

論文 実規模壁式 RC 橋脚の AFRP シート巻き付けによる靱性能向上効果

佐藤昌志^{*1}・三上 浩^{*2}・三田村浩^{*3}・木下昌樹^{*4}

要旨：昭和 55 年度改訂版道路橋示方書・同解説に準拠した実規模壁式 RC 橋脚に、軸方向鉄筋段落とし部の靱性能向上を目的としたアラミド繊維補強プラスチック（以下 AFRP）シート巻き付けおよび貫通中間拘束筋を施し、それを試験体として正負交番載荷実験を行った。実験の結果、(1) 無補強に比べて降伏変位が 30%，終局変位が 40% 程度増加する，(2) 終局塑性率は無補強に比べて大差ないが、エネルギー吸収能力は 1.5 倍程度以上向上する，(3) 段落とし部における斜めひび割れを効率的に抑制することができる，などが明らかとなった。

キーワード：壁式 RC 橋脚，耐震補強，AFRP シート巻き付け，貫通鉄筋，靱性能

1. はじめに

平成 8 年に道路橋示方書・同解説が改訂され、同書に準拠する以前に建設された既設橋脚の補強が行われている。既設橋脚の補強を行う際には、重要性、施工性、経済性などを十分に考慮して行う必要があるが、例えば北海道内でも施工数の多い河川内の橋脚について考えてみると、① 河積阻害率から補強後の断面増加量が制約される，② 建設時に予め洗掘対策として基礎の根入れ深さを大きくとっており、そのため橋脚の基部補強、または基礎補強が生じた場合、仮設工の規模が大きくなり施工が容易ではない、などの課題が挙げられている。既設橋脚の多くは主鉄筋の段落としを有しており、段落とし部が耐震上の弱点となる場合が少なくないが、段落とし部を補強する際に上記①による制約を受ける。また、段落とし部を補強することによって弱部が基部へ移行する場合には、基部や基礎の補強を必要とすることがあり、その場合には上記②が問題となる。著者らはこのような状況を鑑み、RC 橋脚の補強方法として弱部を基部に移行させず、段落とし部の脆性的な破壊を回避させ靱性能を向上させる方法が総合的に合理的であるものと判断した。

本研究では、このような観点から RC 壁式橋脚の補強方法として AFRP シート巻き付け工法を提案し、その靱性能改善効果を実規模橋脚模型により実験的に検討した。ただし、既設橋脚には中間帯鉄筋が配筋されていないため、貫通鉄筋を用いて横拘束する方法を併用することとした。実験に用いた試験体は、昭和 55 年度版道路橋示方書・同解説に準拠して製作し、靱性能の検証は水平交番載荷実験によって行った。

2. 補強設計の考え方

補強が必要となる壁式 RC 橋脚は、作用モーメントに対する段落とし部の安全率が基部に比べて小さいため、段落とし部で終局に至る可能性のある橋脚であることが多い。その破壊性状は図-1 のようになることが知られており、曲げひび割れが水平方向に断面中央近傍まで進展した後、斜め下方にせん断ひび割れとして逐次進展していく。このせん断ひび割れが圧縮鉄筋配筋位置まで到達すると、ひび割れはほぼ鉄筋に沿って進行し、やがてかぶりコンクリートの剥落、鉄筋の座屈が生じて脆性的な破壊に至る。著者らは、このせん断ひび割れの発生を遅延または防止することで脆性

*1 北海道開発局 札幌開発建設部 札幌道路事務所長 工博（正会員）

*2 三井建設（株） 技術研究所 主任研究員 工博（正会員）

*3 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室研究員（正会員）

*4 ショーボンド建設（株）（正会員）

的な破壊を回避し、橋脚の靱性能向上が図られるのではないかと考え、段落とし部の補強を試みることにした。ただし、対象とする壁式 RC 橋脚は断面寸法比が 1:3 以上であることを前提とする。その対象とする RC 橋脚は、段落とし部の曲げ耐力を向上させることにより基部破壊に移行する可能性があるため、せん断補強のみを目指した。補強工法には、RC 巻き立て、鋼板巻き付けも考えられるが、本研究では補強による断面増加が少ないこと、曲げ補強を伴わずにせん断補強することを条件とし、AFRP シート巻き付け工法を採用した。対象とする RC 橋脚の補強設計は以下のように行った。

