

アラミド繊維シートを用いた特殊断面RC橋脚の耐震補強

首都高速道路公団 正会員 金成 克弘
首都高速道路公団 正会員 大塚 敬三
鹿島 技術研究所 正会員 秋山 暉
鹿島 技術研究所 正会員 増川 淳二

1. はじめに

首都高速5号線と高速大宮線及び外郭環状線を接続する美女木ジャンクション付近の高架構造は、図-1に示されるように、橋脚が新大宮バイパスのアンダーパス擁壁上に設置されており、橋軸直角方向は2本の橋脚が上部で横梁によって接合された2本橋脚ラーメン構造となっている。橋脚は断面が偏平8角形で断面寸法が高さ方向に変化しているほか、軸方向鉄筋が数箇所段落しされているという特徴を有している。これらの橋脚を補強するには交通量の多いアンダーパス及び側道の規制が必要となる上に、側道の建築限界から補強材の厚みがほとんどとれないため、RC巻き立て工法は採用できない。また、断面寸法が変化し形状も特殊なことから、鋼板巻き立て工法も鋼板の加工及び組み立てに手間がかかる。そこで、これらの従来工法に対して施工速度が速く、補強厚も薄くできる連続繊維シート巻き立て工法が有効であると考えられた。特に、この橋脚は断面形状が変化しておりシートを水平に貼り付けることが困難であるため、炭素繊維シートに対して柔軟性に富み、比較的繊維の折れ曲がりに強いアラミド繊維シートを採用した。ここでは、補強効果確認実験と実橋の設計、施工について報告する。

2. 補強効果確認実験

「アラミド繊維シート補強工法」は、鉄道高架橋柱・道路橋脚ともにいくつかの実験例及び施工例がある上、設計・施工指針^{1) 2)}も存在する。しかし、このような特殊な形状の橋脚の実験・施工例は存在しない。そこで、縮小模型試験体2体を製作し、1体はそのまま、もう1体のみアラミド繊維シートを水平方向に巻き付けて加力実験を行い、両者を比較することによりシートの補強効果を確認し、実橋におけるシートの補強量を決定することとした。

