

V-35 アラミドテープによるRC橋脚の補強設計に関する一提案

三井建設(株) 正員 三上 浩
 開発土木研究所 正員 佐藤 昌志
 ドービー建設工業 正員 竹本 伸一
 室蘭工業大学 正員 松岡 健一

1. はじめに

平成7年1月に発生した阪神・淡路大地震はコンクリート構造物の耐震設計法や施工法などに多くの配慮すべき点があることを指摘したように思われる。鉄道や道路橋脚のうち、旧基準で設計、施工されたものは現在までにその多くのものが補強されている。しかし、社会資本は膨大な量であり、1~2年の短期間で全てを補強することは困難である。従来まで、橋脚の補強工法として用いられてきた鉄板巻き付け工法は施工が複雑であり、工期が長く、コストも決して安価ではない。耐震補強は、十分な効果が発揮できる様に十分な配慮のもとで行わなければならないのはもちろんのことであるが、ある程度の範囲の性能のものでいち早く補強を完了させることも同時に極めて重要であると考えられる。

著者らは、簡便で効率の良い橋脚の耐震補強工法として、高強度かつ高い弾性伸び率を有し、しなやかなアラミド繊維製のテープを橋脚に巻き付けたり張り付けて補強する工法を提案し、現在補強効果に関する検討を実験研究を中心に行っている。本文は、一連の実験結果を基にアラミドテープで橋脚を補強する際の設計法について、一つの提案を行ったものである。

2. アラミドテープの特性

橋脚の耐震補強工法に要求される項目には以下のものが挙げられる。①施工が簡便である。②補強効果に優れている。③安価である。④耐久性に優れている。⑤設計基準が作成済みである。(設計が可能である。)上記項目にアラミドテープ補強工法を当てはめると②, ③, ⑤についていくつかの問題点がある。②については現在研究中であり, ③については、材料費は高いものの施工条件(工期, 省力化等)を反映すれば必ずしも高価ではない。⑤については、多くの調査, 研究によって検証する必要がある, 比較的長期間必要である。そのため、設計基準を作成できるような裏付けのデータを早急に収集する必要がある。

アラミドテープは鋼材に比べて引張強度が高く、かつ樹脂を含ませることでコンクリートとの十分な付着が期待できる。また、炭素テープの様に脆さがないので、角柱のコーナー部での強度低下が少ない。これは、面取りを最小限にできるため①の施工性を考慮すると極めて重要な点である。現在使用されているアラミドテープの繊維の特性を表-1に示す。

表-1 アラミドテープの特性

繊維名	テープの厚さ(mm)	弾性係数(kgf/mm ²)	引張強度(kgf/cm ²)	弾性伸び率(%)
アラミド繊維	0.306	11,100	29,000	2.4

3. 補強設計の考え方

従来の橋脚は主筋量を橋脚高さの途中で減少させるいわゆる段落としが行われていることが多い。段落とし自体は合理的な設計、施工を考える時には有効な方法であり、問題は段落とし部分の鉄筋の定着長に関する配慮が十分ではなかったことに起因すると考えられる。本文では、主として段落としを行った橋脚をアラミドテープによって補強する際の設計法について一つの提案を行ったものである。

3.1 段落とし部分のせん断に対する設計

アラミドテープによるせん断補強効果は、既往の研究結果 [1] を基に以下の様に定式化できる。

$$V_{SD} = \{ A_W \cdot f_F \cdot \gamma \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) / S \} \cdot Z \quad \dots \text{式 (1)}$$

ここに、 V_{SD} : アラミドテープ巻き付けによるせん断耐力の増分 (kgf) γ : 低減係数 (0.46)
 A_W : アラミドテープの断面積 (cm²) α : 巻き付け方向と部材軸のなす角度
 f_F : アラミドテープの設計引張強度 (kgf/cm²) S : アラミドテープの巻き付け間隔 (cm)
 $(29,000 \times \frac{2}{3} \div 19,000)$ Z : 柱高さの 1/1.15 (cm)

