

論文 せん断補強鉄筋を有する多層サンドイッチ構造部材のせん断耐力に関する実験的検討

森山 智明^{*1}・小林 薫^{*2}

要旨：既設橋脚の耐震補強工法として、橋脚側面に剛性のある補強部材を付加することにより変形性能の向上を図る耐震補強工法の開発を行っている。補強部材は、複数の鋼板を貫通するせん断補強鉄筋を有する鋼とコンクリートの多層サンドイッチ構造となる。今回、補強部材の曲げせん断試験を行い、補強部材のせん断耐力と側面に補強部材を付加することによるせん断補強効果について検討を行った。その結果、補強部材の破壊状況を確認し、側面にアンカーにより補強部材を設置することでせん断耐力が増加することが確認された。

キーワード：サンドイッチ構造, せん断耐力, 耐震補強

1. はじめに

鉄道 RC 橋脚の耐震補強を行う場合、既往の補強工法では、RC 巻き立て工法、鋼板巻き工法がある。これらの工法では、補強により河川占有断面を阻害するので、橋脚幅の増加に余裕のない場合は、耐震補強工事が不可能となる。この問題を解決するため、川の流れ方向に直交する橋脚側面に剛性部材を付加することにより(図-1 参照)、河川断面を阻害しないで変形性能の向上を図る耐震補強工法の開発¹⁾を行っている。

橋脚側面への補強部材の施工法は、以下の通りである。

a) 橋脚側面にアンカーを施工し、型鋼 (L 型鋼, H 型鋼等) を鉛直方向に設置する。

b) 鉛直方向に設置された型鋼を貫通するように水平方向の鉄筋を設置する。

c) 補強鋼材部を覆うようにコンクリート打設し、一体化する。

写真-1 は、橋脚試験体に設置した補強部材のコンクリート打設前の鋼材の配置状況である。

このような補強部材は、複数の板を貫通するせん断補強鉄筋を有する鋼とコンクリートの多層サンドイッチ構造となる。

今回、補強部材のみの梁による曲げせん断試験およびせん断破壊先行の RC 梁側面に補強部材を設置した梁の曲げせん断試験を行い、補強部材のせん断耐力および補強部材によるせん断補強効果について検討を行った。

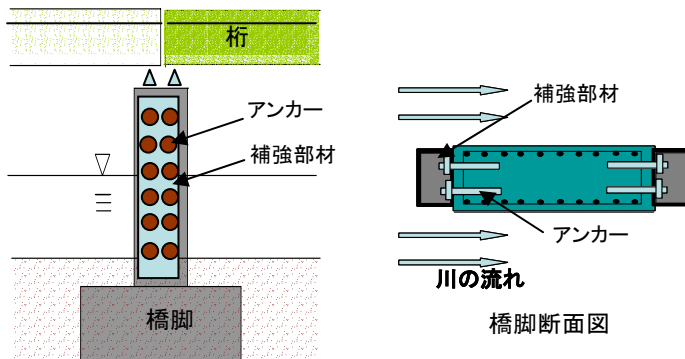


図-1 補強イメージ

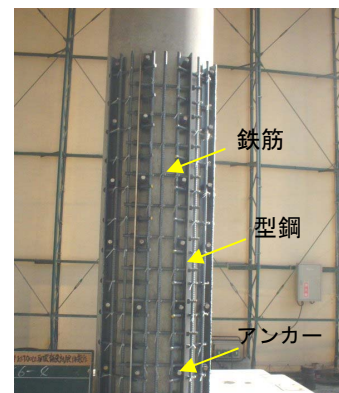


写真-1 橋脚試験体補強状況

*1 東日本旅客鉄道(株) 研究開発センター フロンティアサービス研究所 主席 工修 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 研究開発センター フロンティアサービス研究所 副課長 博(工) (正会員)