断面分割法により求めた段落とし部の抵抗曲げモーメントを M_u 、加力点から段落とし部までのアーム長と l とすれば、この時の段落とし部の作用せん断力 S は、

$$S = M_u / l \quad (1)$$

ここでは、この作用せん断力に対して AFRP シートを巻き付けてせん断補強するものとする。せん断補強に必要な AFRP シートの断面積 A_{AF} は参考文献 1) より下式によって求められる。

$$A_{AF} = 1.15 S / (0.6 E_{AF} \cdot d) \quad (2)$$

ここに、 E_{AF} : AFRP シートの弾性係数

d : 橋脚断面の有効高

従って、必要枚数は、下式で決定される。

$$n = A_{AF} / (2 \cdot t) \quad (3)$$

ここに、 t : AFRP シート 1 枚の厚さ

なお、補強範囲は、既往の実験結果を参考に、段落とし部から上方には $1.0D$ (D : 壁厚) 以上、下方には、 $0.6 \sim 0.7D$ 程度以上とする。一方、AFRP シート巻き付けによる横拘束効果は断面寸法比が 1:1 ~ 1:1.5 程度までに関しては確認されているが、対象とする橋脚は 1:3 以上と扁平率が大きく、AFRP シート巻き付けのみでは所定の横拘束効果が得られない可能性がある。また、中間帯鉄筋が配筋されていないため、十分な横拘束効果は期待できない。そこで、シート巻き付け

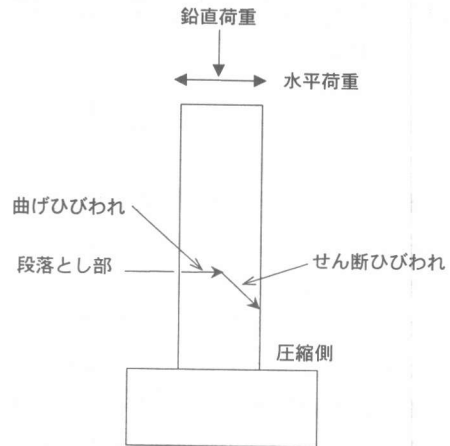


図-1 橋脚のひび割れ性状

後に壁に貫通鉄筋を配置し、壁のはらみだしを抑制することとした。貫通鉄筋は壁の幅方向を 1:1 程度の寸法比に分割されるように、また、壁高さ方向の間隔は横拘束効果を期待するための最小間隔として壁厚の半分以下に配置する必要がある。さらに、貫通鉄筋はシートと同等以上の引張剛性を有していなければならない。かつ、1本の貫通鉄筋は左右両側に有効でなければならない。すなわち、1列あたりの全貫通鉄筋の引張剛性は巻き付ける AFRP シートの引張剛性の 2 倍以上でなければならないものと判断される。これより、貫通鉄筋の必要断面積は、

$$2 \cdot E_s \cdot A_{AF} = E_s \cdot A_s \quad (4)$$

ここに、 E_s : 貫通鉄筋の弾性係数

A_s : 貫通鉄筋の断面積

3. 実験の概要

対象とする RC 橋脚を想定して、図-2 に示す実規模の試験体を製作して実験を行った。実験に用いた試験体は、壁厚 80 cm、壁幅 250 cm、壁高 400 cm で、基部より 150 cm の位置で主鉄筋の段落としを行っている。実験は、無補強試験体 (以下 P-N) と補強した試験体 (以下 P-A) に対して行った。その結果を比較し、主として靱性能の改善効果に着目して検討を行った。試験体に用いた

コンクリートの実験時の材令における圧縮強度は 20.4MPa, 弾性係数は 13.9GPa, ポアソン比は 0.112 である。また, 補強に用いた AFRP シートは, 目付量が 415g/m^2 , 厚さ 0.286mm, 弾性係数は 126.5GPa, 引張強度は 2.48GPa, 破断歪は 1.96% である。なお, 試験体の主鉄筋と帯鉄筋, および貫通鉄筋は全て SD345 で, 引張強度は 390MPa, 弾性係数 229GPa, 降伏歪 0.17% である。

