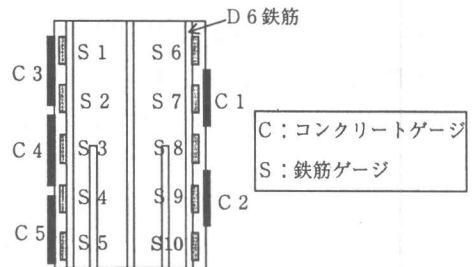


図-4 モデル供試体の計測概要

2.3 モデル供試体

モデル供試体は、段落しを有する高さ10m、直径3mのRC橋脚を1/30でモデル化したもので、その外寸および配筋を図-5に示す。今回の実験では、コンクリートの代わりに圧縮強度 $24.5\text{N}/\text{mm}^2$ のモルタルを使用し、鉄筋は表-1に示すD6鉄筋を使用した。

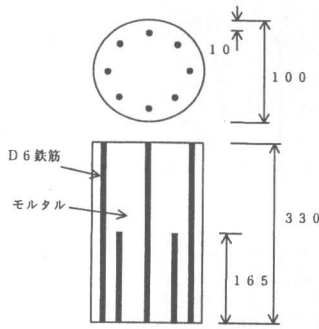


図-5 モデル供試体

表-1 鉄筋の引張試験結果

弾性係数 (N/mm ²)	1.96×10 ⁵
降伏点 (N/mm ²)	461
引張強さ (N/mm ²)	573
伸び (%)	21

2.4 補強方法

補強方法によるひびわれ発生抑制効果の違いを確認するために、図-6 (a), (b) に示す2種類の繊維補強と、図-6 (c) に示す鋼板巻立て補強を用いた。

図-6 (a) の全周ストライプ補強は、橋脚の全周を鉛直方向に繊維で縞状に補強したものであり、補強材料の総量の引張耐力が、いずれも鋼板巻立て補強の降伏耐力 (39KN) と計算上等しくなるように補強量を決定した。

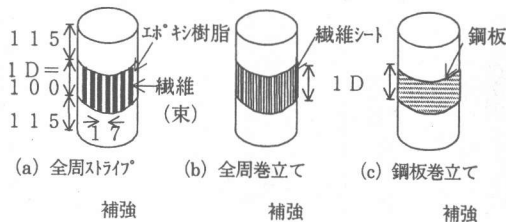


図-6 補強方法

一方、図-6 (b) の全周巻立て補強は、補強繊維の目付け量を 300g/m² に等しくした。なお、補強長は鋼板巻立ての報告²⁾ を参考にいずれも 1D とし、繊維の接着剤にはエポキシ樹脂を使用した。

2.5 補強材料の種類

補強に用いた材料の物性を表-2 に示す。比較基準として、SS400 鋼板に相当するグリキ板を使用した。また、アラミド繊維は、芳香族ポリアミド繊維のものを使用し、炭素繊維は、PAN 系のものを使用した。また、ビニロン繊維は、欧州においてスレートの耐衝撃性を向上させる目的で使用されている繊維で、アラミド繊維や炭素繊維とほぼ等しい使用性のものを用いた。なお、すべての繊維は、全周ストライプ補強に用いるための束状の素線タイプと、全周巻立て補強に用いるためのシートタイプのものを使用した。

2.6 実験ケース

実験ケースは、無補強を加えて、補強方法および補強材料の種類を組み合わせ、表-3 に示す8種類とした。

表-3 実験ケース

No	補強有無	補強材料	補強方法	引張耐力比*1
1	無			
2	有	アラミド繊維	全周ストライプ補強	1.0
3			全周巻立て補強	4.1
4		炭素繊維	全周ストライプ補強	1.0
5			全周巻立て補強	5.9
6		ビニロン繊維	全周ストライプ補強	1.0
7			全周巻立て補強	2.1
8		鋼板	巻立て補強	1.0

*1: 繊維補強材料の総量の引張耐力 / 鋼板の総量の引張耐力

表-2 補強材料の物性

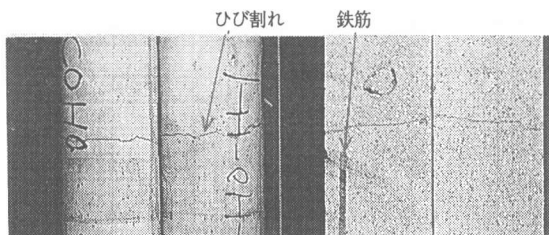
	鋼板	アラミド繊維	炭素繊維	ビニロン繊維
単繊維直径	厚さ 0.4mm	12μm	7~8μm	14μm
比重	7.86	1.39	1.8	1.3
引張強度 N/mm ²	309 (降伏点)	3,430	4,900	2,176
弾性係数 N/mm ²	2.1×10 ⁵	7.3×10 ⁴	2.3×10 ⁵	5.2×10 ⁴
破断時伸び	21.0 以上	4.6%	2.2%	4.9%