上記の式 (1) は、25 × 25 cm の側方筋のない柱モデルでの実験結果を基に求めた式であり、著者らはさらに寸法を大きくした 40 × 40 cm の試験体、あるいは断面寸法比が 1:2 の 33 × 66 cm、2:1 の 48 × 24 cm の断面を有する橋脚模型について水平単調載荷試験を行って上式の妥当性を検討した。その結果、(1) 式はより寸法の大きな試験体、寸法比が 1:2 や 2:1 の試験体についても十分適用できることが分かった。実験に用いた代表的な試験体の形状寸法及び実験結果の一例を図-1、2 に示す。なお、図-2 中の N は無補強、A - 以後はテープの幅と巻き付け間隔(単位: mm) を示す。本実験では、図-1 に示す様に側方筋が配置されているため既往の研究 [1] の様に側方筋のない状態でのせん断耐力を明確に決定できない。そこで、荷重-変形曲線の変曲点を基にせん断耐力の増分を求めた。このようにして求めた V_{SD} の実測値と計算値の関係を図-3 に示す。図-3 より、(1) 式は十分な精度でせん断耐力の増分を評価できると考えられる。

また、著者らの行った横方向衝撃載荷試験では静的には曲げ破壊が先行する試験体でもせん断破壊を示したことから、実際の橋脚もせん断耐力の安全率が曲げ耐力の安全率を大幅に上回らないと曲げ破壊が先行しないものと考えられる。