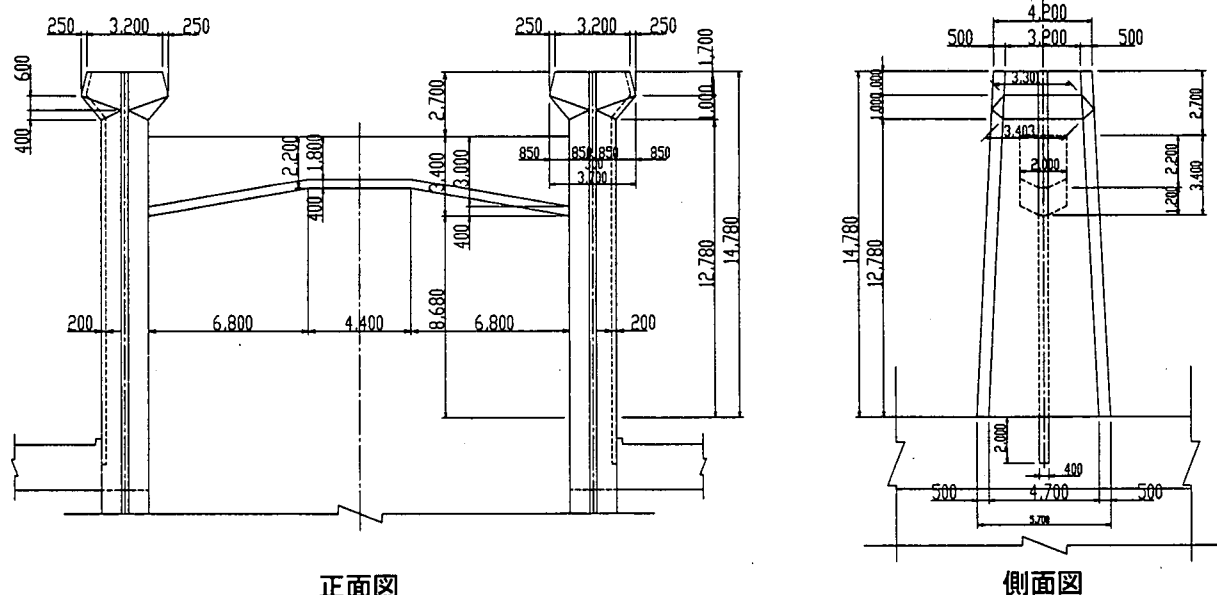


図-1 対象橋脚概要図

キーワード：アラミド繊維、耐震補強、段落し、せん断、じん性

連絡先：〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-2-4 首都高速道路公団 第一建設部設計課

TEL 03-3861-4671 FAX 03-3861-4969

2. 1 試験体のモデル化の考え方

対象橋脚は橋軸直角方向に対してはラーメン構造であるため、本実験では橋軸直角方向の耐震性能のみを確認することとし、2本橋脚のうち1本のみを取り出しモデル化した。縮尺は加力装置などの影響により、約1/6.3とし、試験体形状は実橋とできる限り合わせた。試験対象区間は、実橋の補強範囲である柱基部から梁接合部下端部（試験体では柱基部から1,370mmの位置）までとし、それより上部は十分に補強した。試験体柱部の軸方向鉄筋比は、破壊性状及び変形性能に及ぼす影響が大きい実橋と同程度とするが、曲げ耐力に対するせん断耐力の比は、シートによる補強効果がより顕著に現れるように、実橋よりもかなり低く設定した。せん断耐力は、コンクリート強度及び帯鉄筋量により調整した。

2. 2 試験体概要

試験体の配筋図を図-2 に示す。柱部の軸方向鉄筋にはSD345-D16 鉄筋（降伏強度 4,180kgf/cm²）を用い、柱基部で 36 本配筋し、軸方向鉄筋比は 2.6%である。段落しは柱基部から 1,000（500）mm と 1,350（850）mm の 2 箇所で行った。（括弧内は定着長を引いた計算上の段落し位置を示す）。帯鉄筋はSD295-D6 鉄筋（降伏強度 3,050kgf/cm²）を 200mm ピッチで配筋した。コンクリートは最大骨材寸法 10mm の豆砂利を用いたレディーミクストコンクリートを使用した。実験時のコンクリート圧縮強度は無補強試験体が 258 kgf/cm²、補強試験体が 231 kgf/cm²、引張強度は無補強試験体が 20.7 kgf/cm²、補強試験体が 17.1 kgf/cm²であった。

