

論文 側方筋を有する単純支持 RC 梁のアラミド繊維シート 巻付け補強効果

三上 浩*1・岸 徳光*2・佐藤昌志*3・松岡健一*4

要旨：側方筋を有する両端単純支持 RC 梁にアラミド繊維シートを巻付けた場合の補強効果を実験的に検討した。側方筋およびアラミド繊維シートが耐荷性状に与える影響を分離して検討するため、まず、断面形状寸法および側方筋量を変化させた梁を用いて側方筋が耐荷性状に与える影響を検討した。次に、側方筋量を変化させた梁をアラミド繊維シートで巻付け補強し、無補強の梁の耐荷性状と比較することでアラミド繊維シートの巻付け補強効果を検討した。その結果、側方筋は曲げ耐力を向上させるとともにせん断耐力も向上させること、アラミド繊維シート巻付けのせん断補強に関する有効率は 0.6 程度であること等が明らかになった。

キーワード：RC 梁，側方筋，アラミド繊維シート，せん断補強，エネルギー吸収性能

1. はじめに

最近、既存 RC 橋脚などの耐震補強工法として、施工が簡便な FRP シート巻付け工法が採用されるようになった。RC 橋脚には側方筋が配置されており、RC 橋脚を FRP シートで巻付け補強する場合の補強量を適切に設定するためには、側方筋が耐荷性状に与える影響を把握しておく必要がある。特に側方筋によるせん断耐力の向上効果とアラミド繊維シートによるせん断補強効果の加算則が成立するか否かは重要な検討課題であるが、このような観点からの検討例は少ないように思われる。

一方、平成 8 年に制定された道路橋示方書耐震設計編¹⁾（以後、示方書）では、コンクリートが負担するせん断耐力の計算式に荷重の正負交番作用、橋脚断面の有効高さ、軸方向引張鉄筋比の影響が取り入れられるようになった。特に、軸方向引張鉄筋比は断面の図心位置から引張側にある鉄筋の総断面積を用いて算出するため、側方筋の有無はせん断耐力の計算値に大きな影響を与えることとなる。ただし、示方書では鉄筋比が 1.0 % 以上におけるせん断耐力の向上は期待しないこと

としている。

本研究は RC 橋脚などを模擬した側方筋を有する RC 梁にアラミド繊維シート（以後、アラミドシート）を巻付けた場合の補強効果を実験的に検討したものである。側方筋とアラミドシートの補強効果を分離して検討するため、本研究ではまず、側方筋が耐荷性状に与える影響を検討した。特に側方筋が耐荷性状に与える影響は部材の断面形状寸法や側方筋量によって異なると考えられるため、2 種類の断面形状寸法に対して引張鉄筋比 1.0 % 以上の状態で側方筋量を 3 種類に変化させて検討した。ここで、引張鉄筋比を 1.0 % 以上としたのは、既存 RC 橋脚の中には側方筋を考慮すると引張鉄筋比が 1.0 % 以上のものもみられるからである。次に、3 種類の側方筋量のもとでアラミドシートを巻付けた梁と無補強の梁の結果を比較し、アラミドシートのせん断補強効果や側方筋との加算則について検討を行った。

