

論文 側面にブラケットを有するラーメン橋脚横梁のアラミド繊維シート補強工法

篠崎 裕生^{*1}・三上 浩^{*2}・睦好 宏史^{*3}・Govinda Raj Pandey^{*4}

要旨：落橋防止用の鋼製ブラケットが側面に付いているラーメン橋脚横梁を模した梁の正負交番載荷試験を行い、ブラケットの有無および配置パターンの違いによるせん断耐力の差異を確認するとともに、コンクリート露出部分にアラミド繊維シートを貼り付けて補強した場合の補強効果について明らかにした。また、アラミド繊維シートのはく離現象を模擬した非線形 FEM 解析を行い、その適用性を検討した。

キーワード：ラーメン橋脚，鋼製ブラケット，せん断補強，アラミド繊維シート

1. はじめに

高架橋で多く見られるラーメン橋脚では、面内方向力に対して横梁のせん断耐力が不足する例があり¹⁾、横梁の補強対策が急務となっている。ラーメン橋脚横梁のせん断補強は、施工性を考慮すると連続繊維シートを用いた巻付け補強が有効と考えられるが、ラーメン橋脚の一部では、横梁側面に落橋防止や縁端拡幅のための鋼製ブラケットが付いている場合が多く、シートで補強する際の障害になっている。

このような横梁をシート補強する場合、ブラケット配置区間では、シートの巻き付けができないため、十分なせん断耐力を確保できない可能性があるものの、ブラケットは比較的堅固に梁に固定されているため、ブラケット部分でのせん断抵抗は比較的大きいことが予想される。

ブラケットのような鋼板が設置された RC 部材に関連する工法や研究については、RC 柱の一側面に鋼板を貼り付けてせん断・じん性補強する一面耐震補強工法²⁾や、せん断スパン全長に亘って鋼板を貼り付けた RC 梁のせん断耐力に関する研究^{3,4)}などが挙げられる。しかし、これらは鋼板が RC 部材側面の比較的大きな面積に連続的に貼り付けられている場合の実験結果に基

づいており、ブラケットが不連続に配置されている場合も効果があるかは不明である。また、ブラケット設置箇所以外のコンクリート部分にシートを貼り付けた場合の補強効果についても研究した例は見られない。

本文では、ブラケットを模した鋼板を側面に貼り付けた梁の載荷試験を行い、鋼板の有無や配置パターンの違いによるせん断耐力の差異を確認するとともに、コンクリート露出部分にアラミド繊維シートを貼り付けた場合の補強効果を実験的に検討した。また、アラミド繊維シートのはく離現象を模擬した非線形 FEM 解析を行い、その適用性を検討した。

2. 実験概要

本実験では、破壊部位を限定し易くするためと、より多くのケースで試験を行うため、図-1に示すような単純梁試験体を用いた。梁の形状寸法は、筆者等がこれまで行ってきたラーメン橋脚横梁のせん断補強を対象とした試験体^{5,6)}の緒元を参考に定めた。せん断補強鉄筋は配置していない。断面分割法で計算した曲げ耐力は1146kN、コンクリート標準示方書⁷⁾で計算したせん断耐力は328kNで、せん断余裕度は0.29で