3. 実験結果および考察

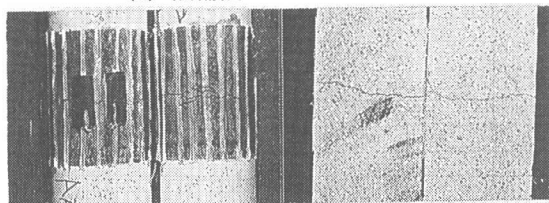
3.1 補強方法が輪切り状ひび割れ抑制に及ぼす影響

写真一1 (a) ~ (h) にモデル供試体の補強部のひび割れ状況 (外側および内部) を示す。写真一1 (a) の無補強では、内部鉄筋量が変化する段落し部に顕著な輪切り状ひび割れが観察された。また、写真一1 (b), (c), (d) に示すアラミド繊維、炭素繊維およびビニロン繊維の全周ストライプ補強では、補強したにも拘わらず、段落し部に輪切り状ひび割れが観察された。これは、全周ストライプ補強では補強材料の総量の引張耐力が十分でなかったため、コンクリートの輪切り状ひび割れを防ぐことができなかったと考えられる。

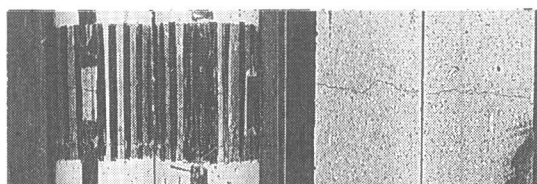
一方、写真一1 (e) ~ (h) の全周巻立て補強および鋼板巻立て補強では、段落し部に輪切り状ひび割れは観察されなかったが、補強材料の上下端部で輪切り状ひび割れが観察され、全周ストライプ補強とは異なる位置に輪切り状ひび割れが発生した。これは、全周巻立て補強では補強材料の総量の引張耐力が十分であったため、段落し部には輪切り状ひび割れが発生しなかったが、剛性の変化部が弱点となり、輪切り状ひび割れが発生したと考えられる。



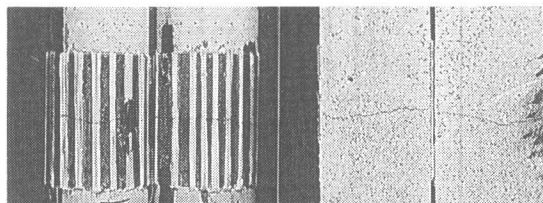
(a) 無補強



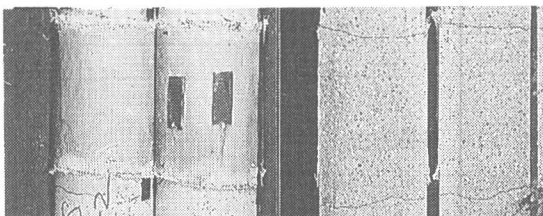
(b) アラミド繊維全周ストライプ補強



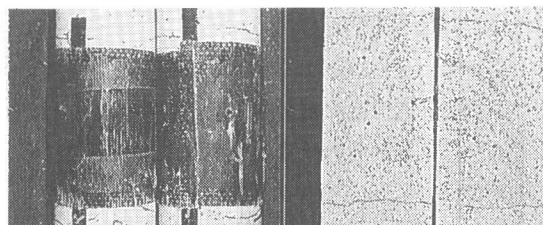
(c) 炭素繊維全周ストライプ補強



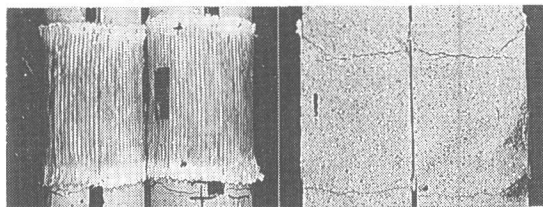
(d) ビニロン繊維全周ストライプ補強



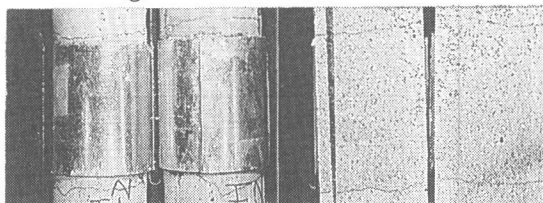
(e) アラミド繊維全周巻立て補強



(f) 炭素繊維全周巻立て補強



(g) ビニロン繊維全周巻立て補強



(h) 鋼板巻立て補強

写真一1 モデル供試体補強部のひび割れ状況
(各写真の左は外側のひび割れ状況, 右は内部のひび割れ状況)