図-3 に提案した補強工法による補強の概要を示す。本試験体の段落とし位置の抵抗曲げモーメントは断面分割法より $M_u = 1.29 \text{ (MNm)}$ であり, 段落とし部から加力点までのアーム長は $l = 2.65 \text{ (m)}$ である。前項の補強設計の考え方に基づき, AFRP シートを 2 層とし, 補強範囲は 30cm 幅

シートを用いることから 1.5m 区間とした。貫通鉄筋は壁の横断方向に 2 列, 高さ方向に 4 段配置した。貫通鉄筋の径は D19 以上が必要となったが, ナット定着のためのネジ切りによる断面積の減少を考慮して D22 を使用した。貫通鉄筋は定着板として幅 10cm 四方で, 厚さ 16mm の鋼板を用い, ワッシャを介して定着している。なお, 貫通鉄筋を通すための削孔部は実構造を想定し, 貫通鉄筋の腐蝕防止も考慮して貫通鉄筋設置後にモルタルを充填している。

実験は橋長 30m の実規模 2 径間連続桁橋の中間橋脚として試験体を設置し, 連続桁を支持する試験体の天端にピン支承を設置し, そのピン位置に設置したジャッキ式繰返し載荷装置を用いて

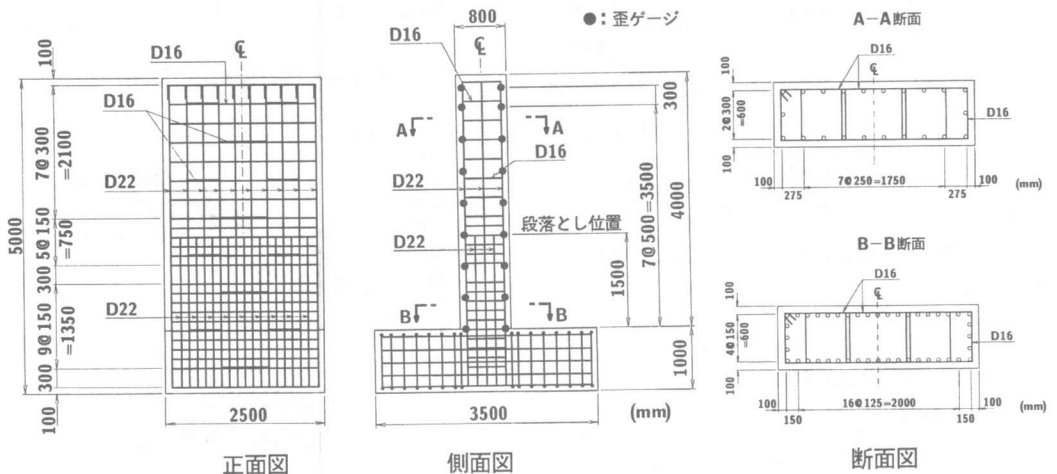


図-2 試験体の形状寸法と配筋状況

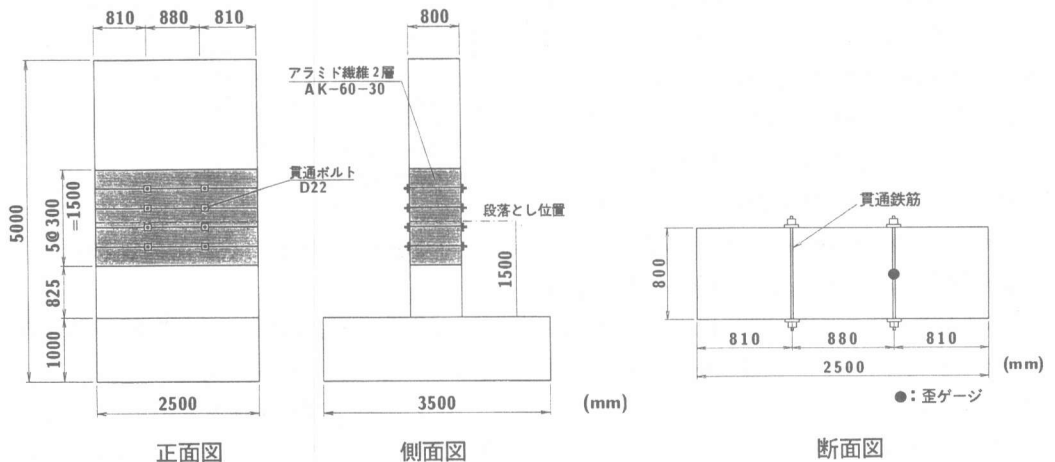


図-3 補強の概要図

表—1 実験結果一覧

試験体	変位 (cm)		荷重 (kN)							終局時	終局 塑性率 δ_u/δ_y
	δ_y	δ_u	P_y			P_u			最大値		
			正	負	平均	正	負	平均			
P-N	2.02	13.58	398.9	366.6	382.8	390.2	431.5	410.9	563.2	$6\delta_y$	6.86
P-A	2.58	19.02	410.4	405.1	407.8	560.7	532.7	546.4	592.1	$7\delta_y$	7.37

ここに、 δ_y , P_y : 主鉄筋が降伏歪に達した時の載荷点の水平変位, および水平荷重

δ_u , P_u : 本実験で定義した破壊に至った時の載荷点の水平変位, および水平荷重

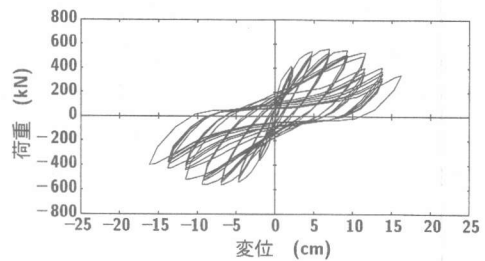