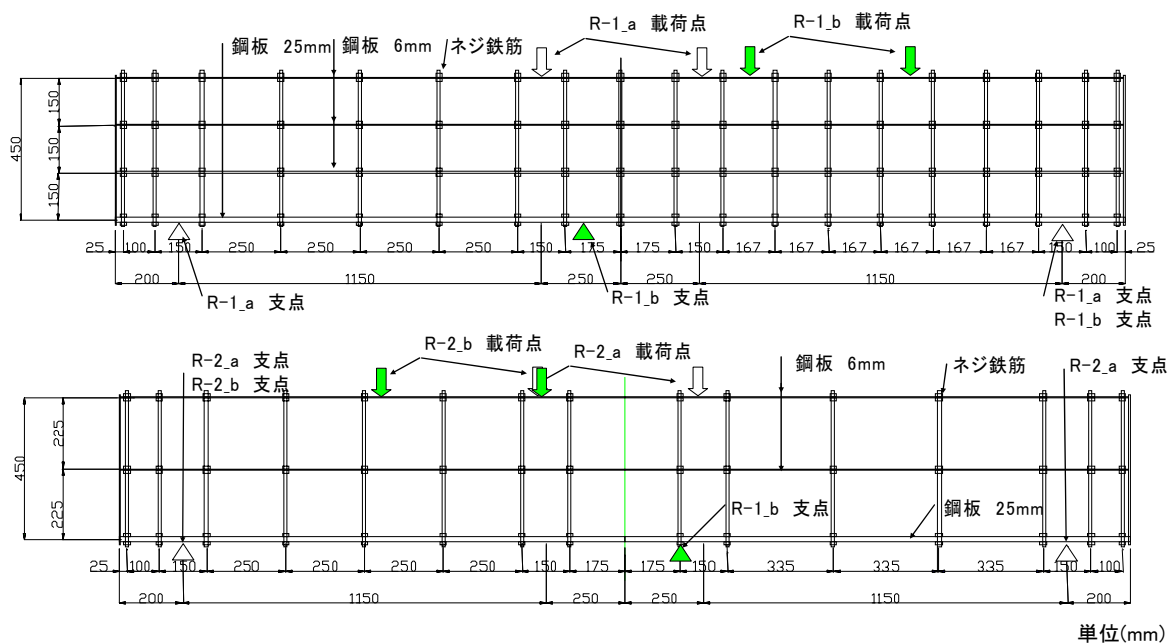


図-2 試験体側面図(Rシリーズ)

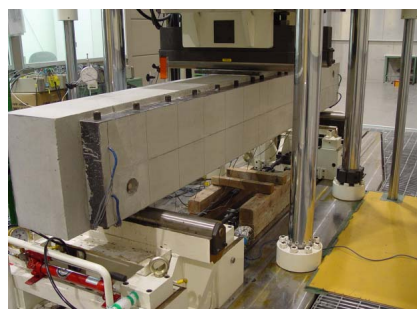


写真-2 試験体補強状況(G-1)

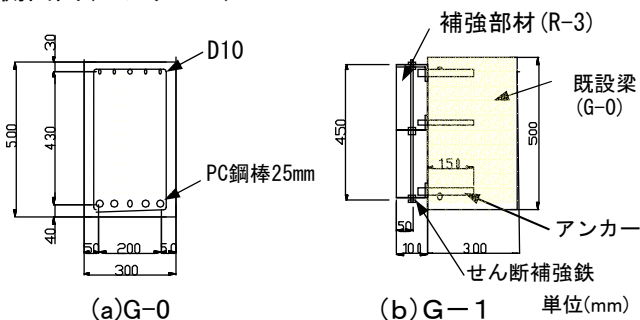


図-3 試験体試験体側面図(Gシリーズ)

表-1 試験体諸元

試験体 番号	試験体寸法		せん断 スパン a(mm)	a/d	鋼板 間隔 d ₁ (mm)	補強鉄 筋間隔 s(mm)	s/d ₁	せん断補強鉄筋		鋼板		コンクリート 強度f _c ' N/mm ²	最大 荷重 kN	
	幅B (mm)	高さd (mm)						径	降伏強度 N/mm ²	段数	降伏強度 N/mm ²			
R-1	R-1_a	150	450	1150	2.56	150	250	1.67	D13	390	3	251	34.5	119
	R-1_b	150	450	450	1.00	150	167	1.11	D13	390	3	251	34.5	279
R-2	R-2_a	150	450	1150	2.56	225	333	1.48	D13	390	2	251	34.5	123
	R-2_b	150	450	500	1.11	225	250	1.11	D13	390	2	251	34.5	252
R-3	R-3_a	100	450	1150	2.56	150	250	1.67	D16	399	3	251	29.8	97
	R-3_b	100	450	450	1.00	150	167	1.11	D16	399	3	251	29.8	202
R-4	R-4_a	100	450	1150	2.56	225	333	1.48	D16	399	2	251	29.8	103
	R-4_b	100	450	500	1.11	225	250	1.11	D16	399	2	251	29.8	204
R-5	R-5	100	450	800	1.78	225	333	1.48	D16	399	2	251	29.8	148
G-0	無補強	300	450	1250	2.78	-	-	-	-	-	-	-	31.6	156
G-1	RC部	300	450	1250	2.78	-	-	-	-	-	-	-	32.0	313
	補強部	100	450	-	-	225	333	1.48	D16	399	2	251	32.5	