2. 実験の概要

試験体は表-1に示す断面タイプが 2 種類、側方筋本数が 3 種類、アラミドシート補強量が 2

*1 三井建設（株）技術研究所 主任研究員 工博（正会員）

*2 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 工博（正会員）

*3 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室長 工博（正会員）

*4 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博（正会員）

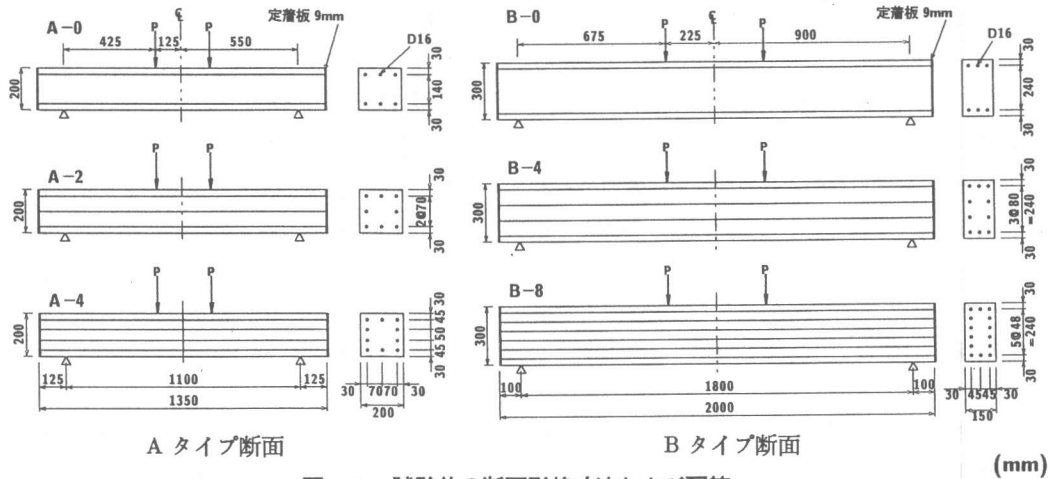
表一 試験体一覧

試験体名	断面タイプ	側方筋本数	引張鉄筋比 ρ_w (%)	アラミド本数	体積補強割合 ρ (%)
A-0	A	0	1.75	-	-
A-2	A	2	2.34	-	-
A-4	A	4	2.92	-	-
B-0-0	B	0	1.47	-	-
B-4-0	B	4	2.45	-	-
B-8-0	B	8	3.43	-	-
B-0-10	B	0	1.47	10	0.10
B-4-10	B	4	2.45	10	0.10
B-8-10	B	8	3.43	10	0.10
B-0-18	B	0	1.47	18	0.20
B-4-18	B	4	2.45	18	0.20
B-8-18	B	8	3.43	18	0.20

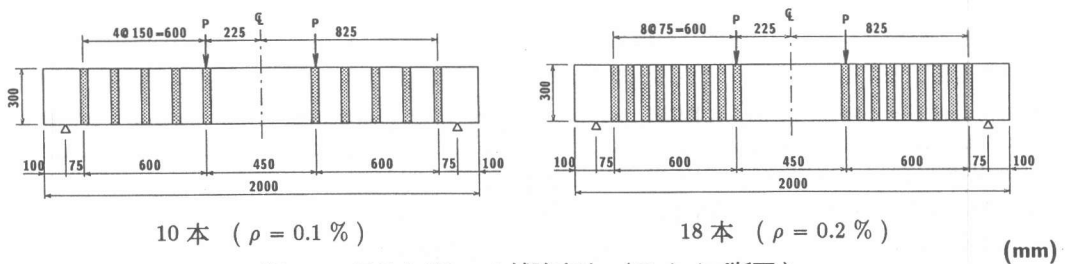
種類の合計 12 体である。試験体名のうち、第 1 項の A, B は断面タイプを示し、第 2 項の 0, 2, 4 または 0, 4, 8 は側方筋の本数、第 3 項の 0, 10,

18 はアラミドシートの巻付け本数を示す。なお、引張鉄筋比は示方書に準拠して、下端主筋の重心位置までを有効高さとし、断面の図心以下の鉄筋の総断面積を用いて算出した。

図一に A, B タイプ試験体の断面形状寸法および配筋を示す。A, B タイプともに a/d (せん断スパン比) は 2.5 とした。また、図二に B タイプ試験体のアラミドシート補強方法を示す。実験に用いたコンクリートは実験時の材齢が 115 日、平均圧縮強度は 30.30 MPa、弾性係数は 23.05 GPa、ポアソン比は 0.22 である。鉄筋は全て D16 (SD345) であり、降伏強度は 379 MPa、引張強度は 557 MPa、弾性係数は 196 GPa であった。また、アラミドシートは幅 3.75 cm で厚さ 0.286 mm、平均引張強度 2.5 GPa に約 3 σ (標準偏差) の安全を考慮した基準引張強度は 2.1 GPa である。なお、計測項目は梁中央の変位および下端鉄筋のひずみである。