*1 三井住友建設（株） 技術研究所 土木 PC 構造研究室（正会員）

*2 三井住友建設（株） 技術研究所 土木 PC 構造研究室長 工博（正会員）

*3 埼玉大学工学部 建設工学科 教授 工博（正会員）

*4 埼玉大学工学部 建設工学科 Ph.D.（正会員）

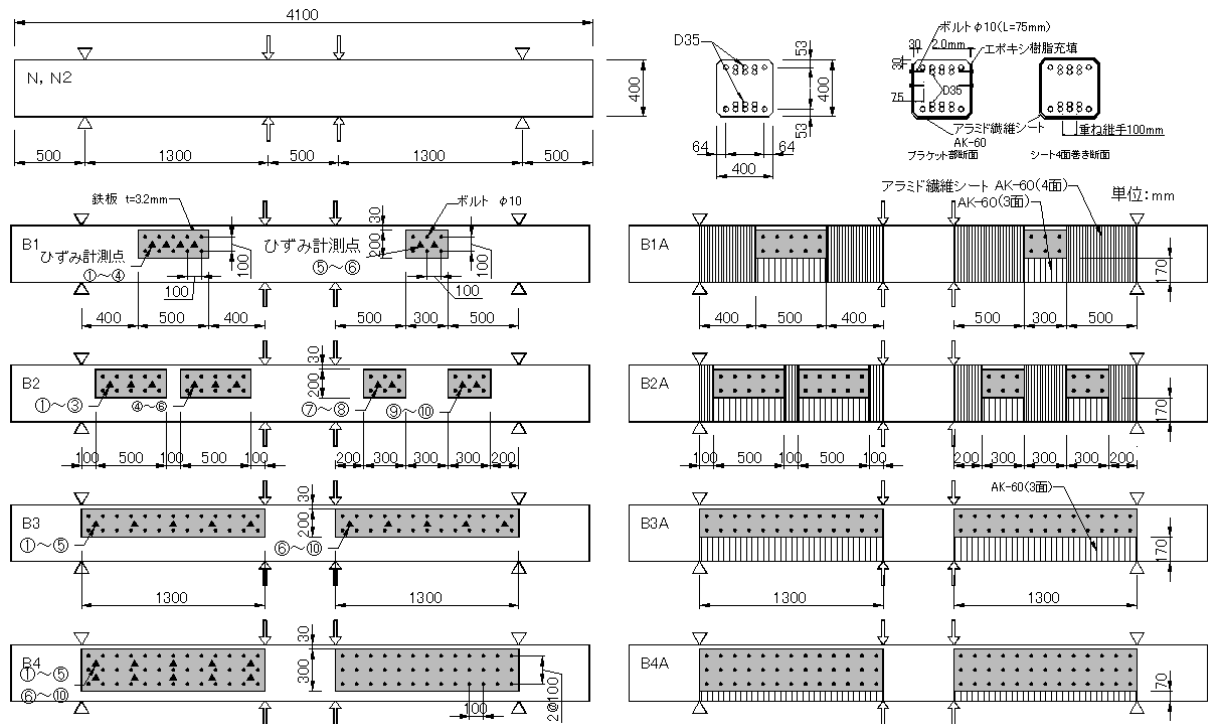


図-1 試験体形状寸法

ある。

鋼製ブラケットはベースプレートのみをモデル化し、梁幅に対するベースプレートの厚さ(両側2枚分)の比が実構造と同等の約1.0%となるように設定した。リブなどの補剛材は無視し、ボルトとエポキシ樹脂で試験体側面に固定した。ボルト断面積をブラケット面積で除した比は、実構造の1/4~1/6となる。

実構造における鋼製ブラケットの大きさや配置位置は多種多様である。試験体では、ブラケット高さを梁高さの1/2、と3/4の2ケース、ブラケット幅を梁高さよりも大きい場合と小さい場合の2ケースを設定した。

数少ない試験体数で多様な配置ケースを試験するために、B1, B2試験体では左右スパンのブラケットの幅を変えている。左右スパンで破壊性状や耐力が異なることも考えられるが、それらも含めてFEM解析で評価することとした。

B1A~B4A試験体は、B1~B4をそれぞれアラミド繊維シート(以下、シートと呼ぶ)で補強した試験体である。実構造では、ブラケットの位置には支承があり、梁上面にシートを貼ることができないため、これを考慮し、ブラケット区間では2側面+底面の3面を、それ以外は4

面をシートで補強した。3面補強では、シートをブラケットに固定せず、力の伝達がないようにした。これは、シートと鋼板の接合方法や設計方法が未だ確立されていないことと、その接合方法によって耐力が変動することが予想されるため、安全側の配慮をしたためである。

シートは、実構造における一般的なせん断補強量などを考慮してAK-60(1m幅あたりの引張耐力が600kN)とした。シートの設計厚さは0.286mm、引張強度および弾性係数はそれぞれ2060, 118000N/mm²である。コンクリートおよび鉄筋、鋼板の材料特性値を表-1、表-2に示す。

表-1 コンクリートの材料特性値

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁵ N/mm ²)
N, B1, B2, B3, B4	25.3 ~ 25.7	0.263 ~ 0.271
N2, B1A, B2A, B3A, B4A	30.5 ~ 33.9	0.257 ~ 0.303