2. 実験概要

(1) 試験体概要

使用材料諸元を表-1 および試験体形状を図-2, 3に示す。試験は、補強部材のせん断耐力確認のためのRシリーズとRC梁に補強部材を設置したG-1の2タイプを行っている。

補強部材のR試験体は、高さ450mm、下鋼板

厚t=25mmとし、その他の鋼板は厚t=6mmを共通としている。R-1試験体は、幅150mmで上下の鋼板の間に2枚の鋼板を配置した3層構造となっている。鋼板は、せん断補強筋であるネジ鉄筋D13(SD390 ヤング係数Es=195kN/mm²)を貫通させナットにより固定し、コンクリートを打設している。R-2試験体は、上下の鋼板の間に

1枚の鋼板を配置した2層構造で、せん断補強筋であるネジ鉄筋 D13 を用いている。

R-3, 4 は、幅を 100mm とし、せん断補強鉄筋を D16 に変更し、その他の配置は、それぞれ R-1, 2 と同じである。

R-1~4 試験体は、せん断補強鉄筋の間隔がスパン中央から左右で異なる配置をしている。最初、試験は、スパン 3800mm で荷重を行い、コンクリートが破壊したときのデータを R-1_a としている。その後、支点をコンクリートの破壊に至らなかった側に移動し、スパンを 1500mm 程度として荷重を行なった結果を R1_b としている。表-1 の諸元は、コンクリートが破壊した側の諸元を表している。

R-5 は、R-3 と同じでせん断スパンを 800mm と小さくしている。

G-0 は、補強部材を設置していない基準となる RC 梁試験体である。RC 梁は、高さ 500×幅 300mm、主鉄筋に総ねじ PC 鋼棒 25mm (B 種 1 号) を 5 本使用し、曲げ降伏が先行しないようにしている。RC 梁のせん断スパン内には、せん断補強鉄筋は配置していない。G-1 は、RC 梁 G-0 に、R-4 と同様の 2 層の補強部材を設置している。補強部材は、RC 梁に設置したアンカー (ネジ

鉄筋 D16, SD390 $E_s=195\text{kN/mm}^2$) に、L 型に加工した厚さ 4.5mm の鋼板を設置し一体化している。RC 梁部のアンカーは、先にアンカーを設置しコンクリート打設を行っている。RC 梁と補強部材のコンクリートの接合面は、目荒らし等の処理を行っていない。

(2) 荷重方法

写真-2 に試験状況を示す。支間中央の 2 点集中荷重として、荷重点距離を 500mm と一定とし、静的に荷重を行った。荷重は、破壊に至るまで漸増させ、荷重をロードセルで検出しながら各ステップで荷重、たわみ、鋼材やコンクリートに生じるひずみやひび割れの発生状況を追跡した。両支点とも円筒形の支点の上に 2 枚重ねたテフロン板を挟んだ鋼板を設置し、回転および水平変位を拘束しないようにした。補強部材を設置した G-1 は、支点と荷重点が補強部材にあたらないように、支点および荷重点と補強部材の間隔を空けている。

3. 試験結果および考察

3.1 ひび割れの進展状況および破壊形態

(1) R シリーズ (補強部材のせん断試験)