行った。従って、載荷点は橋脚天端より 15 cm 上方であり、かつ段落とし部から 2.65 m 上方の位置になる。この時、試験体には上部工死荷重 661.5 kN が軸力として作用している。載荷荷重はロードセルで計測し、水平変位はワイヤ式変位計にて測定した。水平交番載荷は、壁中央の主鉄筋に貼り付けた歪ゲージからの出力をもとに、主鉄筋が降伏歪に達した点の変位を降伏変位 δ_y 、その時の荷重を P_y として、 δ_y , $2\delta_y$, $3\delta_y$, ... と変位振幅を漸増させて繰り返し載荷する方法とした。繰り返し回数は各変位振幅ごとに 5 回とし、1 回目の正・負いずれかの載荷荷重が P_y を下回った段階を終局と定義した。

4. 実験結果及び考察

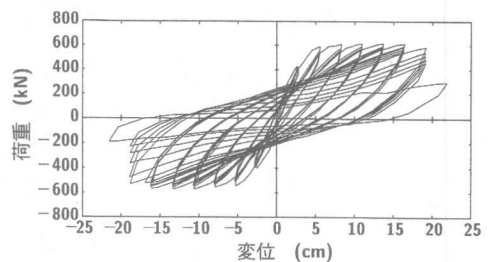
4.1 荷重—変位関係

表—1 に実験結果をとりまとめた。段落とし部を拘束して補強した P-A の降伏変位は、無補強の P-N のそれを 30% 程度上回り、終局変位も 40% 程度向上していることが分かる。なお、段落とし部において曲げ補強を行っていないことより、最大荷重は補強によって 5% 程度のみの向上となっている。終局時は P-N が $6\delta_y$ 1 回目で P_y を約 10% 上回る程度だったのに対して、P-A では $8\delta_y$ 1 回目において載荷荷重が低下したため $7\delta_y$ の段階で終局となった。その時の載荷荷重は P_y の 1.4 倍、最大荷重の 96% 程度と高い荷重レベルを保持していた。終局塑性率 δ_u/δ_y は P-N で 6.86, P-A で 7.37 と大差はない。

図—4 に各試験体の荷重—変位関係を示す。P-N は $5\delta_y$ の 2～3 回目で段落とし部の損傷が

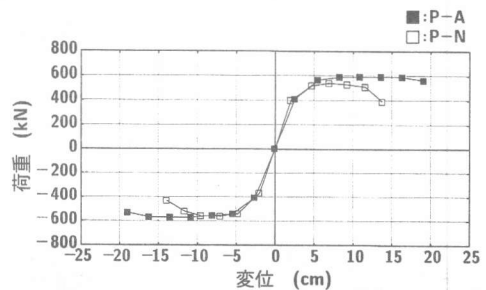


(a) 無補強試験体 P-N



(b) 補強試験体 P-A

図—4 各試験体の荷重—変位関係



図—5 荷重—変位関係の包絡線

著しくなり、 $6\delta_u$ 1 回目で載荷荷重が急激に低下している。一方、P-A は $7\delta_y$ を終了した後の $8\delta_y$ 1 回目の正・負載荷時にアラミド繊維を束ねている糸が切れコンクリートがはらみ出した部分のアラミド繊維が上下によれた状態となり、かつ

