

AFRPシートを用いた壁式RC橋脚の耐震補強工法の提案

畑山 朗¹・池田 憲二¹・今野 久志²

¹正会員 北海道開発土木研究所 構造研究室（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目）

²正会員 博士（工学） 北海道開発土木研究所 構造研究室（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目）

1. はじめに

近年、RC橋脚の耐震補強手法として、補強後の断面増加が極めて小さいアラミド繊維強化プラスチックシート（以下AFRPシート）巻立て工法に関する研究が各研究機関で行われている¹⁾が、縦横比の大きな壁式RC橋脚を対象とした実験・研究例は少ないのが現状である。

著者らは、壁式RC橋脚に対してAFRPシートを用いる場合の耐震補強工法を確立することを目的として、これまでに一柱独立形式の壁式RC橋脚を想定した試験体を用いた正負交番載荷実験及び動的載荷実験を数多く実施してきた。

本報告は、これら筆者らの一連の研究成果をとりまとめ、AFRPシートによる壁式RC橋脚の耐震補強に関する設計手法や構造細目を提案するものである。

2. 補強概要

(1) 補強材料の特性

AFRPシートは、高弾性率型のアラミド1と高強度型のアラミド2の2種類が代表的であり、引張保証耐力が40～120t/mのシートの性能は実験等により確認されている²⁾ことから、設計には以下に示す2種類のAFRPシートの材料特性を用いることとした。

引張強度と引張弾性率は、アラミド1が2100N/mm²と1.2×10⁵N/mm²、アラミド2が2400N/mm²と0.8×10⁵N/mm²、設計用引張強度は上記強度の0.6倍とした。

また、段落し部曲げ補強に用いる場合、AFRPシートの許容ひずみを1.0%、AFRPシートとコンクリート部材との設計用付着強度は、0.45N/mm²と規定した。

(2) 補強の種類

AFRPシートを用いたRC橋脚の耐震補強工法は、以下の3種類に大別される。また、各工法の併用も可能である。

補強概要図を図-1に示す。

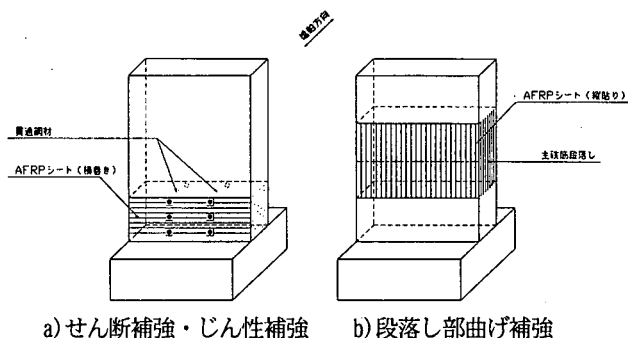


図-1 補強概要図

a) 段落し部曲げ補強

軸方向鉄筋段落し部の部材軸方向にAFRPシートを貼り付けることにより、段落し部の曲げ耐力を向上させる補強方法。

b) せん断補強

部材軸直角方向にAFRPシートを貼り付けることにより、せん断補強筋を増設することと同等の効果を付与し、せん断耐力を向上させる補強方法。

c) じん性補強

橋脚基部の塑性ヒンジ部周辺の部材軸直角方向に貼り付けたAFRPシートにより、コンクリートを拘束し、変形性能を向上させる補強方法。

なお、辺長比1:1.5以上の壁式橋脚にせん断及びじん性補強を施す場合、断面長辺部のAFRPシートのはらみ出しを防止し拘束効果を向上させるため、貫通鉄筋を配置することとした。²⁾

3. 段落し部曲げ補強

(1) 段落し部の曲げ補強設計

既設橋脚の耐震性能照査において、損傷断面が段落し部先行の損傷と判定された場合、段落し部の曲げ補強により、損傷部位を確実に基部に移行させなければならない。

既往の実験では、既設橋脚の耐震補強法の考え方⁴⁾に準拠し、補強後の段落し部耐力が、橋脚基部初降伏時の段落し部に作用する曲げモーメントの1.2倍以上確保すれば、段落し部の損傷を抑制し、損傷部位が橋