図一 試験体の断面形状寸法および配筋



図二 アラミドシート補強方法 (B タイプ断面)

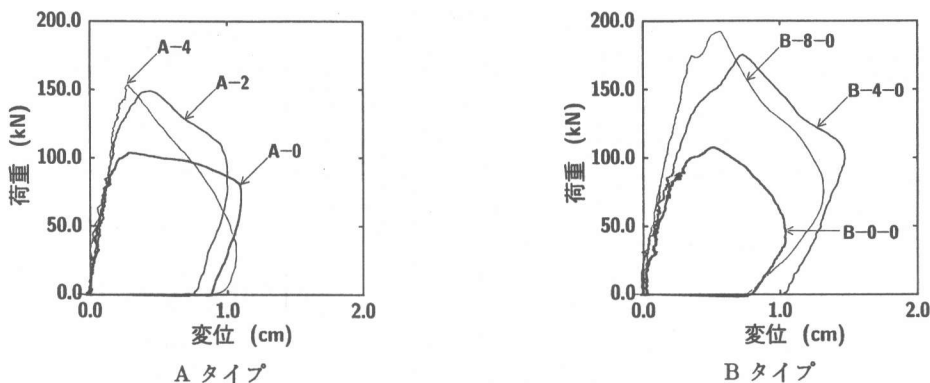


図-3 荷重-変位関係 (アラミドシート補強なし)

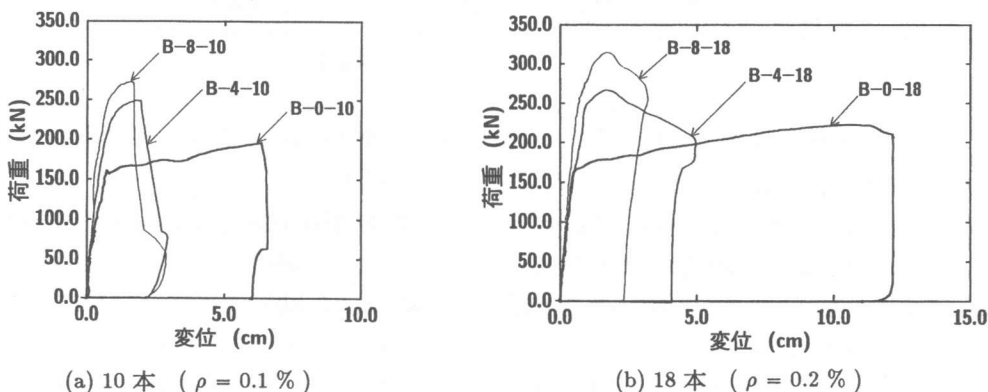


図-4 荷重-変位関係 (アラミドシート補強あり)

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-3にアラミドシート補強をしていない A, B タイプ試験体の荷重-変位関係を示す。いずれも明瞭なせん断破壊を示し、側方筋の本数の増加にともなってせん断耐力が増大している。特に側方筋がない場合と、A タイプで 2 本, B タイプで 4 本配置した場合のせん断耐力差は極めて大きい。さらに側方筋の本数を増やすとせん断耐力は増加するが、その増加量はわずかである。このように、側方筋は、A, B タイプの耐荷性状にほぼ同様な影響を与えている。すなわち、断面形状寸法に関わらず、側方筋はせん断耐荷性状に同様な影響を与えるものと考えられる。

図-4にアラミドシートを 10 本 ($\rho = 0.1\%$), 18 本 ($\rho = 0.2\%$) で補強した B タイプ試験体の荷重-変位関係を示す。(a) の 10 本補強の場合

にはアラミドシート補強していない場合と同様に、最大耐力は側方筋が多い試験体ほど大きい。なお、側方筋のない B-0 梁は主筋降伏後にシートが破断して破壊したため、最大変形量は他の試験体の 2 倍以上となっている。

(b) の 18 本補強の場合も最大耐力は側方筋が多い試験体ほど大きい。側方筋のない B-0 梁では主筋が降伏したため最大変形量は実験装置の制約上の最大変位 12 cm を示し、他の試験体の 2 ~ 4 倍の変形量を示している。