その近傍における主鉄筋が破断して終局に至っている。両者間で終局塑性率は上述したように大差がないものの、エネルギー吸収性能は明らかに補強した P-A において向上していることが分かる。図—5 には荷重—変位関係の包絡線を示している。包絡線は各変位振幅の正負 1 回目をを用いて示した。図より包絡線の領域は P-A で大きく、載荷荷重を安定して大きな変位振幅まで保持できることが分かる。

4.2 破壊性状

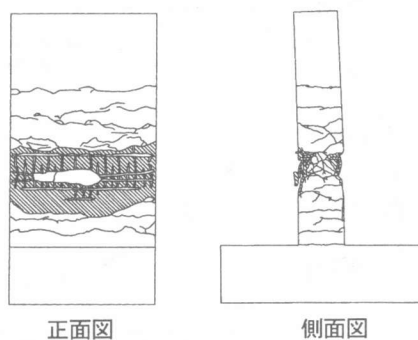
図—6 には各試験体の実験終了後の破壊性状を示している。無補強の P-N は、段落とし部近傍で天端まで伸びている鉄筋のほぼ全てが座屈し、数本が破断していた。かぶりコンクリートは段落とし部から下方に広範囲に剝落している。また、段落とし部近傍で壁厚方向に水平ひび割れから斜め 45° のひび割れに移行しているのが分かる。なお、基部近傍でも数本の曲げひび割れが発生しているが、斜め方向のせん断ひび割れは生じていない。基部近傍のひび割れはいずれも $1\delta_y$ で発生し、それ以降の進展はみられない。

補強した P-A では、終局時に前述のようにアラミド繊維を束ねている糸が切れ、コンクリートのはらみ出しによってアラミド繊維が上下によれ、さらに、この部分を押し広げるように若干のかぶりコンクリートがはらみ出しており、その位置で鉄筋が座屈している。壁厚方向のひび割れは、段落とし部近傍の補強区間においては、水平方向の曲げひび割れのみであるが、基部では AFRP シート補強を施していないため、曲げひび割れと一部斜め方向のせん断ひび割れが発生している。

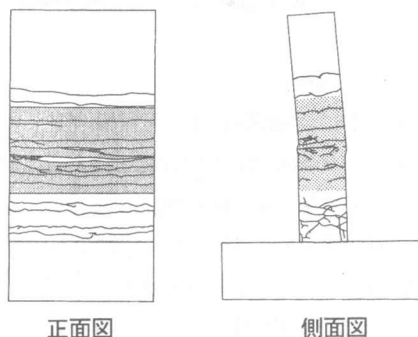
以上のことから、AFRP シート巻き付け補強により P-N で生じた斜めひび割れが効率的に抑制されて段落とし部の損傷が緩和され、P-A の靱性能力が大きく向上していることが分かる。

4.3 AFRP シートと貫通鉄筋の歪

図—7 には、段落とし位置における AFRP シートの壁正面中央と壁側面中央部の周方向歪と、貫通鉄筋中央の歪を示している。側面部の AFRP シートおよび貫通鉄筋の歪分布を比較すると、変