脚基部へ移行することが確認されている。⁵⁾⁶⁾

しかしながら、段落し部曲げ補強に加え橋脚基部じん性補強を併用した場合、橋脚基部の部材降伏以降、AFRP シートの拘束効果により、かぶりコンクリートが剥離しにくくなることから、基部の終局耐力が増加し、基部に塑性ヒンジが形成される過程で段落し部にも損傷が発生する可能性があることが明らかとなった。⁷⁾

そこで、段落し部の曲げ補強設計を以下のように設定した。

a) 段落し部の曲げ補強のみの場合

橋脚基部が初降伏曲げモーメントの1.2 倍に達したときに、実際の段落し位置から主鉄筋の定着長を考慮した段落し位置（以降、照査段落し位置）に作用する曲げモーメントを基準とし、補強前の照査段落し位置の初降伏曲げモーメントとの差分となる不足曲げモーメントを算出する（式1）。

不足曲げモーメントに対する AFRP シート補強量は、（式3）～（式4）によるものとする。

b) 橋脚基部のじん性補強を併用する場合

橋脚基部が終局曲げモーメントの1.1 倍に達したときに、照査段落し位置に作用する曲げモーメントを基準とし、補強前の照査段落し位置の初降伏曲げモーメントとの差分となる不足曲げモーメントを算出する（式2）。

不足曲げモーメントに対する AFRP シート補強量の算定は、（式3）～（式4）によるものとする。

$$\Delta M = 1.2M_{By0} \cdot h_T / h_B - M_{Ty0} \quad (\text{式1})$$

$$\Delta M = 1.1M_{Bu} \cdot h_T / h_B - M_{Ty0} \quad (\text{式2})$$

$$A_{AF} = 1000 \Delta M / (7/8 \cdot \sigma_{AFb} \cdot h) \quad (\text{式3})$$

$$n_p = A_{AF} / (t_{AF} \cdot b_{AF}) \quad (\text{式4})$$

ここに、

M_{By0} : 橋脚躯体の基部断面における初期降伏曲げモーメント (kNm)

h_B : 橋脚躯体の基部断面から上部構造の慣性力の作用位置までの高さ (m)

M_{Ty0} : 橋脚躯体の段落し位置の初期降伏曲げモーメント (kNm)

h_T : 橋脚躯体の段落し位置断面から上部構造の慣性力の作用位置までの高さ (m)

M_{Bu} : 橋脚躯体の基部断面における終局曲げモーメント (kNm)

ΔM : 段落し部の不足曲げモーメント (kNm)

A_{AF} : 必要となる AFRP シートの断面積 (mm²)

σ_{AFb} : AFRP シートの曲げ補強用設計強度 (N/mm²)

$$\sigma_{AFb} = E_{AF} \cdot \varepsilon_{AFb}$$

E_{AF} : AFRP シートの弾性係数

ε_{AFb} : 曲げ補強時の AFRP シートの許容ひずみ (1.0%)

h : 部材断面高さ (m)

n_p : AFRP シートの必要積層数

t_{AF} : AFRP シートの厚さ (mm)

b_{AF} : AFRP シートの貼り付け幅 (m)

(2) 補強範囲

既往の実験では、終局時の段落しの損傷が照査段落し位置ではなく、実際の段落し位置で生じていることから、補強範囲を設定する場合の基準点は実際の段落し位置とした。⁵⁾⁶⁾

補強範囲は、実際の段落し位置から、上側および下側にそれぞれ（式5）で算出した定着長 L_{AFn} を確保することとした。

但し、上側の範囲は、上記で算出した位置と、不足曲げモーメントが0 となる位置から L_{AF1} を加えた位置を比較し、高い位置までを確保することとした。（図-2）

$$L_{AFn} = \sigma_{AFb} \cdot n \cdot t_{AF} / \tau_{AF} \quad (\text{式5})$$

L_{AFn} : n 層積層した場合、必要となる AFRP シートの長さ (cm)

t_{AF} : AFRP シートの厚さ (cm)