このように同一の体積補強割合でアラミドシート補強した場合でも、側方筋の有無や本数によって荷重-変位関係が大きく異なることに留意する必要がある。これは、側方筋がない場合はアラミドシート補強によってせん断破壊から主筋降伏後の破壊モードに移行しやすいのに対して、側方筋がある場合は曲げ耐力も増加して曲げ破壊しにく

表-2 実験結果の一覧

試験体名	計算曲げ耐力 (kN)	計算せん断耐力 (kN)	実測耐力 (kN)	破壊形式
A-0	165.5	73.4	104.0	せん断破壊
A-2	214.0	80.8	155.0	
A-4	242.4	86.9	160.8	
B-0-0	171.7	76.3	110.8	せん断破壊
B-4-0	257.3	90.4	178.5	
B-8-0	316.9	100.8	192.2	
B-0-10	171.7	159.3	195.2	主筋降伏後せん断破壊 (シート破断)
B-4-10	257.3	173.4	249.1	せん断破壊 (シート破断)
B-8-10	316.9	183.8	271.6	
B-0-18	171.7	242.2	222.6*	破壊に至らず
B-4-18	257.3	256.3	266.7	主筋降伏後コンクリートの圧壊
B-8-18	316.9	266.7	313.8	

* 実験装置の制約変位となったため加力を中止

く、破壊モードが変化しにくいことを示している。

3.2 終局耐力と破壊形式

表-2 に各試験体の計算曲げ耐力と計算せん断耐力および実測耐力と破壊形式の一覧を示す。計算曲げ耐力は、コンクリート標準示方書設計編²⁾ (以後、設計編) の提案モデルにコンクリートの実圧縮強度ならびに前述した鉄筋の力学的特性値を代入して、断面分割法によって算出した。なお、断面の分割は約 5 mm 間隔で行っている。

一方、計算せん断耐力は示方書式では安全側過ぎるため設計編に準拠して算出したが、有効高さおよび引張鉄筋比は示方書の規定に従った。なお、部材係数 $\gamma_b = 1.0$ としている。また、アラミドシートで補強した試験体のせん断耐力は、文献³⁾ に準じてアラミドシートの設計引張強度を基準引張強度 2.1 GPa の 0.6 倍として算出し、設計編によるコンクリートが負担するせん断耐力に加算して求めた。

表から、側方筋のない場合の計算せん断耐力と実測耐力の比は 1.4 倍程度であるが、側方筋がある場合は引張鉄筋比が 1.0 % 以上においても 1.8 ~ 2.0 倍程度と極めて安全側となることが分かる。一方、アラミドシート補強後もせん断破壊を示した試験体では、側方筋がない場合の計算せん断耐力と実測耐力の比は 1.23 倍、側方筋がある場合は 1.4 ~ 1.5 倍程度であり、アラミドシート補強して

いない場合に比べて安全余裕度が低下していることが分かる。

3.3 側方筋の終局耐力とエネルギー吸収性能に与える影響

図-5 に全試験体の終局耐力と側方筋本数の関係を示す。アラミドシートを $\rho = 0.2\%$ で補強した場合は、側方筋本数の増加に対応して終局耐力がほぼ直線的に増加している。その他の場合は、側方筋が配置されることで大幅に終局耐力が増加するものの、側方筋本数を倍増しても耐力の増加はさほど顕著ではない。なお、B タイプの方が A タイプよりも側方筋を配置することによるせん断耐力の増分が大きいのは、B タイプの方が側方筋量が多いためと考えられる。

図-6 に全試験体の吸収エネルギーと側方筋本数の関係を示す。吸収エネルギーは図-3, 4 に示した荷重-変位関係を積分して求めた。この図から、無補強の場合は側方筋を配置することでせん断耐力は増大するものの破壊形式は変わらないため、エネルギー吸収性能には大きな変化がみられないことが分かる。一方、アラミドシートを $\rho = 0.1\%$ で補強することでエネルギー吸収性能は大幅に向上し、その傾向は特に側方筋がない場合に顕著である。また、側方筋本数が増えるに従いアラミドシート補強によるエネルギー吸収性能の増加割合が小さくなっている。これらの傾向は、