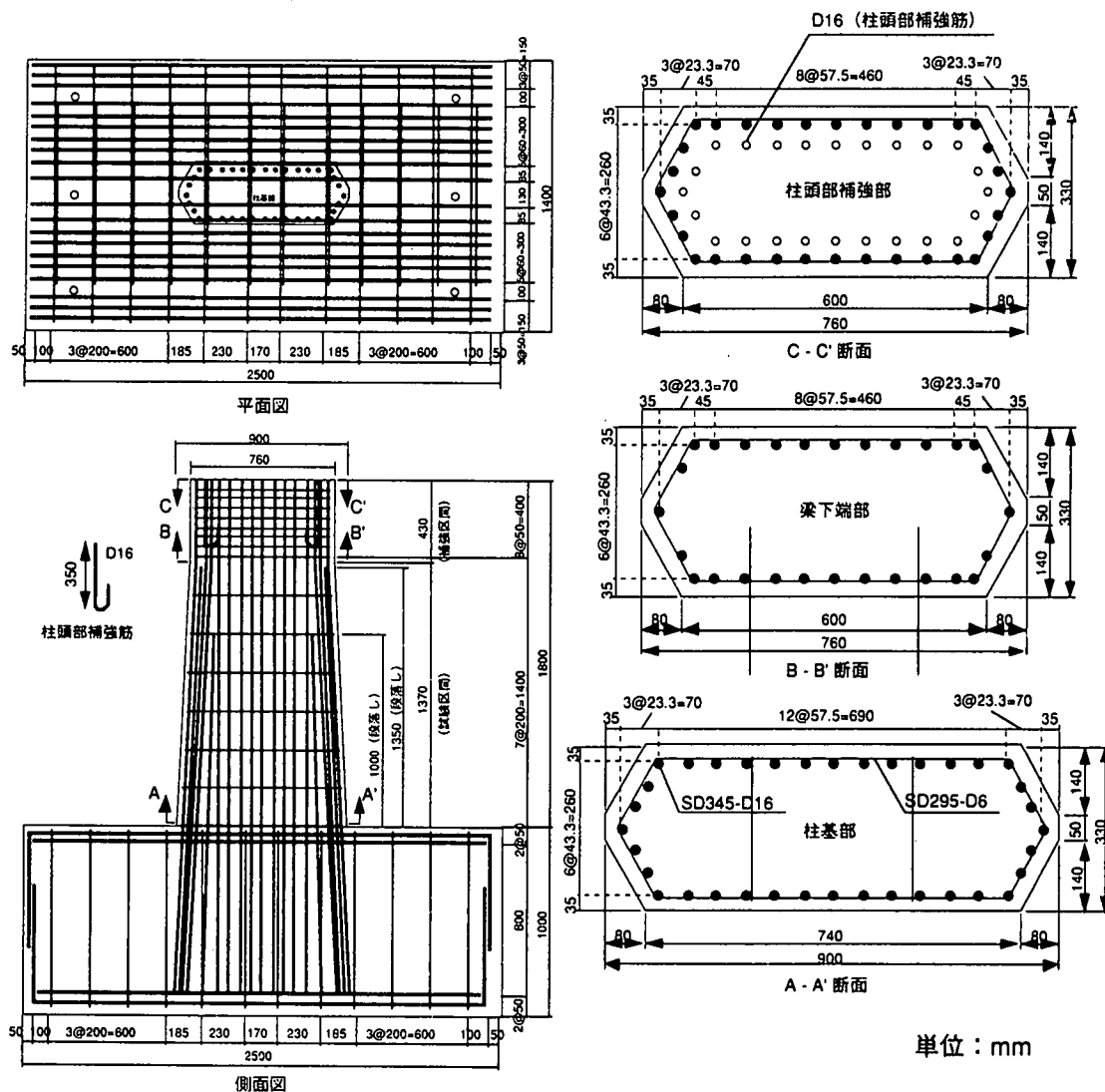


図-2 試験体配筋図

2. 3 試験体の耐力計算値とシート補強量の算定

試験体柱部の高さ方向の各断面における断面曲げ耐力分布図を図-3に示す。曲げ耐力は復旧仕様³⁾により計算した。2個所の段落し位置で曲げ耐力が急激に低下しているが、柱基部を除く全断面で、曲げ耐力が柱基部曲げ終局時の作用せん断力を上回っており、柱基部の曲げ破壊先行型となっている。

次に、せん断耐力分布と柱基部曲げ終局時作用せん断力の関係を図-4に示す。せん断耐力も復旧仕様により算出した。柱部は上になるほど断面高さが減少するために、せん断耐力も小さくなっている。補強前試験体のせん断耐力は、シートによる補強効果を明確にするために、実橋よりもかなり低く設定している。

アラミド繊維シートは、せん断耐力及びびじん性の向上を目的として、水平方向にのみ巻き付けることにした。アラミド繊維シート補強に関する指針は、実験計画時には「アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針」¹⁾（以下、鉄道高架橋指針）のみであったが、その後道路橋を対象とした「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）」²⁾（以下、道路橋指針）が完成した。しかし、両者の指針では対象とする構造物が異なるなどの理由により、アラミド繊維シートによる補強効果の評価に大きな違いが見られる。そこで、本実験では、2つの指針を用いて補強後試験体のせん断余裕度（＝せん断耐力／曲げ耐力）を算出し、その2つの指針により得られたせん断余裕度の平均値が1.1～1.2程度になるように補強量を決定した。その結果、アラミド繊維シートは、60tf/m級シート（繊維目付量415g/m²、引張強度25,500 kgf/cm²、弾性係数1.09 kgf/cm²）を水平方向のみ1層巻き付けることとした。両指針による補強後試験体のせん断耐力分布図を図-4に合わせて示す。2つの指針により算出したせん断余裕度の平均値は、最も値の低い所（柱基部から1,370mmの断面）で、約1.15程度となっている。