R-1_a は、せん断力 25kN 付近から中間部の水

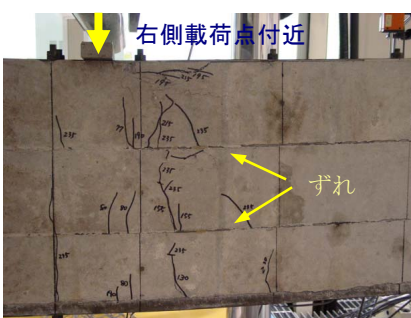


写真-3 R-1_a 試験終了後

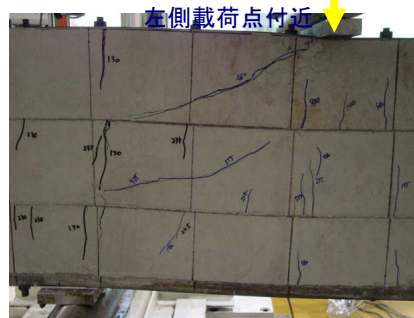


写真-4 R-1_b 試験終了後

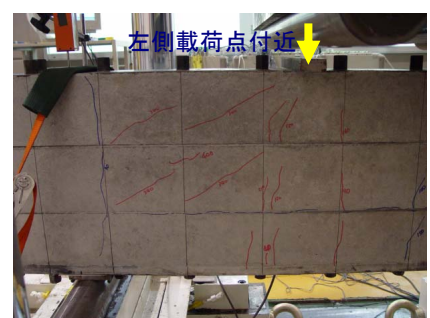


写真-5 R-3_b 試験終了後

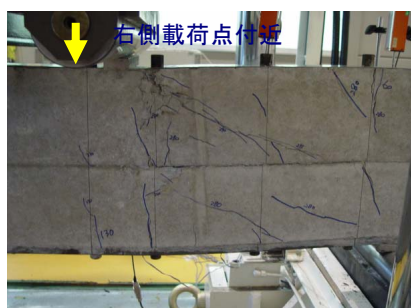


写真-6 R-5 試験終了後



写真-7 G-1 (4.6mm 荷重低下時)

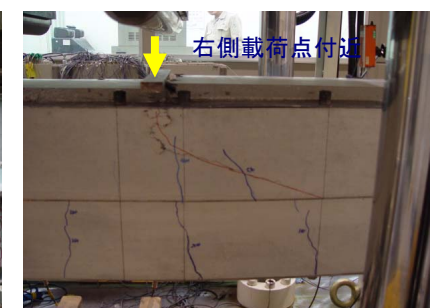


写真-8 G-1 試験終了後

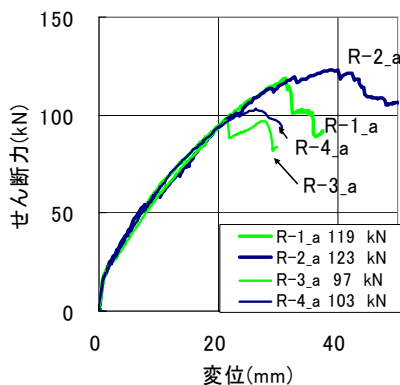


図-4 せん断力-変位曲線

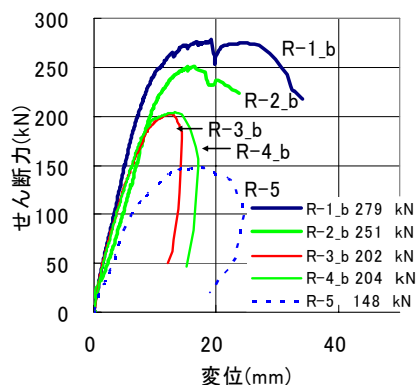


図-5 せん断力-変位曲線

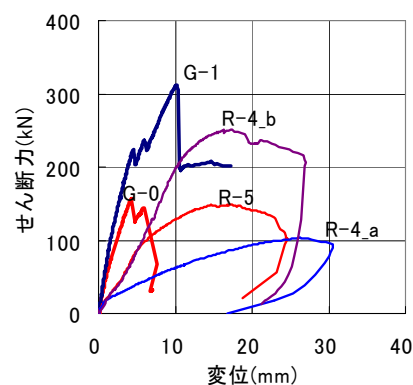


図-6 せん断力-変位曲線

平鋼板とコンクリートにずれが発生し、せん断力で100kNで一度荷重が低下している。さらに荷重を行うと変形が進み、最大せん断力119kNでせん断補強鉄筋間隔が250mm側の荷重点部のコンクリートが圧壊し荷重が低下している（写真-3参照）。