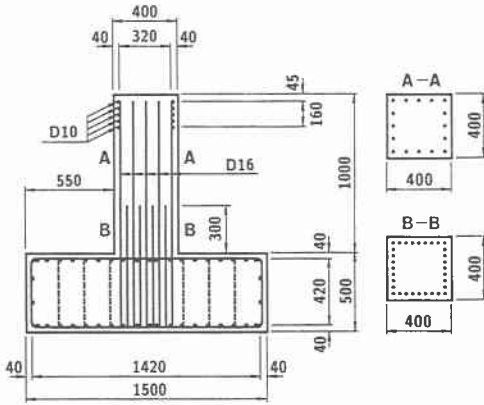


図-1 試験体の形状寸法

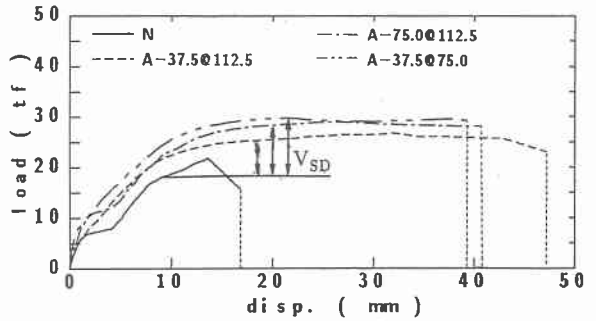


図-2 水平単調載荷試験結果

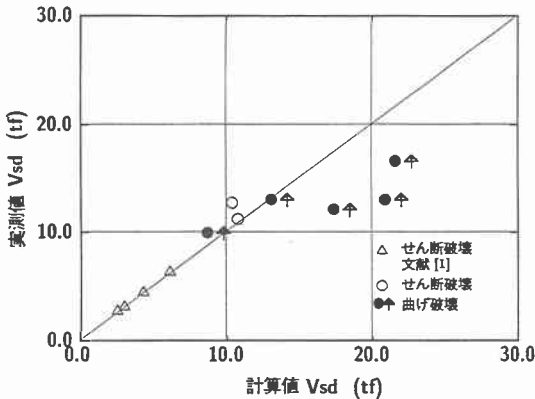


図-3 計算値と実測値の V_{SD} の関係

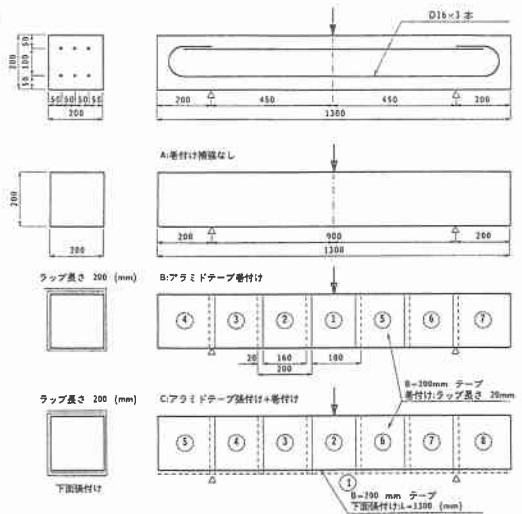


図-4 アラミドテープ巻き付け、張り付け試験体

従って、耐力評価と同時に吸収エネルギーの大小で補強効果を評価すべきとも考えられる。すなわち、図-2の荷重-変形曲線を積分して得られる吸収エネルギーは無補強で2,430 kgfcm程度、アラミド補強では10,000 kgfcm以上であり、少なくとも4倍以上のエネルギー吸収性能があると判断される。

3.2 段落とし部分の曲げに対する設計

段落とし部分でアラミドテープ巻き付けによってせん断破壊が抑制されても、段落とし部分の曲げで破壊する場合も想定される。角柱へのアラミドテープ巻き付けによる拘束効果は、著者らの研究から最大応力の増加よりもむしろ応力が下降する直前のひずみを向上させる効果に優れているため、曲げ耐力を向上させるためには、アラミドテープを橋脚の高さ方向に張り付ける必要がある。

アラミドテープ張り付けによる曲げ耐力の増加に関しては、既存の研究 [2] より、アラミドテープの定着が十分に確保されるならば断面分割法によって計算される曲げ耐力の向上が期待できることが分かっている。ここで問題なのは、橋脚高さ方向に張り付けたアラミドテープの定着をいかに確保するかである。この定着方法として、アラミドテープを張り付けた上からテープを軸直角方向に巻き付ける方法が考えられる。

図-4, 5はアラミドテープの張り付けと巻き付けを併用した場合の梁の荷重-変位関係を求めるための試験体の概要と実験結果を示したものである。図-5から、アラミドテープの巻き付けによって張り付けたテープの定着が確保されて曲げ耐力が向上し、かつ、巻き付けによるせん断補強効果も同時に期待できることが分かる。

3.3 橋脚のじん性能の向上

著者らが行った断面40×40cmで段落としを有する橋脚の水平交番加力試験から、アラミドテープの巻き付けのみで段落とし部のじん性を無補強の場合で塑性率3程度のものを5程度までに向上できることが分かった。水平交番加力試験の試験体の概要および実験結果の一例を図-6, 7, 8に示す。図-7は無補強の試験体、図-8は37.5mm幅の