3.2 段落し部のひずみ応答

図一7 (a) ~ (h) に段落し部に貼付したモルタルのひずみゲージ (C4) および鉄筋のひずみゲージ (S3とS8の平均値) のひずみ応答の時刻歴を示す。

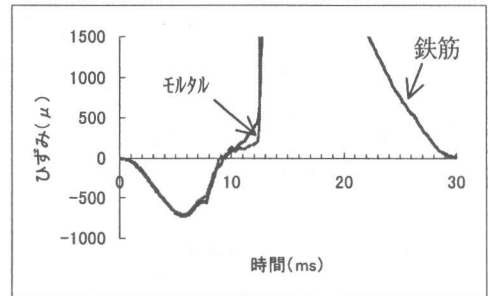
図一7 (a) に示す無補強では、約 12ms でモルタルのひずみが引張側に振り切れており、鉄筋のひずみもモルタルの振り切れ応答に重なるように、瞬時に引張側に振り切れている。これは、輪切り状ひび割れが発生した断面部分で鉄筋のみが引張力を負担したためだと考えられる。つまり、鉄筋の周りにひび割れが発生したことを意味しており、一瞬にして輪切り状ひび割れが成長したと考えられる。

一方、目視観察で段落し部に輪切り状ひび割れが観察された図一7 (b) ~ (d) の全周スライブ補強では、モルタルおよび鉄筋のひずみが同時に急激に増加しており、瞬時に輪切り状ひび割れが成長したと考えられる。しかし、輪切り状ひび割れが発生した時間が、約 16ms ~ 18ms であり、無補強より約 4~6ms 遅れる傾向が見られた。

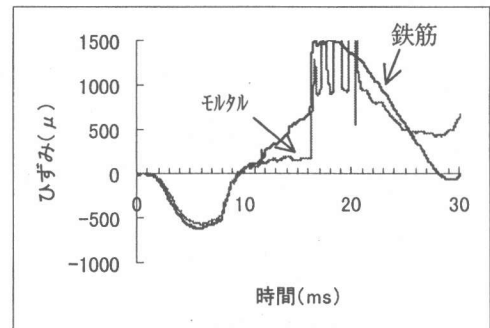
次に、図一7 (e), (f) に示すアラミド繊維、および炭素繊維の全周巻立て補強では、モルタルのひずみ応答およびひび割れ観察結果から判断して、段落し部に輪切り状ひび割れは発生していないと考えられるが、いずれの補強も、鉄筋のひずみが 1000 μ 程度であることを考慮すると、鉄筋とコンクリートの境界部において局部的な破壊が発生している可能性が高いと考えられる。

図一7 (g) に示すビニロン繊維の全周巻立て補強では、約 17ms でモルタルおよび鉄筋のひずみに急激な増加が見られたが、目視観察においては段落し部に輪切り状ひび割れは観察されなかった。

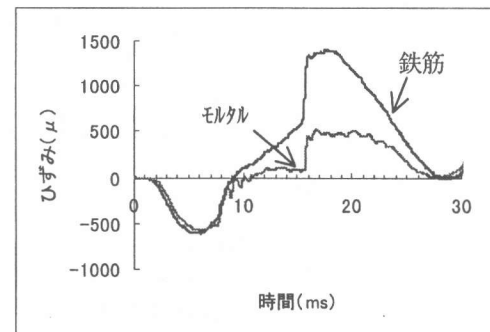
また、図一7 (h) の鋼板巻立て補強では、ひずみ応答およびひび割れ観察結果から、モデル供試体の段落し部に輪切り状ひび割れは発生していないと考えられる。