支点を移動しせん断スパンを短くしたR-1_bは、同様に鋼板のずれが発生し、コンクリートにせん断ひび割れが発生し荷重点付近の鋼板が大きく座屈し、荷重が低下している。せん断ひび割れは、支点と荷重点の間にせん断補強鉄筋を横切っていた（写真-4参照）。

2層となっているR-2は、R-2_aとR-2_bともにR-1とほぼ同様な破壊形態であった。

幅を100mmに小さくし、せん断補強鉄筋にD16を用いたR-3_aは、せん断力25kN付近で鋼板のずれにより剛性は低下している。せん断力97kNでせん断補強鉄筋間隔が250mm側の荷重点部のコンクリートが圧壊し荷重が低下している。

R-3_bは、同様に鋼板のずれが発生しているが、R-1_aよりは小さくなっている。コンクリートにせん断ひび割れが発生し荷重が低下している。このときのせん断ひび割れは、R-1_bとは異なり、鋼板とせん断補強筋が格子状に配置されている対角にそれぞれひび割れが発生している。（写真-5参照）。

R-5は、せん断力136kN付近でせん断補強鉄筋間隔333mm側の荷重点側上段のコンクリートでせん断ひび割れが発生し、その後、せん断力140kNで荷重点側の下段のコンクリートにせん

断ひび割れが発生し、一度荷重が低下している。最大せん断力148kNでせん断補強鉄筋間隔が250mm側の荷重点部のコンクリートが圧壊し荷重が低下している（写真-6参照）。

(2) G シリーズ（補強効果の確認試験）

無補強試験体のG-0は、最大せん断力157kNでせん断ひび割れが荷重点を貫き、急激に荷重が低下している。

側面に補強部材を設置したG-1試験体は、せん断力223kNで補強部材を設置していない側面（アンカーピッチ333mm側）にせん断ひび割れが発生し、荷重が低下している。

このときのせん断ひび割れは、荷重点下10cmの位置まで達しているが、荷重点までひび割れは貫通していない（写真-7参照）。

荷重を続けるとせん断力235kNでアンカーピッチ250mm側でせん断ひび割れが発生し、荷重が低下している。さらに荷重を行うとせん断力315kNでせん断ひび割れが貫通し、荷重が低下している（写真-8参照）。

3. 2 せん断耐力に関する考察

(1) R シリーズ（補強部材のせん断試験）

図-4～6に各試験体のせん断力-変位曲線を示す。図-4、5より、R-1_aとR-2_b、R-3_aとR-4_bのように、幅、せん断補強鉄筋径とせん断スパンが同じ試験体は、せん断補強鉄筋の間隔、鋼板により分割されたコンクリートの段数が異なっても最大荷重に大差のない結果となっている。図-4よりせん断スパン比2.56(試

験番号_a)の試験では、コンクリートが3層のR-1,R-3の最大荷重に達する変位は、2層のR-2,R-4より小さく、最大荷重直後の低下が大きい傾向にある。図-5のせん断スパン比1.1(試験番号_b)の試験では、R-1_bとR-2_bは、最大荷重に1割程度の差があるが、R-3_bとR-4_bは、ほぼ同じ値となっている。

このことは、今回実験を行った形状の範囲でのせん断耐力は、鋼板によるコンクリート層数、せん断補強鉄筋間隔sによらないことを意味している。

上田²⁾らは、鋼とコンクリートのサンドイッチ構造では、コンクリートの破壊で求まるせん断耐力にせん断補強されていない鉄筋コンクリート梁部材のせん断耐力推定式(1)が準用され、タイバーによりせん断補強間隔sと有効高さdの比(s/d)が小さい場合(s/d=1.75以下)、ひび割れがせん断補強鉄筋を横切るように形成されるため、s/dによらないことを示している。