$\rho = 0.2\%$ 補強の場合にも同様にみられる。これは、側方筋がない場合はアラミドシート補強によってせん断破壊から曲げ破壊（主筋降伏後のせん断破壊を含む）に移行しやすいためであり、側方筋が多い場合は曲げ破壊に移行しにくく、移行しても圧縮破壊を示しやすいためである。

3.4 アラミドシートの補強効果

図-7にアラミドシートの体積補強割合と終局耐力の関係は側方筋の本数ごとに示す。図より、側方筋の有無や本数に関わらず、アラミド補強することで終局耐力が大幅に向上することが分かる。なお、 $\rho = 0.1\%$ と 0.2% の耐力差が、無補強と 0.1% の差ほど顕著でないのは、 $\rho = 0.2\%$ では

全ての試験体がせん断破壊を示さず曲げ破壊モードに移行したためと考えられる。

図-8にアラミドシートの体積補強割合と吸収エネルギー比率の関係を示す。吸収エネルギー比率とは、補強後の各試験体の吸収エネルギーと無補強の試験体の吸収エネルギーの比を表す。図より、アラミドシート補強による吸収エネルギーの増加割合は側方筋の有無や本数に関わらず体積補強割合とほぼ線形関係にあることが分かる。ただし、側方筋の有無や本数によって吸収エネルギーの増加割合は大きく異なり、側方筋がない場合は最大で30倍程度、側方筋の本数が多い場合は最大で4倍程度である。

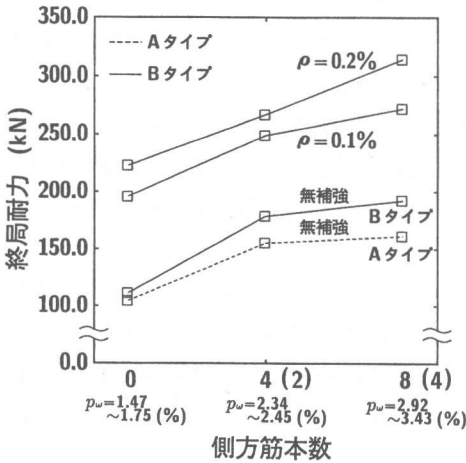


図-5 終局耐力と側方筋本数の関係

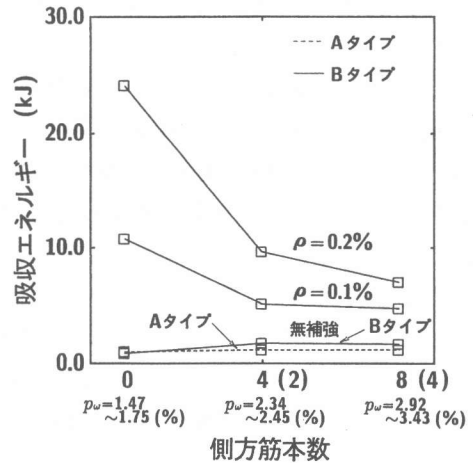


図-6 吸収エネルギーと側方筋本数の関係

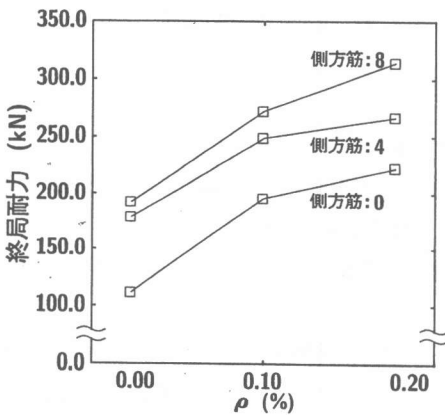


図-7 体積補強割合と終局耐力の関係 (Bタイプ断面)