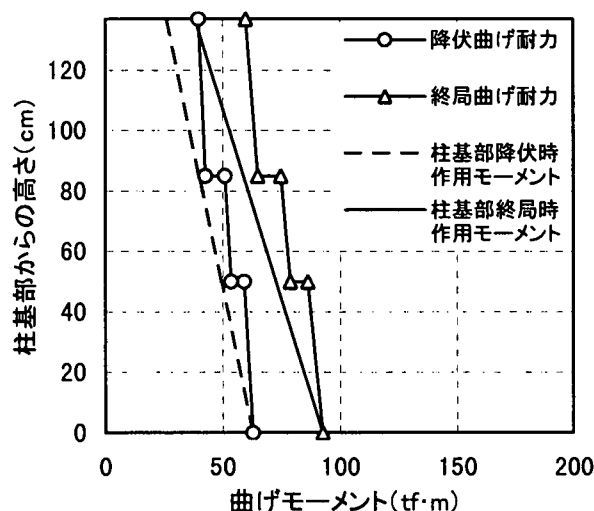


図-3 試験体の曲げ耐力分布

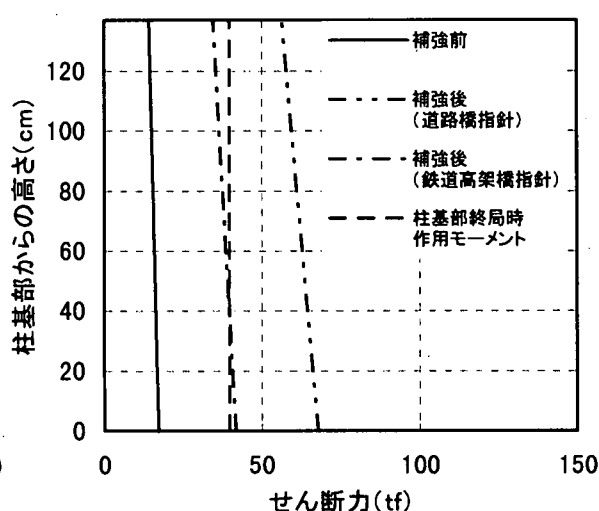


図-4 試験体のせん断耐力分布

2. 4 加力及び計測方法

加力は、図-5に示す加力装置を用いて、試験体柱頭部に、軸力、せん断力、水平力、曲げモーメントを作用させることにより行った。軸力は30.2tf、せん断スパンは2,340mmとし、柱基部の降伏荷重（計算値）までは降伏荷重の約1/6の荷重ステップで繰り返し無しの荷重制御によって、降伏荷重以降は降伏荷重時の試験対象区間最上部（柱基部から1,370mm）の変位の整数倍の変位で3回ずつ繰り返す変形制御により正負交番加力を行った。

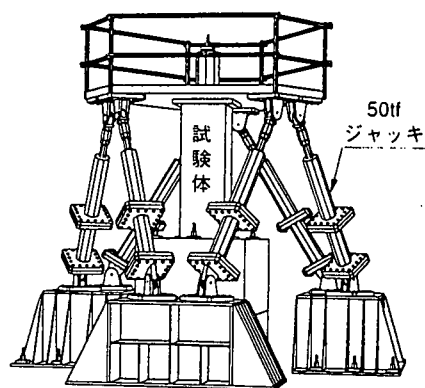


図-5 加力装置

アラミド繊維シートには、図-6の位置にひずみゲージを貼り付けた。

2. 5 実験結果・考察

(1) 無補強試験体

水平荷重－水平変位関係を図-7に示す。水平荷重は柱基部のモーメントをせん断スパン 2,340mm で割った値で、水平変位は柱基部から 1,370mm の高さでの水平変位である。

水平荷重 10tf 程度で柱基部にひび割れが発生し始め、図-8に示す通り、荷重の増加に伴いにひび割れが成長していった。柱基部の曲げ降伏荷重計算値は 31.2tf であり、降伏荷重時の変位での繰り返し途中に柱基部から 1200mm の高さの帯鉄筋が降伏した。その後、降伏荷重を超えた後に大きな斜めひび割れが生じてせん断破壊した。せん断破壊時の水平荷重は 41.9tf、水平変位は 6.5mm であった。

(2) 補強試験体

水平荷重－水平変位関係を図-9に示す。柱基部の曲げ降伏荷重計算値は 30.6tf であり、降伏荷重時の変位 ($1\delta y$) は 5.0mm であった。 $-4\delta y$ 1 回目の加力途中に、アラミド繊維シート表面のエポキシ樹脂に斜めひび割れが発生し始めたが、繊維の破断