本実験結果では、s/d1が等しくa/dが異なるR-4_a,R-5のせん断耐力に差が見られている。このことから、せん断耐力は、せん断補強間隔sの影響は小さいと考えられ、式(1)のs/zにせん断スパン比a/dを用いて計算した結果を表-2および実験値/計算値を図-7に示す。コンクリートと鋼板のずれが発生したR-1,R-2を除くと、せん断スパン比a/dが1に近いR-3_bとR-4_bは、比較的一致している。しかし、R-5,R-3_a,R-4_aとa/dが大きい試験体ほど実験値が計算値を上回っている。

$$V_{ulb} = 0.19 f_c^{1/2} \beta_d \beta_p \beta_s \cdot b_w d \quad (1)$$

ここに b_w : 幅(mm) d : 有効高さ(mm)

f_c' : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

$\beta_d = (1000/d)^{1/4}$ $\beta_p = (100A_s/bw \cdot d)^{1/3}$

$\beta_s = 5/(1+\cot^2 \theta)$ $\theta = s/z$

A_s : 引張鋼材断面積(mm²)

z : 圧縮応力の合力の作用位置(圧縮鋼板の図心)から引張補強鋼板の図心までの距離

(2) G シリーズ (補強効果の確認試験)

図-6より、G-1のせん断ひび割れ発生によ

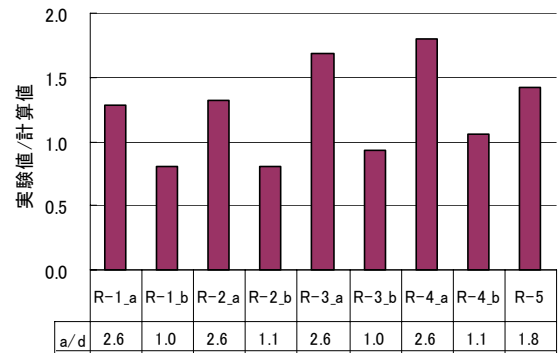


図-7 実験値/計算値

表-2 実験値と計算値

試験体番号	せん断スパン a(mm)	a/d	鋼板間隔 d1	補強鉄筋間隔 s(mm)	s/d1	最大荷重 kN	計算値 kN	実験値/計算値
R-1_a	1150	2.56	150	250	1.67	119	93	1.28
R-1_b	450	1.00	150	167	1.11	279	349	0.80
R-2_a	1150	2.56	225	333	1.48	123	93	1.33
R-2_b	500	1.11	225	250	1.11	252	312	0.81
R-3_a	1150	2.56	150	250	1.67	97	57	1.69
R-3_b	450	1.00	150	167	1.11	202	216	0.93
R-4_a	1150	2.56	225	333	1.48	103	57	1.79
R-4_b	500	1.11	225	250	1.11	204	194	1.05
R-5	800	1.78	225	333	1.48	148	104	1.42

り最初に荷重が低下した時の変位は、4.6mmと無補強試験体G-0のせん断破壊時の変位と一致している。このとき、せん断ひび割れの発生によりせん断力が低下した223kNは、無補強梁G-0より70kNせん断力が増加している。G-1の最大せん断力315kNは、無補強G-0と比較し、157kNせん断力が増加している。補強部材のみのせん断耐力は、形状の同様なR-4_aでは、103kNとなっており、補強部材のみのせん断耐力分以上に増加している。

図-8にG-1におけるアンカー筋とせん断補強鉄筋のせん断カーヒズみの関係を示す。アンカー筋のゲージ位置は、RC梁と補強部材の境目でアンカー筋の側面である。図-8(a)(b)より、アンカー筋のひずみの値は、せん断ひび割れ発生により荷重が低下した223kN後に大きくなっており、アンカーから補強部材に力が伝わっている状況を示している。アンカー筋のひずみ値が-と圧縮となっているのは、ひずみゲージがアンカー筋側面に貼り付けてあるため、アンカー筋の曲げ変形を計測していると考えられる。

図-8(c)(d)より、せん断補強鉄筋のひずみは、せん断ひび割れ発生により荷重の低下した

223 kN 付近より急激に増加し、補強部材がせん断力を負担している状況を表している。また、**図-8 (c)**の D-1、**図-8 (d)**の D-4 と RC 梁に発生したせん断ひび割れが横切る位置でのせん断補強鉄筋のひずみが、鋼板を貫通している同じせん断補強筋の高さの異なる位置のひずみより大きな値を示している。