表-2 鋼材の材料特性値

材料名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
鉄板(SS400, t=3.2mm)	267	381
鉄筋(D35, SD345)	389	584

荷重は変位制御とし、変形角 1/1600 を基準としてその整数倍の変位をそれぞれ 3 回ずつ加力した。なお、無補強の梁 (N, N2) は、正負交番繰返し荷重と一方向単調荷重を行い、せん断耐力に与える荷重方法の影響を検討した。

計測項目は、荷重荷重と変位および鉄筋と鋼板ならびにシートのひずみで、鋼板には 3 軸ひずみゲージを用いてせん断ひずみを計測した。

3. 実験結果

各試験体の荷重 - 変位関係を図 - 2 に、ひび割れ状況を図 - 3 に、せん断耐力の比較を表 - 3 に示す。ひび割れ状況図では、耐力低下の主な原因となったひび割れを太線で記入し、最終的なシートのはく離状況を斜線でハッチングしている。また、表 - 3 のせん断耐力の比較では、各試験体のコンクリート強度が異なる点を考慮し、せん断耐力がコンクリート圧縮強度の 3 乗根に比例すると仮定して補正を行った。

一方向単調荷重した N2 試験体のせん断耐力は 343kN で、計算せん断耐力の 330kN とほぼ一致した。一方、正負交番繰返し荷重を行った N 試験体のせん断耐力は正負の平均で 277kN となり、計算値の 311kN を 1 割程度下回った。以上から、正負交番繰返し荷重によるせん断耐力の低下が認められた。以下のブラケット付き試験体のせん断耐力に関する考察は、表 - 3 に示すコンクリート強度補正後の値を元としている。

B1, B2 試験体のせん断耐力は、N 試験体よりも正負平均でそれぞれ 19%、30% 増加した。せん断ひび割れは、ブラケットを避けるように進展しており、耐力の向上はひび割れ位置や長さが変化することが主要因と思われる。B1, B2 試験体ともに、正負荷重で異なるスパンで破壊しており、また、正負荷重時のせん断耐力もほとんど差異がないことから、本試験の範囲では、ブラケットの幅がせん断耐力へ与える影響は小さいことが分かった。