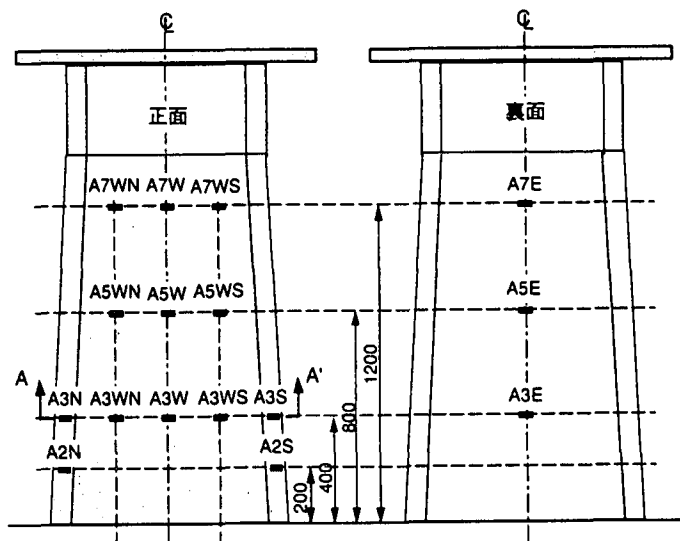


図-6 アラミド繊維シートゲージ位置図

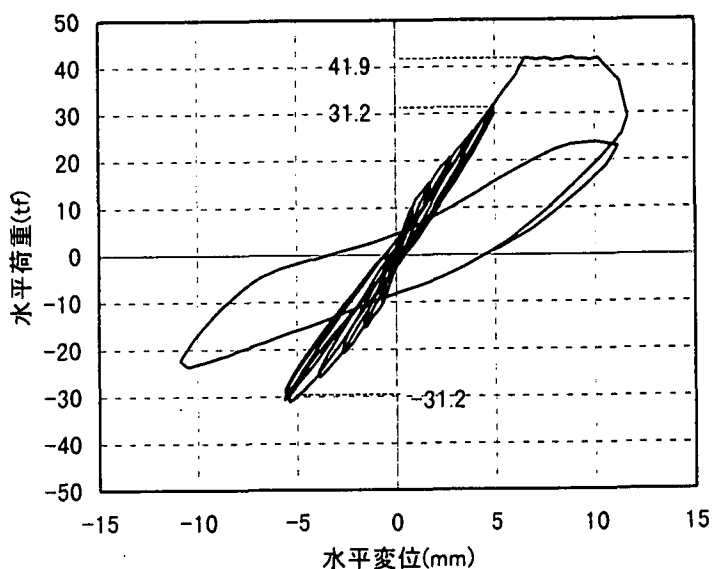


図-7 無補強試験体の荷重－変位関係

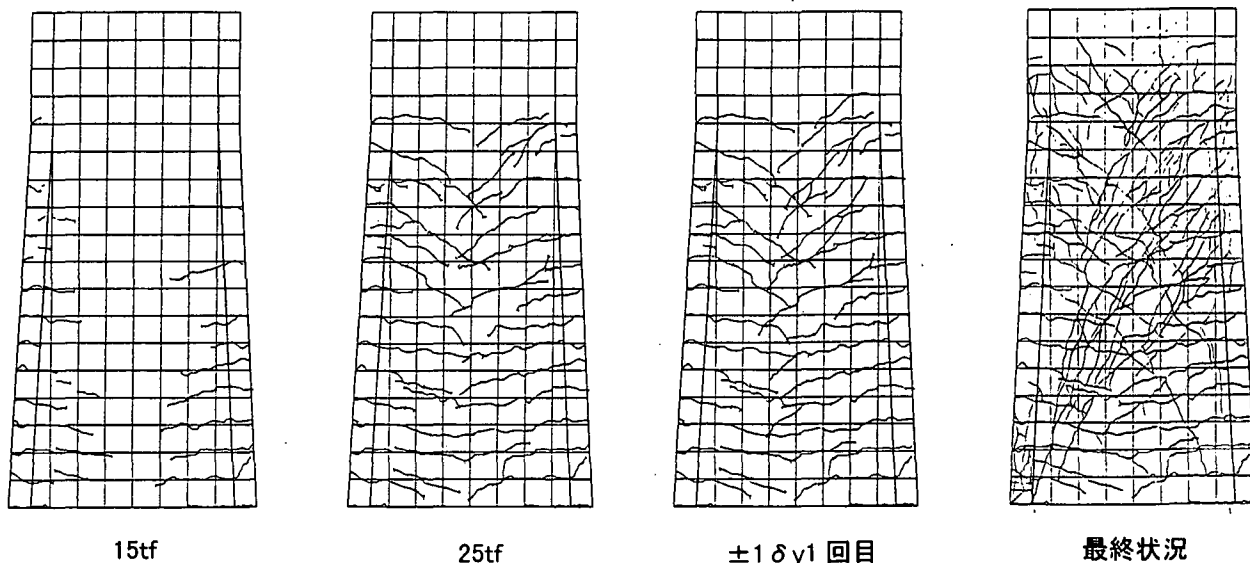


図-8 ひび割れ状況 (1マス=10cm)