補強部材のみのせん断試験 (R シリーズ) では、**図-8**の D-3、D-4 のように同じせん断補強筋の上部と下部のひずみは、ほぼ同じ値を示していた。これらのことは、RC 梁を補強した G-1 の補強部材は、アンカーより力が伝わるため、補強部材のみ梁のせん断耐荷機構 (力の流れ) が異なることを示している。

G-1 のせん断耐力の計算を行う。G-1 のせん断ひび割れが横切る位置のせん断補強鉄筋のひずみが、大きくなっていることから、補強部材のせん断補強鉄筋を RC 梁の帯鉄筋と同様に計算を行った。せん断耐力の計算は、鉄道構造物設計標準³⁾により、鉄筋コンクリート梁のせん断補強鉄筋と同様にトラス理論より計算を行った。計算の結果、RC 梁として計算した補強部材のせん断耐力は、コンクリート負担分 $V_c=71\text{kN}$ 、せん断補強鉄筋負担分 $V_s=97\text{kN}$ の計 168kN なる。無補強 G-0 と比較した G-1 のせん断耐力が増加分 157kN とほぼ等しい値となっている。

今回、RC 部材の側面に補強部材を付加したはりのせん断耐力の増加分は、補強部材のみのせん断耐力以上であることが確認された。しかし、補強部材を設置した試験体は、1 体のみであり、補強による耐荷メカニズムの評価が今後の課題である。

4. まとめ

複数の鋼板を貫通するせん断補強鉄筋を有する鋼とコンクリートの多層サンドイッチ構造である補強部材のせん断試験により得られた知見を以下に示す。

- (1) 今回実験を行った形状の範囲では、鋼板により分割されたコンクリート層数、せん

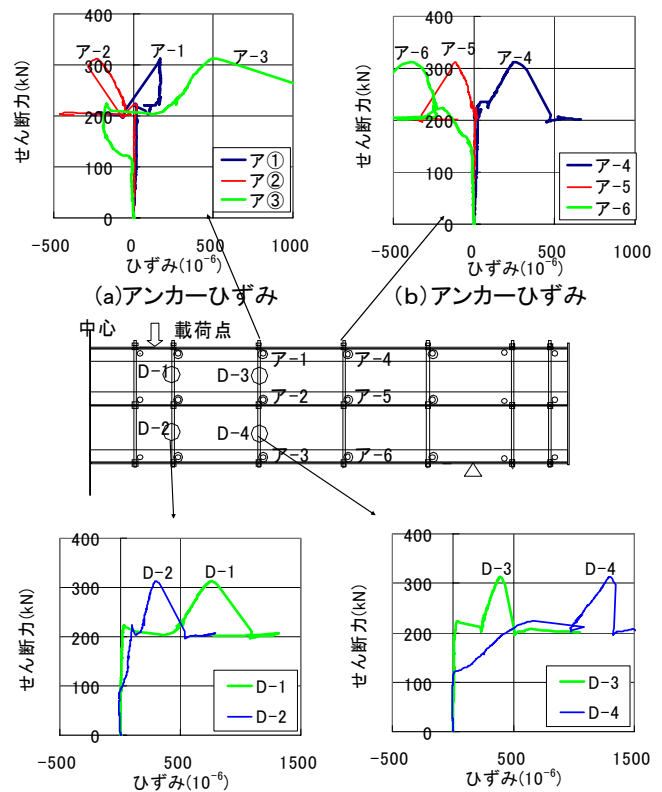


図-8 せん断力-ひずみの関係(G-1)

断補強鉄筋間隔 s の違いにより、せん断耐力の差は見られなかった。

- (2) RC 梁の側面にアンカーにより補強部材を付加することで、せん断耐力が増加することが確認された。
- (3) RC 梁の側面にアンカーにより付加された補強部材は、アンカーにより力が伝達されるため、補強部材のみの梁のせん断耐荷機構と異なる。

参考文献

- 1) 森山智明, 小林薫: 橋脚側面に鋼板を取付けた河川断面を阻害しない耐震補強の実験的検討: 土木学会第 59 回年次講演会, 2004.9
- 2) 上田 多門・ナス パンタート・ヌア ア ビン ヤヤ: サンドイッチタイプの合成構造部材の終局せん断強度, 第 2 回合成構造活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp143-148, 989.
- 3) 運輸省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善, 1992 年 10 月