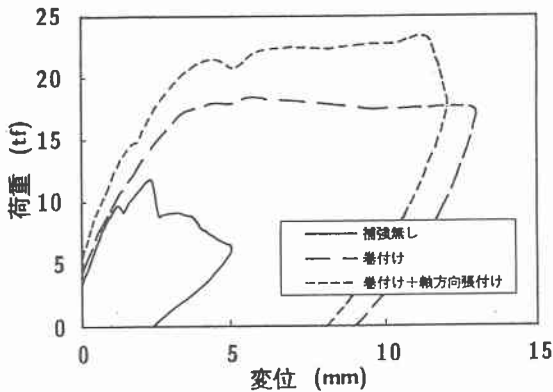


図-5 アラミドテープ巻き付け、張り付け実験結果

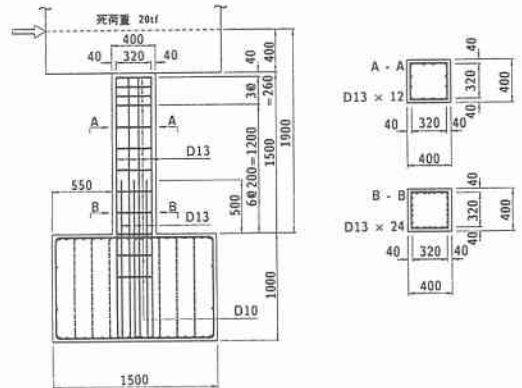


図-6 水平交番加力実験の試験体概要

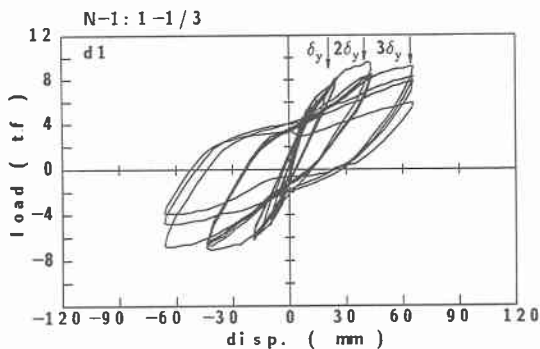


図-7 無補強試験体の実験結果

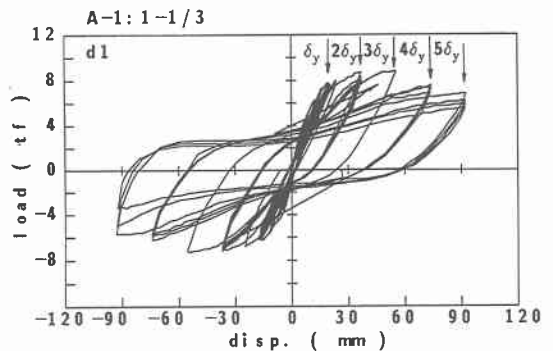


図-8 アラミドテープ巻き付け試験体の実験結果

アラミドテープを間隔 75 mm で 2 層巻き付けた試験体の結果である。このじん性の向上は主としてアラミドテープ巻き付けによるせん断補強効果と拘束効果に起因すると考えられるが、著者らの拘束試験の結果から、アラミドテープを角柱に巻き付けた際には主として高応力レベルでの終局ひずみが顕著に増大している。30 × 30 cm で高さが 100cm の角柱試験体に 37.5 mm 幅のアラミドテープを間隔 75 mm で 1 層または 2 層巻き付けた試験体ならびに全面を巻き付けた試験体の柱中央での軸圧縮ひずみを図-9 に示す。

従って、図-9 に示すコンクリートの応力-ひずみ関係を参考にして、断面分割法によってアラミドテープ巻き付けによる横拘束効果を反映した橋脚の荷重-変形関係を求めることができる。ただし、図-9 に示すひずみは、コンクリート表面に張り付けたひずみゲージによる軸圧縮ひずみであり、荷重-変形曲線を基にひずみに変換したものではない。そのため、応力下降域でのひずみが発現していないが、今後は荷重-変形曲線を基に応力下降域でのひずみ特性を求め、設計に使用できるコンクリートの応力-ひずみ関係を定める必要がある。一方で、本モデルを用いて断面分割法によって計算を行い、梁模型での実験結果と比較検討し、本モデルの適用性を照査する必要がある。

3.4 橋脚の動的安全性の向上

平成 7 年 1 月に発生した阪神・淡路大震災は今までの直下型地震と異なり、衝撃的作用荷重が顕著であったとの指摘もある。そこで、アラミドテープで補強した橋脚模型の横衝撃載荷実験を行った。実験に用いた試験体の形状寸法及び配筋は図-6 と同様である。図-10 に実験の概要、図-11 に各載荷速度における応答変位分布と $V = 3 \text{ m/sec}$ 載荷後の残留変位分布、図-12 にひびわれ図を示す。なお、実験は橋脚模型に 20 tf の重りを設置し、その重心に重さ 5