τ_{AF} : 曲げ補強に用いる AFRP シートの設計用付着強度 (N/mm²)

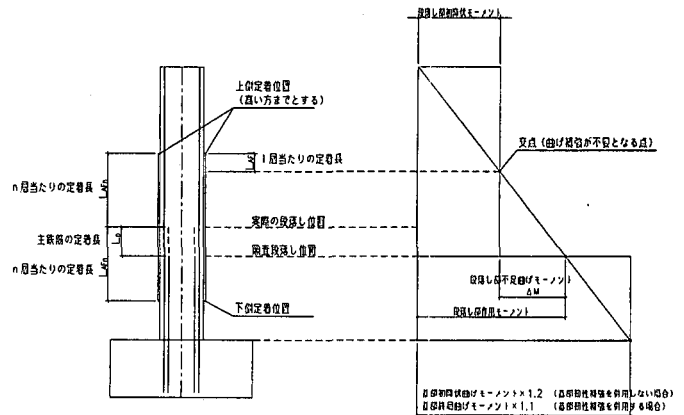


図-2 段落し部曲げ補強定着範囲

4. じん性補強

(1) じん性補強設計

既設橋脚の許容塑性率が耐震設計上必要とする塑性率より小さい場合は、じん性能向上のために橋脚基部のじん性補強を行う。

じん性補強を行う場合には、断面長辺部の AFRP シートのはらみ出しを防止し、コンクリートの拘束効果を

発揮させるために、後に示す貫通鉄筋を配置することで、じん性能が向上することが確認されている。^{8) 9)}

じん性補強を行った RC 橋脚の終局水平耐力および終局水平変位は、道路橋示方書 V 編耐震設計編 10.3 とこれまでに提案されている評価方法を適用し¹⁾、コンクリートの応力-ひずみの関係はコンクリートの最大圧縮応力に達する前後で AFRP シートと鉄筋の弾性率換算と強度換算に分離した応力-ひずみ曲線(図-3)から、終局限界は最外縁のコンクリートの終局ひずみから算出することができることとした。

また、AFRP シート補強量の上限值は、既往の実験結果から、既設帯鉄筋と貫通鉄筋の体積比(式 6)と AFRP シートの体積比(式 7)の合計が 0.020 を上回らないこととした。¹⁰⁾

$$\rho_s = 4A_s / (s \cdot d) \quad (\text{式 6})$$

$$\rho_{AF} = 4n p_{tAF} / d_{AF} \quad (\text{式 7})$$

(2) 貫通鋼材の配置

貫通鋼材の水平方向間隔は、図-4 に示すとおり貫通鋼材と AFRP シートによって囲まれるコンクリートの断面が 1:1 程度となるように、高さ方向間隔は、貫通鋼材の引張剛性が AFRP シートの引張剛性以上となるように(式-8)により算出することとした。

$$h = \frac{E_s \cdot A_s}{E_{AF} \cdot t_{AF} \cdot n} \quad (\text{式 8})$$

ここに、

- h : 貫通鋼材の配置高(mm)
- E_s : 貫通鋼材のヤング係数(N/mm²)
- A_s : 貫通鋼材 1 本当たりの断面積(mm²)
- E_{AF} : AFRP シートのヤング係数(N/mm²)
- t_{AF} : AFRP シート厚(mm)
- n : AFRP シート積層数

また、最下段の貫通鉄筋は、塑性ヒンジ部より上方に配置された場合、AFRP シート最下部がはらみ出し、拘束効果が低下することが明らかとなっている⁵⁾ことから、塑性ヒンジ長の 1/2 程度の位置に配置することとした。

5. せん断補強

断面寸法比 1:1.5 以下の RC 橋脚に対する AFRP シートによるせん断補強は、道路橋示方書 V 編 10.5 に示されたせん断補強前のせん断耐力 P_s の算出式と同様に加算則が成立し、 P_s と AFRP シートが負担するせん断