は生じなかった。 $+6\delta y$ 1回目で荷重が最大となり、48.7tfであった。荷重はその後変形が進むに連れてなだらかに低下していったが、 $+10\delta y$ でも43.6tfで降伏荷重よりもかなり大きな値を示していた。この時点で最外縁の軸方向鉄筋は、ひずみ計測点（柱基部から20、500、850mmの高さ）全てで降伏していた。 $10\delta y$ 以降は、変形性能の限界のみを知る目的で、 $2\delta y$ ピッチで繰り返し無しで加力を行った。 $+12\delta y$ で柱基部から500mm付近の圧縮側の側方鉄筋の座屈が始まり、 $-16\delta y$ の加力途中で、柱基部から500mmの位置のアラミド繊維シートが柱隅角部で3～7cm程度破断した。荷重はまだ降伏荷重を上回っていたが、シートが破断したため加力を終了した。これより、シートで補強することにより、変形性能が無補強試験体の10倍以上に改善された。

補強量が少ない割にじん性がこれほど大幅に改善された理由の1つとして、断面が8角形であるため引張及び圧縮部が半円形に近い形状をしており、アラミド繊維シートによる拘束効果が通常の矩形断面の場合よりも強かったことが原因と考えられる。したがって、本実験で対象としている橋脚は、橋軸方向に対しては、アラミド繊維シート補強によるじん性向上効果が非常に大きいことが確認された。

せん断力を受け持つ面のアラミド繊維シートの計測点でのひずみは、最大でも8000 μ 程度（鉄筋の座屈により破断した箇所を除く）であり、引張試験でのシートの破断ひずみ（23000 μ ）の1/3程度で、かなりの余裕があった。

また、実験終了後にシートを剥がして内部のコンクリートを観察した結果、写真-1に示す通り、ひび割れは多数入っているものの、せん断破壊につながる大きな斜めひび割れは生じていなかった。

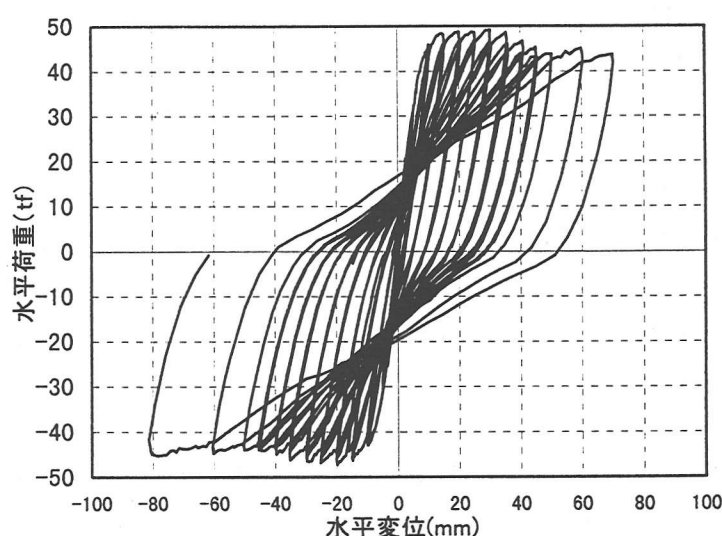


図-9 補強試験体の荷重－変位関係



写真-1 シート除去後の内部コンクリートの状況

3. 設計

実橋におけるアラミド繊維シート補強量は、実験結果を踏まえて算定した。

補強試験体の耐力は、道路橋指針²⁾に従い計算すると、柱基部での曲げ終局耐力 (P_u) が 39.7tf、せん断耐力 (P_s) は柱基部で 67.9tf、梁下端部で 56.3tf となっている。せん断余裕度 (P_s/P_u) を計算すると、せん断耐力の小さい梁下端部では 1.42 となる。

実験結果を見ると、先述の通り、 $-16\delta y$ でアラミド繊維シートが隅角部でわずかに破断したため加力を終了したが、せん断を受け持つ面のアラミド繊維シートのひずみは破断ひずみに対してまだ十分余裕があり、内部コンクリートにも大きな斜めひび割れは生じていなかったことから、せん断補強としては今回の補強量はかなり余裕があったと考えられる。