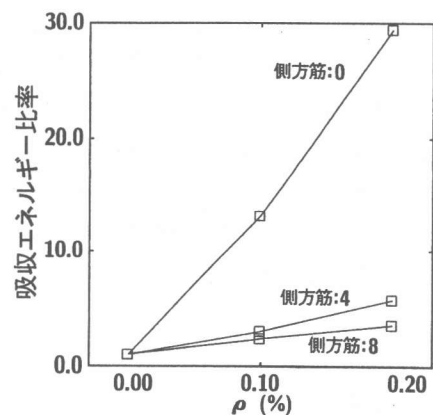


図-8 体積補強割合と吸収エネルギー比率の関係 (Bタイプ断面)

表-3 セン断耐力と耐力の増分

試験体名	せん断耐力 (kN)	耐力の増分 (A) (kN)	耐力の増分 (B) (kN)	耐力の増分差 (kN)
B-0-0	① 110.8	-	-	-
B-4-0	② 178.5	-	⑩ = ②-①, 67.7	-
B-8-0	③ 192.2	-	⑪ = ③-①, 81.4	-
B-0-10	④ 195.2	⑦ = ④-①, 84.4	-	-
B-4-10	⑤ 249.1	⑧ = ⑤-②, 70.6	⑫ = ⑤-④, 53.9	⑭ = ⑩-⑫, 13.8
B-8-10	⑥ 271.6	⑨ = ⑥-③, 79.4	⑬ = ⑥-④, 76.4	⑮ = ⑪-⑬, 5.0

3.5 側方筋とアラミドシートのせん断補強効果

アラミドシート補強後も明瞭なせん断破壊を示した $\rho = 0.1\%$ 試験体と無補強の試験体の比較により、側方筋とアラミドシートのせん断補強効果を定量的に検討する。表-3にせん断耐力と耐力の増分を示した。表中、耐力の増分(A)のうち、⑦は側方筋がない状態でのアラミドシートのせん断補強効果を示す。この耐力増分と既往のせん断耐力式³⁾の関係から、本実験におけるアラミドシートのせん断補強に関する有効率は基準引張強度 2.1 GPa に対して $K = 0.61$ であることが分かる。これは、設計用値 $K = 0.6$ を満足するものの安全率は小さい。理由として、Bタイプ試験体の断面寸法比が 1:2 と縦長であることが考えられる。なお、⑧、⑨のように側方筋がある状態でのアラミドシート補強によるせん断耐力の増分は⑦に比べて小さい。

一方、耐力の増分⑩、⑪はアラミドシート補強していない状態での側方筋のせん断耐力向上効果を示し、⑫、⑬はアラミドシートで補強した状態での側方筋の耐力向上効果を示す。⑩と⑫、⑪と⑬の比較から(⑭と⑮)、側方筋のせん断耐力向上効果は、アラミドシート補強することで 5.0 ~ 13.8 kN 程度低下することが分かる。これは、側方筋のせん断耐力向上効果とアラミドシートのその単純加算則が厳密には成立していないことを示している。

4. まとめ

側方筋を有する両端単純支持 RC 梁にアラミドシートを巻付けた場合の補強効果を実験的に検

討した。特に、側方筋およびアラミド繊維シートの耐荷性状に与える影響を分離できるように考慮して検討を行った。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると以下の通りである。

- (1) 引張鉄筋比が 1.0% 以上でも、正方形、長方形断面など断面形状によらず、側方筋を配置することで RC 梁のせん断耐力は大幅に向上する。
- (2) 側方筋はせん断耐力を向上させると同時に曲げ耐力も向上させる。これは破壊形式やエネルギー吸収性能を論じる場合には特に重要であり留意する必要がある。
- (3) アラミドシートで補強した場合、側方筋のせん断耐力向上効果は若干低下する。すなわち、両者のせん断耐力向上効果の加算則は厳密には成立しない。
- (4) アラミドシートで補強することで終局耐力およびエネルギー吸収性能が向上する。本実験でのアラミドシートのせん断補強に関する有効率は、基準引張強度 2.1 GPa に対して $K = 0.61$ であった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，1996
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，1996
- 3) アラミド補強研究会：アラミド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