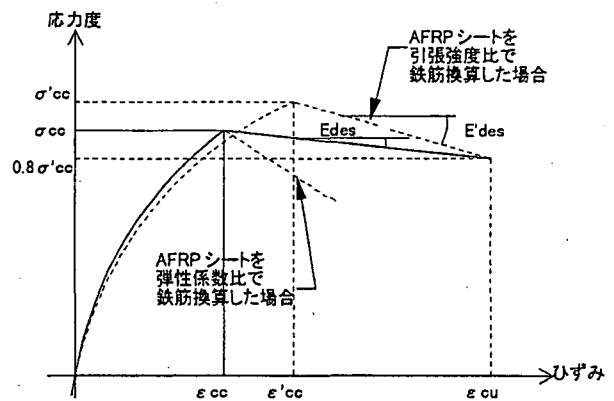


図-3 AFRP シートで拘束されたコンクリートの応力-ひずみ曲線図

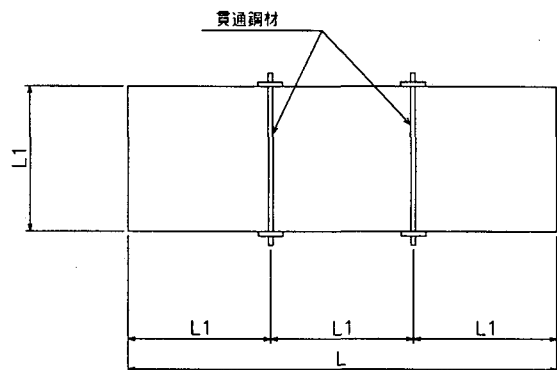


図-4 貫通鋼材配置位置図

耐力との和によって算定できることとなっていた。¹⁾

既往の実験から、断面寸法比 1:1.5 以上の RC 橋脚においても、じん性補強と同様の貫通鋼材を配置することで、(式 9) ~ (式 11) で算出された補強量で十分せん断補強の効果が確保されることが確認された。

$$\Delta P_s = P_u - P_s \quad (\text{式 9})$$

$$A_{AF} = \frac{\Delta P_s \times 1.15}{1000 \times \sigma_{AFd} \times d} \quad (\text{式 10})$$

$$n_p = \frac{A_{AF}}{2 \times t_{AF}} \quad (\text{式 11})$$

ここに、

- ΔP_s : 不足せん断耐力(kN)
- P_u : 設計せん断力(kN)
- P_s : せん断補強前のせん断耐力(kN)
- A_{AF} : 単位幅当たりの AFRP シートの断面積(mm²)
- σ_{AFd} : AFRP シートの設計用引張強度(kN/mm²)
- d : せん断耐力を算定する方向に平行な方向の橋脚断面の有効高(mm)
- n_p : AFRP シートの必要枚数(枚)
- t_{AF} : AFRP シート 1 枚当たりの厚さ(mm)