したがって、せん断耐力が最も小さい梁下端部において、せん断余裕度が 1.42 以上となるような補強を柱全面に対して行えば、段落しを有する橋脚においてもせん断とじん性に対して十分な補強効果が得られることが確認された。

この結果から、実橋における補強量は、道路橋指針²⁾に従い、せん断耐力が最も小さい梁下端部においてせん断余裕度が 1.42 以上となるように算定し、柱基部から梁下端部まで均一に巻きつけた (図-10)。また、無補強試験体で確認されているように、曲げひび割れが発生しせん断ひび割れへと進展することから、曲げひび割れを低減させるために縦方向には 60tf/m 級シートを 1 層貼り付けることとした。

4. 施工

4. 1 施工手順

施工は、まずコンクリートの表面処理を行った後、アラミド繊維シートとコンクリートの接着性を向上させるためにプライマーを塗布した。次にプライマーが指触乾燥していることを確認し、エポキシ樹脂を塗布し繊維方向に気泡を除去しながらシートを貼り付けた。シートはまず縦方向に 1 層貼り付けた後、横方向のシートを貼り付けた。仕上げ工としては、今回は表面の保護、耐紫外線性・耐候性・美観の向上を目的として、特殊エポキシポリマーセメントを下塗り後、柔軟型ポリウレタン塗料を 2 層塗布した。施工時及び施工終了後の状況を写真 2～6 に示す。

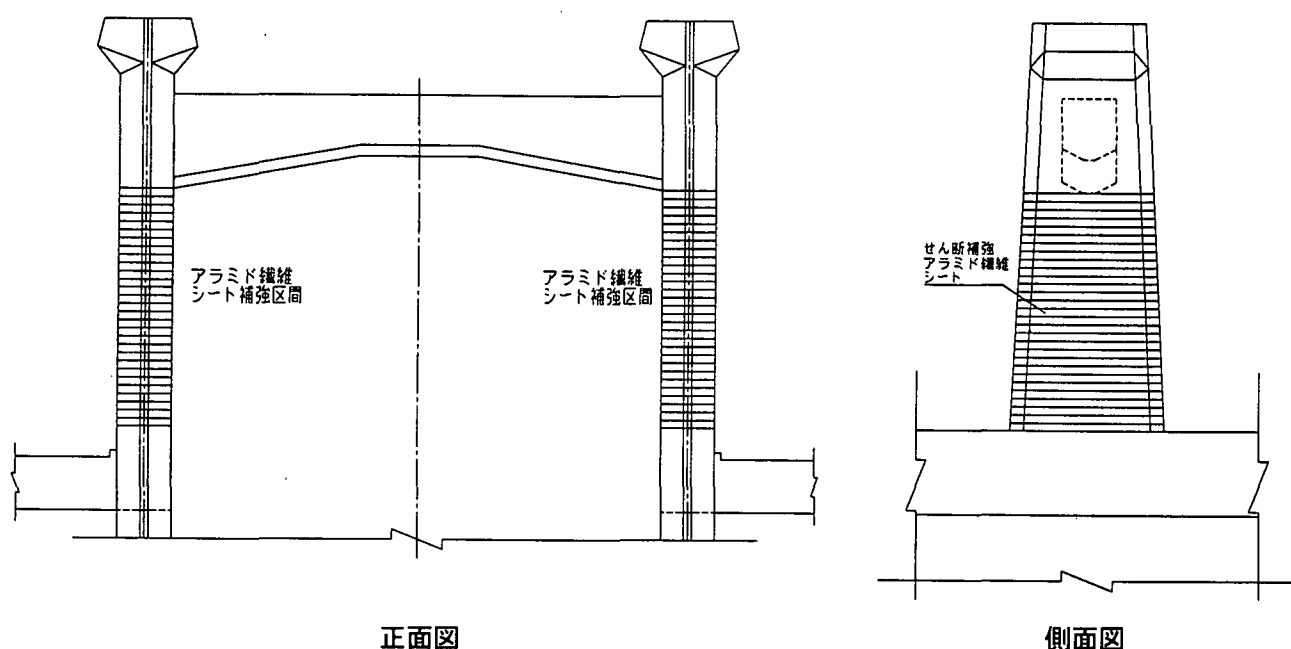


図-10 アラミド繊維シート補強区間

4. 2 アラミド繊維シート補強工法の利点

アラミド繊維シートを用いた今回の施工において、その施工上の利点について以下に述べる。

今回対象とした橋脚は変形8角形断面であり、柔軟な繊維を用いた巻き立て施工として、その利点を十分発揮できる橋脚であった。鋼鉄巻き立て工法による施工であったなら、工場加工時に複雑な加工を要するため、かなりの時間を費やしたと思われる。また、現地には広い作業スペースがなかったため、施工にも手間取ったと思われる。