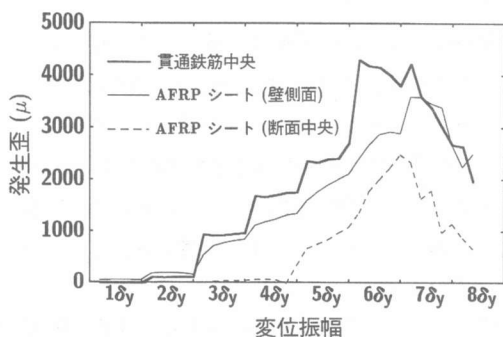


(a) 無補強試験体 P-N



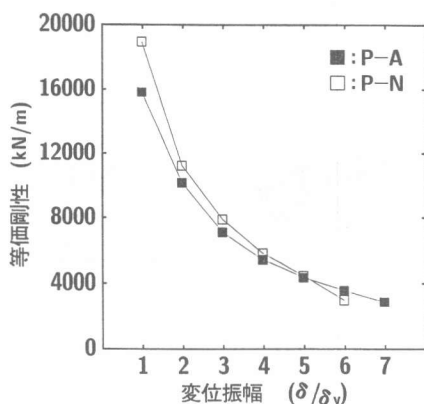
(b) 補強試験体 P-A

図—6 実験終了後の破壊性状

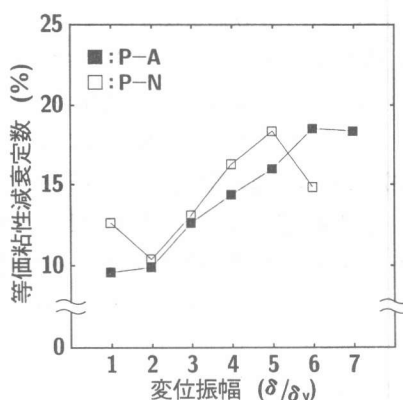


図—7 AFRP シートと貫通鉄筋の歪

位振幅の増加に対して貫通鉄筋歪が AFRP シートより若干大きな値を示しており、側面部に比較して断面中央部のはらみだしが大きく、貫通鉄筋による拘束効果が大いことが分かる。また、断面中央部の AFRP シートの歪分布より、 $4\delta_y$ 程度の段階までは壁面を巻き付けることによる拘束効果は零であること、その後ははらみ出しとともに拘束効果が出現していることが分かる。



図一八 等価剛性と変位振幅の関係



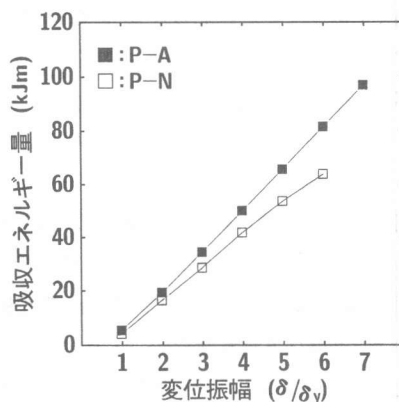
図一九 等価粘性減衰定数と変位振幅の関係

4.4 靱性能

図一八には等価剛性と変位振幅の関係を示している。等価剛性は各変位振幅正負1回目の荷重-変位関係を用いて算出した。これより、等価剛性は両試験体ともに載荷振幅の増加に伴い指数関数的に減少していることが分かる。また、当初はP-Nが20%程度大きいですが、変位振幅が大きくなるにつれて差が縮まり、 $6\delta_y$ でP-Aが大きくなることから、本補強により等価剛性の低下を抑制できることが分かる。

図一九には等価粘性減衰定数と変位振幅の関係を示している。等価粘性減衰定数は各変位振幅に関する第1ループの履歴曲線を用いて評価した。P-Nの場合には変位振幅で多少変動しているが、P-Aの場合には変位振幅の増大とともに徐々に増加しており、終局時に18%程度を保持していることが分かる。

図一〇には吸収エネルギーと変位振幅の関係を示している。吸収エネルギーは、各変位振幅の正負の平均値を用いて評価した。補強したP-Aでは、終局の $7\delta_y$ まで線形に増大しているが、無補強のP-Nでは $5\delta_y$ までは線形に増加しているものの、 $6\delta_y$ でエネルギー吸収量の伸びが減少している。また、吸収エネルギーと変位振幅のなす勾配を比較すると、明らかにP-Aが大きいことが分かる。終局時の吸収エネルギーはP-Aで約97kJ、P-Nで約63.7kJであり、補強することにより吸収エネルギーが1.5倍以上増加しているこ



図一〇 吸収エネルギーと変位振幅の関係

とが分かる。

5. まとめ

段落としを有する壁式橋脚に対し、AFRPシート巻き付けと貫通鉄筋による横拘束工法を併用する補強方法を提案し、靱性能の改善効果を実験的に検討した。実験の結果、本補強により、エネルギー吸収能力が1.5倍以上向上し、大きな変位振幅まで安定して載荷荷重を保持できることが明らかとなった。これより、提案する補強方法は実構造に十分適用できるものと判断される。

参考文献

- 1) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領（案），1998