なお、せん断耐力は全て AFRP シートが負担することとし、せん断耐力の計算では、貫通鋼材は考慮しないものとした。

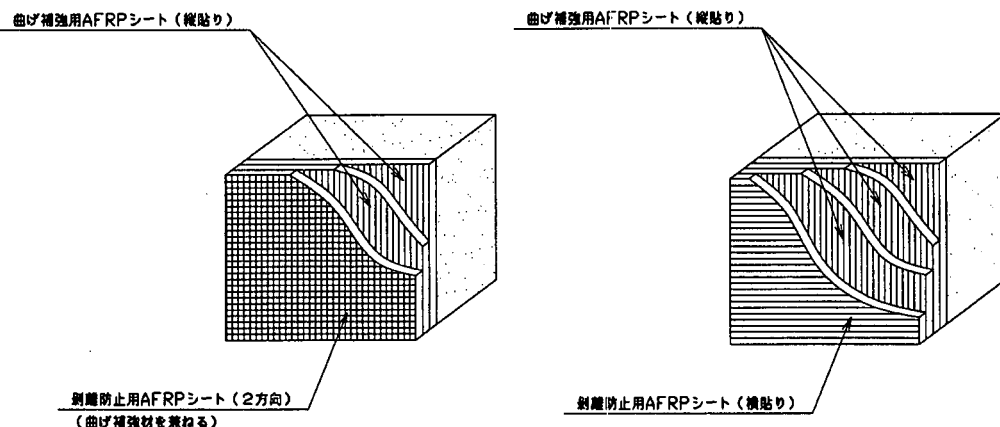


図-5 AFRP シート張りつけ例

6. 構造細目

AFRP シートによる補強工法は、既設橋脚表面と AFRP シートの付着耐久性が工法の信頼性を左右するため、これまでに提案されている構造細目¹⁾に加え、実験結果を基に橋脚表面の処理方法や貫通鋼材定着部の形状などについて、以下に示す構造細目をとりまとめた。

- 1) 橋脚断面の隅角部はディスクサンダー等により突起を取り除く。
- 2) AFRP シートの重ね継ぎ手長は、40tf/m 級と 60tf/m 級の場合は 20cm 以上、90tf/m 級と 120tf/m 級の場合は 25cm 以上確保する。
- 3) 橋脚表面の下地処理は、せん断補強・じん性補強の場合はディスクサンダー仕上げ、段落し部曲げ補強の場合はサンドブラスト処理などの骨材表面が露出する工法による。
- 4) 貫通鋼材の定着部に鋼製座金を用いる場合は面取りを行う。
- 5) 段落し部曲げ補強をおこなう場合には、曲げ補強用 AFRP シートとコンクリートの一体性を強化する目的で、最外縁シートに 2 方向編み込みシート、または横方向シートを貼り付ける（図-5）。この場合の横方向シートは設計計算上考慮しない。

7. おわりに

本報で提案した耐震補強工法は、いくつかの課題点（例えば、基部定着の問題など）は残されているものの、これまでに実施してきた実験結果を精査し、断面寸法比 1:6 までの RC 壁式橋脚に対する耐震補強工法として、十分適用できるものとする。

今年度、「AFRP シートを用いた RC 橋脚の耐震補強設計・施工要領（案）」にとりまとめ、研究成果として国土交通省北海道開発局へ報告したところである。

今後は現場条件に応じた耐震補強工法のひとつとし

て、広く活用が望まれるところである。

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
- 2) 佐藤、三田村、三上、岸：連続繊維により補強した RC 橋脚の荷重-変位に関する実験、土木学会北海道支部論文報告集第 55 号、pp.258-263
- 3) 佐藤、三上、三田村、木下：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、コンクリート工学年次論文集、vol. 21、No. 3、pp.1369-1374、1999
- 4) 日本道路協会：既設道路橋の耐震補強に関する参考資料、1997
- 5) 三田村、池田、長谷川、後藤：壁式橋脚のアラミド繊維シート補強における補強量と補強範囲の検討、土木学会北海道支部論文報告集第 57 号、pp.282-285、2001
- 6) 長谷川、池田、畑山、岸：実規模壁式 RC 橋脚静的実験による AFRP シートを用いた段落し部曲げ補強効果の検証、土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集、I-777、pp.1553-1554、2002
- 7) 畑山、池田、長谷川、岸：AFRP シートによる靱性補強を併用した壁式 RC 橋脚の段落し部曲げ補強効果に関する考察、土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集、I-774、pp.1547-1548、2002
- 8) 池田、畑山、長谷川：長方形断面 RC 橋脚に対する AFRP シート巻立て補強の靱性能向上に関する一考察、第 5 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.211-214、2002
- 9) 畑山、池田、長谷川、岸：AFRP シート巻き付けと貫通鉄筋拘束法を用いた長方形断面 RC 橋脚の靱性補強効果、コンクリート工学年次論文集、vol. 24、No. 2、pp.1267-1272、2002