シートで補強した B1A, B2A 試験体のせん断耐力は B1, B2 試験体よりも正負平均でそれぞれ

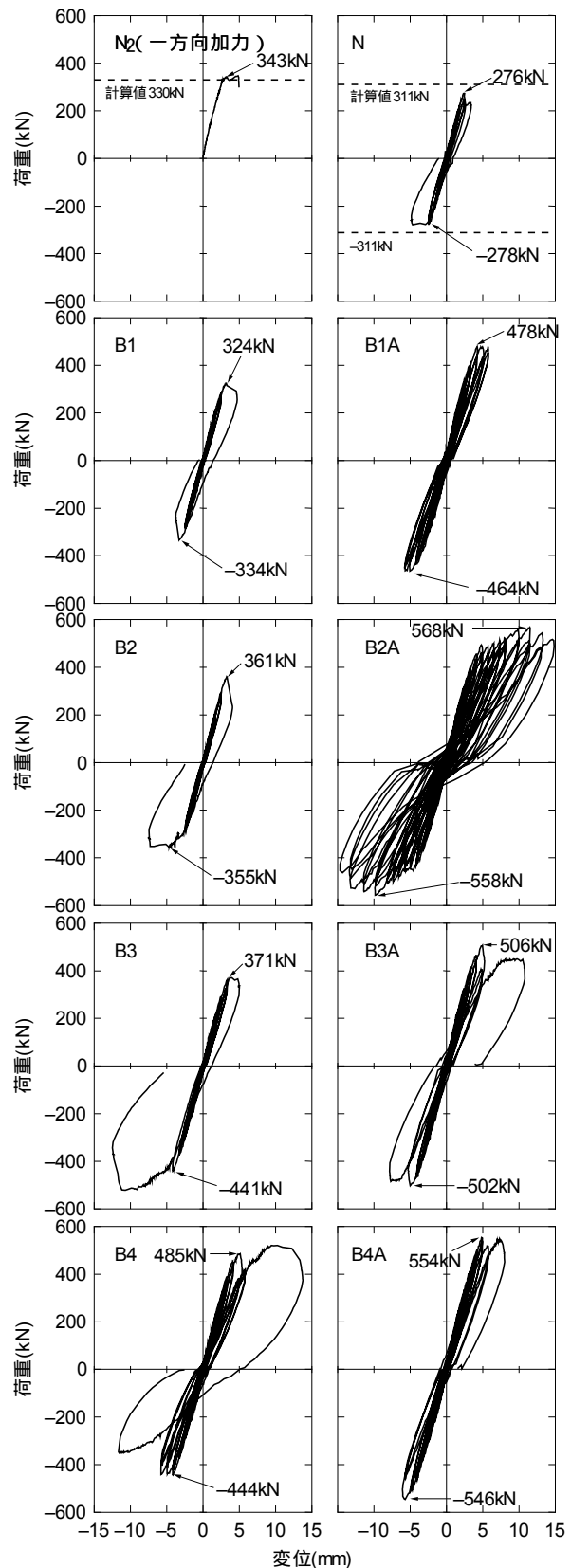


図-2 荷重-変位関係

32%、42%と大きく向上した。シートにより、せん断ひび割れの進展とひび割れ幅が抑制される効果が確認できた。終局時は、いずれの試験体もブラケット幅の大きいスパンで損傷が進み、

ボルトとともにブラケット端部が部分的にはく離するとともに、3面シートのはく離が見られた。

B3, B4 試験体のせん断耐力は、N 試験体よりも正負平均でそれぞれ 46%、68%向上した。ひび割れは、鋼板の縁に沿って進展し、一部ボルトとともに鋼板端部がはく離した。シートで補強した B3A, B4A 試験体のせん断耐力は、B3, B4 試験体よりも正負平均でそれぞれ 16%、12%向上した。終局時は、3面シートと鉄板の部分的なはく離が生じたが、B3, B4 試験体で見られた正負荷でのせん断耐力の比較的大きな差異が、B3A、B4A 試験体では小さくなっており、シート補強が正負の耐力のアンバランスを改善する効果があることも確認できた。

図 - 4 に最大荷重時のブラケットのせん断ひずみを示す。せん断ひずみはブラケットを連続的に設置した B3, B4 試験体の方が大きく、ブラケットのせん断負担が大きくなる事が分かる。シート補強の有無ではせん断ひずみの明確な差異は認められなかった。いずれのブラケットも降伏せん断ひずみ (1940 μ) には達していなかった。

4. 解析概要

WCOMD⁸⁾を用いた2次元の非線形 FEM 解析により、実験結果のシミュレーションを行った。

コンクリートは、中間節点を有する平面応力要素でモデル化した。ブラケットとコンクリートは完全付着を仮定している。シートは繊維方向のみ強度を有する面部材としてモデル化するため、直交異方性要素を用いた。また、シートのはく離を再現するため、インターフェース要素をコンクリート要素との間に配置し、はく離が生じるとシートの引張力をコンクリートに伝達しなくなるようにした。はく離が生じ始めるシートとコンクリート間のせん断応力度は、過去の実験結果^{5),9)}から以下の式で求めた。

$$\tau_b = (0.114E_p t_p + 0.383\beta - 0.017\beta^2) \left(\frac{f'_c}{39.6} \right)^{2/3} \quad (1)$$