施工性の利点として鋼鉄巻き立て工法と比べると、

- (1) 材料は人力にて運搬可能であり、クレーン等の重機が不要である。
- (2) 作業スペースは、対象橋脚周りにわずかなスペースがあるだけで十分である。
- (3) 施工速度も、シートを貼り付けるだけで、工場での加工などの工期を考えなくてもよいので速い。
- (4) 補強後の断面増加、重量増加が無視できる程度である。
- (5) 作業が簡単で工種も少ないため、特殊な技術を必要としない。

また、炭素繊維シートと比較しても、

- (1) 圧縮力やせん断力に対しても強く、繊維自体が柔軟であるため、今回のような折れ曲がり箇所が多数有る上、断面寸法が変化している特殊形状の断面に貼り付ける場合は特に有効である。
- (2) 電気絶縁性があるため、周囲の電気設備に対する感電・ショート事故の可能性がない。
- (3) シートが織物状であるため、樹脂の浸透性が良く、気泡が出来にくい。

などが挙げられる。



写真-2 コンクリートの表面処理



写真-3 エポキシ樹脂塗布



写真-4 アラミド繊維シート貼付



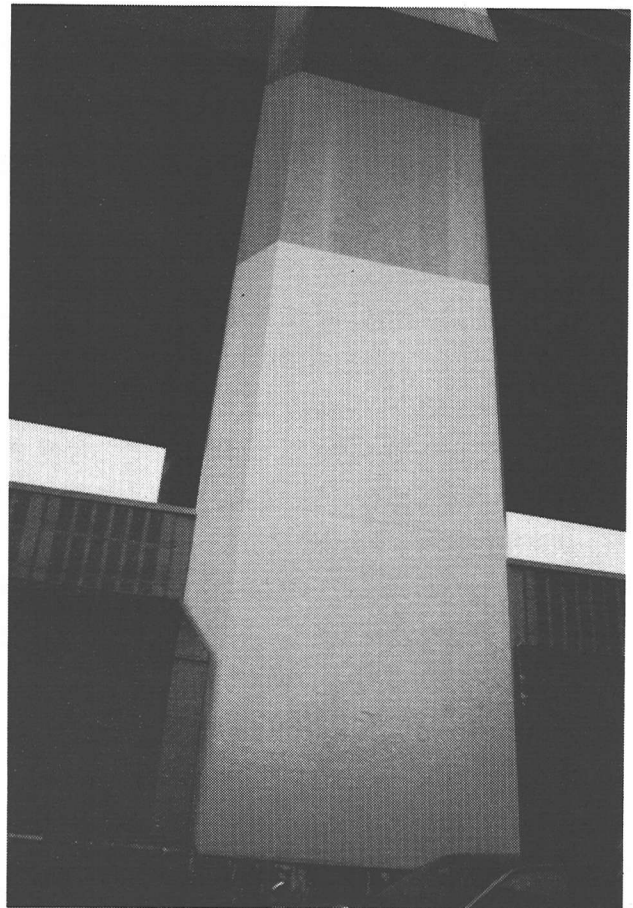
写真-5 仕上材（塗料）塗布

5. まとめ

以上、特殊な形状の橋脚の耐震補強にアラミド繊維シート補強工法を適用した例を報告した。縮小模型試験体を用いた補強効果確認実験を実施することにより、アラミド繊維シートによる補強が施工性も良く、効果的にせん断及びじん性を向上させることができることを確認した上で、実橋の補強設計及び施工を行った。

今回、アラミド繊維シート補強工法を採用したことにより、作業スペースなどの施工における様々な制限をクリアーし、短期間で工事を終えることができた。

本工法は、アラミド繊維が柔軟性や電気絶縁性などの性質を持っていることから、特殊な形状の橋脚や周囲に電気設備がある構造物の耐震補強に対して非常に有効であることが確認された。今後、その優れた施工性・経済性・強度バランスや工期が短縮できるなどから、これからの耐震補強に大きな飛躍を遂げる工法になると考えられる。



写真－6 施工完了

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合研究所：「アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針」、1996. 11
- 2) 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）」、1997. 8
- 3) (社) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料（案）、1995. 6