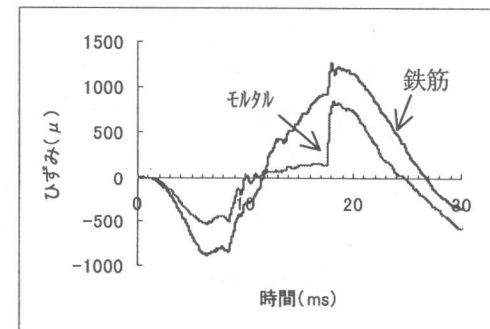
(a) 無補強



(b) アラミド繊維全周スライブ補強

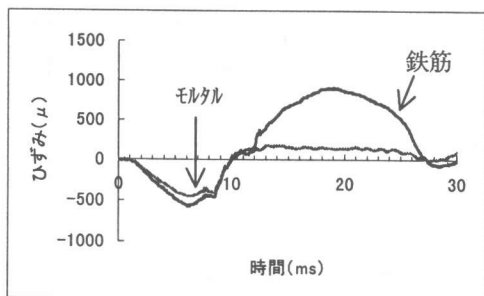


(c) 炭素繊維全周スライブ補強

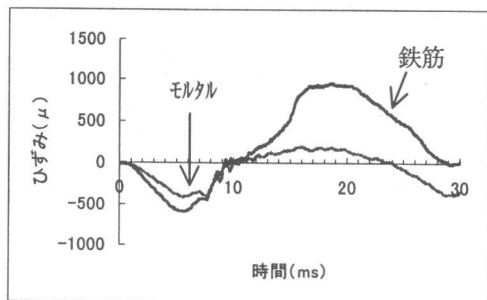


(d) ビニロン繊維全周スライブ補強

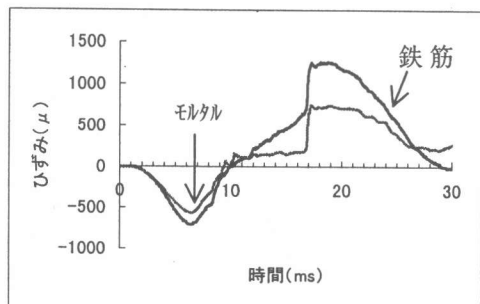
図一7 段落し部ひずみ応答



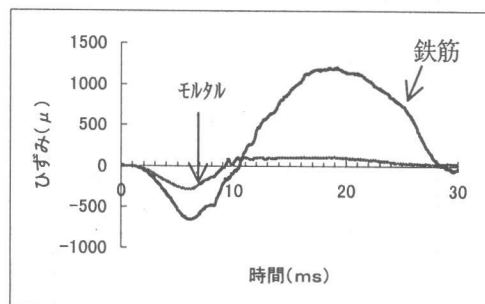
(e) アラミド繊維全周巻立て補強



(f) 炭素繊維全周巻立て補強



(g) ビニロン繊維全周巻立て補強



(h) 鋼板巻立て補強

図一七 段落し部のひずみ応答

3.3 段落し部の最大鉄筋ひずみ応答の比較

表一四に無補強に対する各補強の段落し部における最大鉄筋ひずみ比を示す。全周ストライプ補強では、すべての繊維補強のひずみが、無補強のひずみより約40%程度小さくなった。また、全周巻立て補強では、ビニロン繊維のひずみは全周ストライプ補強と変わらないが、アラミド繊維および炭素繊維のひずみは、さらに全周ストライプ補強より小さな値となった。以上の結果より、各繊維補強の段落し部の最大鉄筋ひずみが無補強に比べ著しく小さくなっており、繊維補強することにより、鉄筋への負担が著しく減少することがわかった。

表一四 最大鉄筋ひずみ比

	全周ストライプ補強	全周巻立て補強
アラミド繊維	0.63	0.48
炭素繊維	0.60	0.41
ビニロン繊維	0.55	0.55
鋼板	0.54	

4. まとめ

衝撃的上下動に関する今回の実験のまとめを以下に述べる。

- 1) 全周ストライプ補強では、段落し部に輪切り状ひび割れが観察されたが、輪切り状ひび割れの発生は、無補強のそれと比べて、約4~6ms程度遅れる傾向が見られた。
- 2) 全周巻立て補強では、段落し部の輪切り状ひび割れは観察されなかったが、補強材料の端部で輪切り状ひび割れが観察された。
- 3) 繊維補強したすべてのモデル供試体において、段落し部の鉄筋の最大ひずみは、無補強モデル供試体に比べ著しく小さくなり、繊維による補強効果を確認できた。
- 4) 繊維の種類による補強効果の差はほとんど見られなかった。

参考文献

- 1) 別府万寿博ほか：衝撃突き上げ装置によるRC橋脚模型の輪切り状ひび割れに関する実験的研究,土木学会論文集, No.577/I, pp.165-180, 1997.10
- 2) 別府万寿博ほか：衝撃的上下動を受けるRC橋脚の輪切り状ひび割れの再現と鋼板巻立て補強効果に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No. 2, pp.279-285, 1997. 7