ここに、 $\beta = 20 \times l_a / b_w$, E_p : シートの弾性

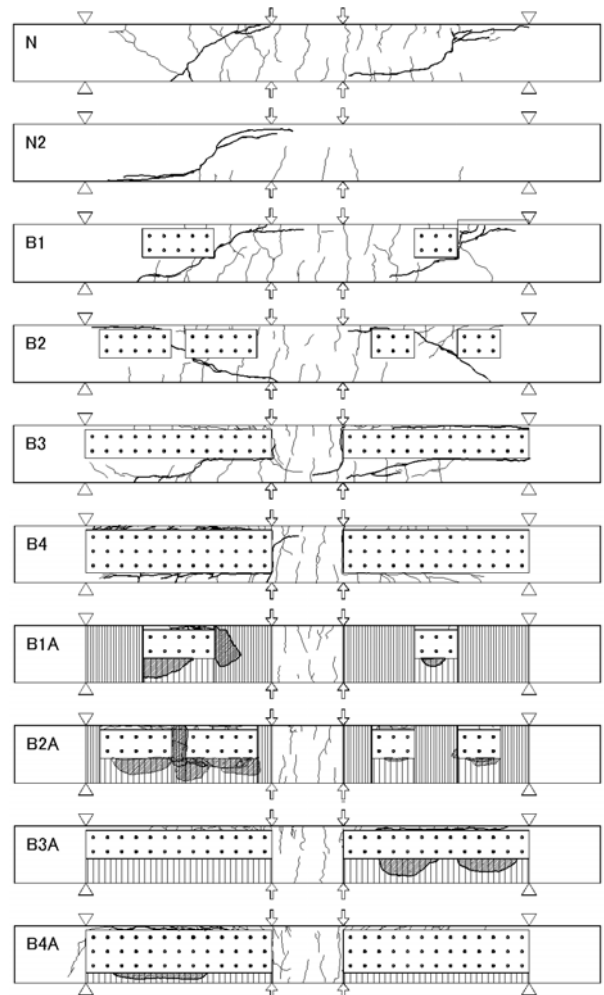


図-3 ひび割れ状況

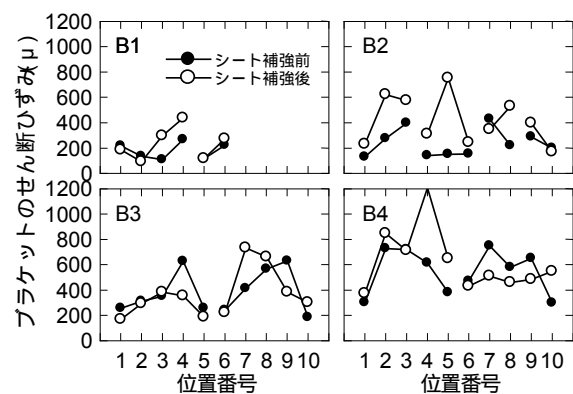


図-4 ブラケットのせん断ひずみ

係数(GP_a), t_p : シートの厚さ, l_a : シートの定着長さ (4面: 200mm, 3面: 0mm), b_w : 試験体断面幅(400mm), f'_c : コンクリートの圧縮強度, である。 l_a は4面補強の場合は、梁幅の半分, 3面補強の場合は0とした。

解析で用いたコンクリートの応力 - ひずみ関係は、圧縮側は Gibson のモデル¹⁰⁾を用いた。本解析は分布ひび割れモデルを用いているため、

ひび割れ発生後のコンクリートの引張応力度が除々に低下する岡村等のモデル⁸⁾を使用した。引張応力度の低下度合いを表す c の値は、鉄筋コンクリート部分 (FEM 要素図の上下 2 段分) で 0.4, その他の無筋コンクリート部分を 5.0 とした。本解析において, c の値は, せん断耐力の推定精度に大きく影響するため, ここでは, 無筋コンクリート部分の c 値を, 基準となる N 試験体のせん断耐力の解析値がほぼ実験値と一致するように設定した。他の試験体の c 値はすべてこの値を用いた。

コンクリートひび割れ面のせん断伝達モデルは, WCOMD に標準で組み込まれているモデルを用いた。その他, 鉄筋およびブラケットの応力 - ひずみ関係は, それぞれの引張試験結果をもとにバイリニアでモデル化した。

実験は正負交番繰返し載荷であるが, 解析は正側, 負側それぞれ一方向に単調に変位制御で載荷した。

5. 解析結果

解析結果を図 - 5 および表 - 3 に示す。

B4, B4A 試験体を除けば, 本解析手法を用いて c 値を適切に定めることにより, 比較的良い精度で実験結果をシミュレーションできることが分かった。特に正載荷側のせん断耐力を約 10% の範囲で推定できることが分かった。ただし, 変形については, 本解析が 2 次元であることから, 例えば B2A 試験体における 4 面シートの閉合の効果によるじん性の向上などは解析では表現できていない。解析ではこれらの試験体の耐力は, いずれも無筋コンクリート部分の損傷の増大やシートのはく離などで決まっており, 試験結果と一致していた。