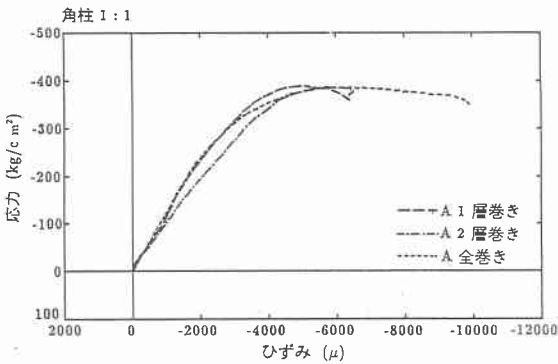


図-9 横拘束効果による応力-ひずみ関係

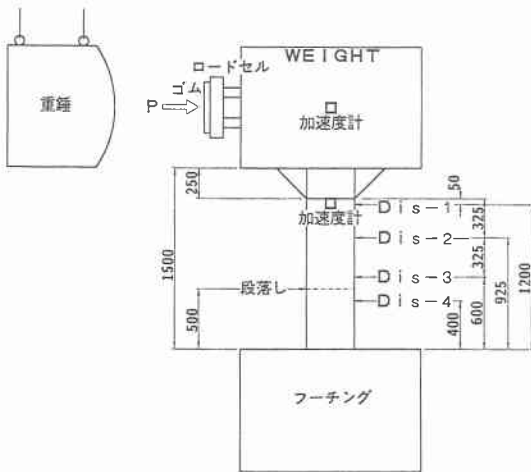


図-10 横衝撃載荷実験の概要

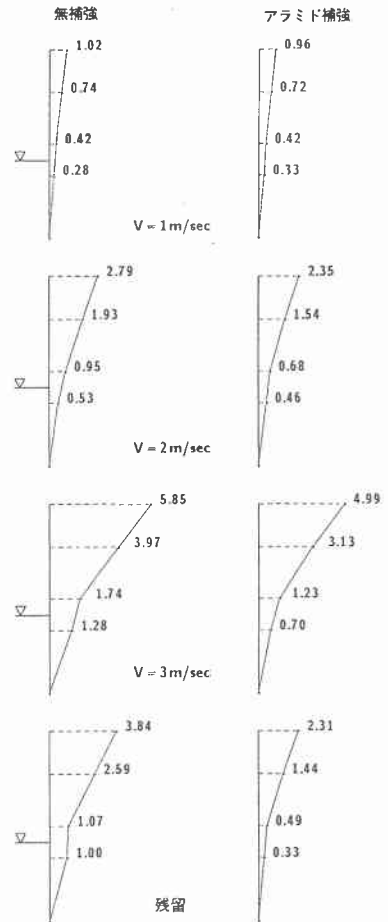


図-11 各載荷速度における応答変位分布

tf の重錘を振り子式で作用させている。図-11 より、アラミドテープで補強した試験体の応答変位分布や残留変位分布から、段落とし部分にせん断変形をほとんど含まないことが分かる。

図-12 より、無補強では明確なせん断破壊を示したが、37.5 mm 幅のアラミドテープを間隔 75 mm で 2 層巻き付けした試験体の損傷は極めて軽微であることが分かる。これより、アラミドテープ補強は衝撃的荷重作用に対しても高い安全性を有していることが分かる。

3.5 橋脚基部の補強設計

段落とし部分の曲げ破壊及びせん断破壊がアラミドテープの巻き付け及び張り付けによって抑制されると、異常時の作用荷重に対してモーメントが最も大きい橋脚基部の曲げで破壊することが考えられる。橋脚基部の曲げ破壊をできるだけ抑制し、じん性を高めるには基部をテープで巻き付けることが有効であると考えられる。ただし、基部の曲げ破壊モーメントを向上させると、補強後の段落とし部分で再度曲げやせん断破壊を起こしやすくなるため注意が必要である。また、アラミドテープ張り付けによる基部の曲げ耐力の向上は、アラミドテープのフーチングへの完全な定着が困難であることから、他の工法を採用した方が合理的と考えられる。図-13 に補強前後における作用せん断力とせん断耐力及び作用曲げモーメントと曲げ耐力の関係を模式的に示す。なお、アラミドテープを間隔を設けずに全面に巻き付ける場合は、曲げひびわれの発生や進展を抑え、全体的に剛な橋脚となるためエネルギーの吸収性能が悪くなると考えられる。そこで、実験結果を参考として段落とし上下 1B (B:試験体の幅) の範囲を補強することにする。