B4A 試験体を除けば, せん断耐力の解析値は, 負載荷側の方が大きくなる傾向が見られた。これは, 負載荷時に引張縁となる方にブラケットが寄せて配置されており, 曲げひび割れの発生やせん断ひずみの増加が抑制されるためと考えられる。これに加え, 実験では, 正負交番に繰

表 - 3 試験体せん断耐力比較

試験体	実験値		FEM 解析値	
	正	負	正	負
N	276	279	284	284
	291	294	(1.03)	(1.02)
B1	324	334	297	342
	341	353	(0.92)	(1.02)
B2	361	356	324	453
	382	376	(0.90)	(1.27)
B3	371	441	353	457
	390	464	(0.95)	(1.04)
B4	485	444	719	784
	511	469	(1.48)	(1.77)
B1A	480	464	493	602
	474	458	(1.03)	(1.30)
B2A	568	558	516	614
	545	536	(0.91)	(1.10)
B3A	506	502	532	645
	497	493	(1.05)	(1.28)
B4A	554	546	936	891
	549	541	(1.69)	(1.63)

実験値下段は圧縮強度 30N/mm² で換算した値
FEM 値()は実験値(上段)に対する比率

り返し載荷しており, 最大耐力に達する前に, 正側, 負側ともブラケットやシートのはく離がある程度進行するのに対し, 解析では, 健全な状態から, 正側あるいは負側へ単調に載荷していることなども影響しているものと考えられる。そのため, 負載荷側のせん断耐力は, 一部解析値が実験値を 20% 以上超えているものがあった。しかし, 例えば, B1A 試験体や, B2 試験体の解析結果を見ると, 損傷の増大に伴う梁の剛性変化点はそれぞれ -530kN, -308kN であり, 実験値に対する比もそれぞれ 1.14, 1.02 となり, 比較的良い精度で損傷増大のポイントを再現できていることが分かる。

B4 および B4A 試験体の解析結果では, 正側, 負側ともに加力点付近のコンクリートの圧縮破壊で最大耐力が決まっている。これは, ブラケットが梁側面のほぼ全面に貼り付けられており, 無筋コンクリート ($c=5.0$) として設定した部分が剛性の高い鋼板で覆われていることで, コンクリートの損傷が生じ難くなっていることと, ブラケットとコンクリートの完全付着を仮定していることが原因と考えられる。以上から, 正負交番繰返し載荷やブラケットとコンクリートのはく離を考慮した解析を行うことで, より精度を向上させることができると考える。

6. まとめ

側面ブラケット付きラーメン橋脚横梁を模した梁試験体のせん断載荷試験および非線形 FEM 解析により以下の点が明らかとなった。

- (1) 側面ブラケットが配置されていることにより、せん断ひび割れの位置や長さが制限されることで、せん断耐力が向上する。
- (2) ブラケットの配置方法に関わらず、アラミド繊維シートでコンクリート露出部分を補強することで、ひび割れの発生・進展を抑制し、せん断耐力を向上させることができる。
- (3) WCOMD を用いた 2 次元非線形 FEM 解析により、せん断スパン全長にブラケットを配置した試験体(B4,B4A)以外の試験体のせん断耐力を比較的良い精度で再現できる。
- (4) せん断スパン全長にブラケットを配置した試験体(B4,B4A)では、実験と解析で破壊モードが異なり、せん断耐力も乖離が大きくなった。これは、ブラケットとコンクリートの完全付着を仮定しているためと考えられる。
- (5) 本解析は、一方向単調載荷のため、正負のせん断耐力のバラツキが比較的大きい。より精度を上げるため、正負交番繰返し載荷を考慮した解析を行う必要がある

本実験結果と解析により、実構造物における様々なブラケットのタイプに応じた不足せん断耐力の算出およびシートによる補強方法の検討が可能になるとともに、ブラケット幅や高さなどをパラメータとした解析検討により、簡易な設計式の構築なども可能と考える。

参考文献

- 1) 三上 浩ほか：支承を有するラーメン橋脚横梁のアラミド繊維シートによる補修・補強，コンクリート工学，Vol.42, No.6, pp. 42-47, 2004,6
- 2) 東日本旅客鉄道：維持管理マニュアル 補修・補強編 耐震補強設計マニュアル，2005.5
- 3) 金井，睦好，B.B.Adhikary，佐野：鋼板接着による RC 梁のせん断補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.1, pp529-534, 2000
- 4) 曳村，睦好，佐野：鋼板を用いた RC 梁のせん断耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.19, No.2，pp1641-1646, 1997
- 5) Ashraf, M. Mutsuyoshi, H. Adhikary, B. B. Watanabe, K.: Shear upgrading of reinforced concrete beams with externally bonded composite sheets, JCI, Annual Convention Vol. 24, No.2, pp.1537-1542, 2002
- 6) 篠崎，三上，中島，田村：アラミド繊維シートによる U 字形補強と部分閉合補強を併用した RC 梁のせん断耐力，コンクリート工学年次論文報告集，

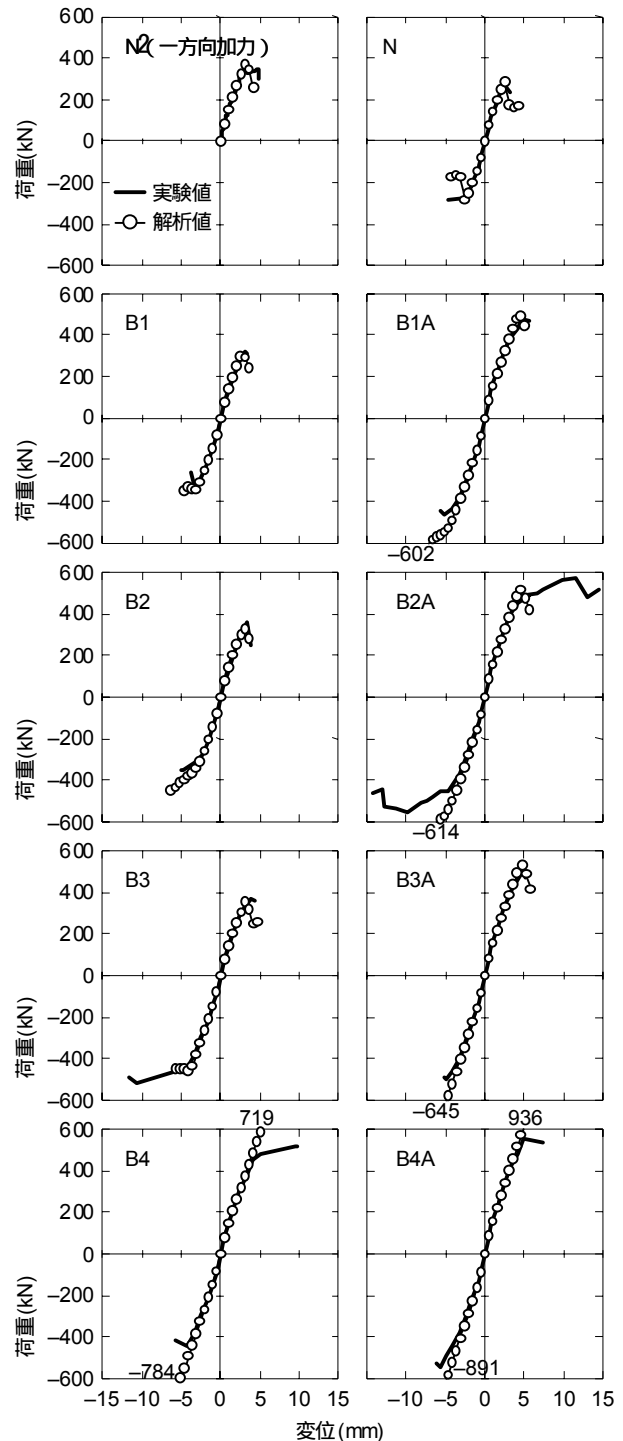


図-5 解析結果

- Vol.25, No.2, pp. 1891-1896, 2003
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002
- 8) Okamura, H. and Maekawa, K.: Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete, Gihodo-Shuppan Co. Tokyo, 1991
- 9) Adhikary, B. B., Mutsuyoshi, H., Ashraf, M.: Shear strengthening of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer sheets with bonded anchorage, ACI Structural Journal, V.101, No.5, pp. 660-668 September-October 2004
- 10) Gibson, R. F.: Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill International Edition, 1994