この際、せん断耐力については曲げ耐力よりもかなり大きな安全率が得られる様に補強する必要がある。これによって、異常な荷重が補強後の橋脚に作用しても基部の曲げ破壊が先行することになる。これは基部で塑性ヒンジが構築され大きなエネルギーを吸収する好ましい破壊形式と思われる。じん性をさらに向上させることでより安全な構造物が構築できるが、そのために基部コンクリート部分にアラミドテープを巻き付けて圧縮じん性を向上させることが考えられる。なお、この場合の設計には、図-9 をさらに精度良く拡張したコンクリートの応力-ひずみ関係を用いる。すなわち、理想的な補強方法の概念としては、図-14 のような補強方法が考えられる。

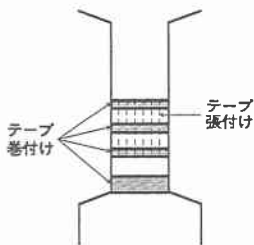


図-14 理想的な補強方法の概念

- ・段落とし部
アラミドテープ張り付け → 曲げ抵抗の増大
- ・段落とし部
アラミドテープ巻き付けによる張り付けテープの定着及び巻き付けによる圧縮じん性の向上ならびにせん断耐力の増強
- ・柱基部
アラミドテープ巻き付けによる圧縮じん性の向上

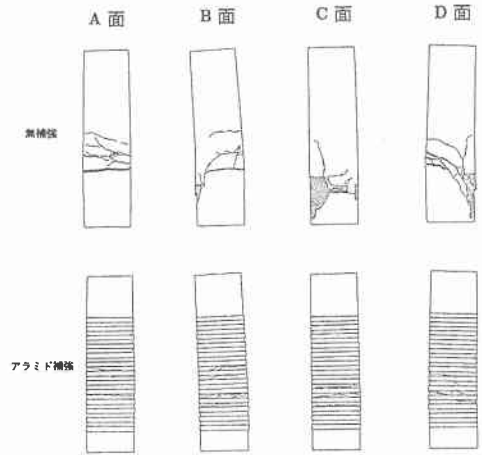


図-12 ひびわれ図

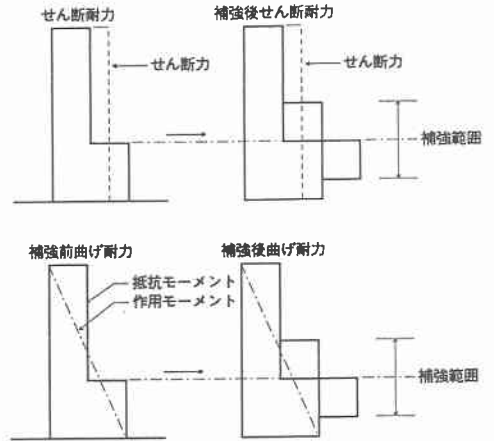


図-13 作用力と耐力の関係

4. まとめ

アラミドテープによる RC 橋脚の補強設計について、実験結果を基に一つの提案を行った。本工法は施工が簡便で比較的高い補強効果を示すものと思われ、今後より詳細な実験及び理論研究を実施して、設計方法の細部についても検討したいと考えている。なお、本研究を行なうに当たり開発土木研究所の構造研究室の皆さん、室蘭工業大学の岸徳光助教授をはじめ構造力学研究室の皆さんに多大なるご支援を頂きました。また、橋脚模型の補強に関する施工を実施して頂いたショーボンド建設（株）の関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 浅倉晃, 岡本直, 谷垣正治, 小田稔: 高強度繊維巻付けによる既存 RC 柱のせん断補強, 日本コンクリート工学協会年次論文報告集, vol.16, No.1, pp1061-1066, 1994.
- [2] 横山達也, 永坂具也: 連続繊維テープによるコンクリート梁の外部曲げ補強効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) No.23249, pp587-588, 1995.