

論文 外ケーブル方式を用いたセグメント PC 桁のせん断破壊性状

細田 暁^{*1}・小林 薫^{*1}・木野 淳一^{*2}

要旨：外ケーブル方式を用いた PC 桁のせん断破壊性状について実験的に検討を行った。外ケーブルによる補強で、せん断耐力は大きく向上することが明らかとなった。フランジの影響もあると思われるが、比較的せん断スパンが長い場合でもアーチ機構が形成され、破壊荷重は格段に向上した。せん断破壊性状に及ぼす、セグメント、プレストレス量、主鉄筋の分割、主鉄筋の有無、せん断補強筋など各種要因の影響について分析を行った。

キーワード：プレストレス、外ケーブル、せん断破壊、セグメント、アーチ機構

1. はじめに

外ケーブル方式のPC工法は、施工性の向上、ケーブルの維持管理が容易になる、構造物の軽量化などの利点がある。また、プレキャストセグメント構造と組み合わせることでさらに高品質になり、工期短縮、現場での施工を省力化することが可能となる。

外ケーブル PC 構造は、その曲げ性状は徐々に明らかにされてきている¹⁾が、せん断性状については不明な点が多い。外ケーブルによってせん断耐力が向上することを示す実験結果²⁾、³⁾、せん断耐力を算定する手法も提案されている³⁾が、実験データの数が十分であるとは言えない。

そこで、本研究では、外ケーブル方式を用いたセグメント PC 桁のせん断破壊性状を実験的に検討した。実構造物で想定される様々な要因を考慮し、主としてひび割れ発生状況、最終破壊形態、荷重-たわみ関係などについて分析を行った。考慮した要因は、外ケーブルのプレストレス量、セグメントの接合部、セグメント長、セグメントを使用することに伴う主鉄筋の分割、主鉄筋の有無、せん断補強筋の効果、コンクリート強度、せん断スパン比などである。

2. 実験の概要

2.1 供試体諸元

図-1に供試体の形状および寸法を示した。各供試体のパラメータは表-1にまとめた。Case-1~Case-10とRCの計11体は一体打ちであり、Seg-1~Seg-4の4体はセグメント形式(セグメント長800mm)である。セグメント形式の中でSeg-4のみにおいて、支間中央のセグメントのみ800mmでその他のものは400mmである。

図-1に示したように、供試体は定着部のみ矩形断面で、それ以外はT形断面とした。支間距離はCase-10のみが2000mmで、それ以外は4000mmである。

PC鋼材は、SBPR930/1080B種1号で32と17の2種類を使用した。Case-6~Case-9では、プレストレスを導入する場合の供試体上縁の縁引張応力度を抑制するために断面図心位置に17のPC鋼材を配置した。表-1において、プレストレスの値が記載されていないものは、PC鋼材が配置されていないものである。なお、PC鋼材は、偏向部は設けず、定着端間を直線で配置した。

引張鋼材としては、異形PC鋼棒D25を1本配置した。以降、この供試体内の引張鋼材を主鉄筋と称する。また、フランジ部に圧縮鉄筋としてSD295A異形鉄筋D13を4本配置した。

セグメント形式の供試体では、セグメント接合面はドライジョイントとし、せん断キーは設けていない。

*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター 博士(工)(正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター 工修 (正会員)

表 - 1 供試体諸元

供試体名	構造形式	プレストレス量 (KN)	図心位置プレストレス (KN)	コンクリート強度 (N/mm ²)	せん断スパン比	主鉄筋	せん断補強鉄筋	着目点
Case-1	一体	200		48.7	3.6	D25	なし	基本供試体
Case-2	一体	200		49.8	3.6	D25分割	なし	主鉄筋分割
Case-3	一体	200		53.9	3.6	D25分割	D6@250	主鉄筋分割 + せん断補強筋
Case-4	一体	200		46.2	3.6	なし	なし	主鉄筋なし
Case-5	一体	200		29.8	3.6	D25	なし	コンクリート強度
Case-6	一体	0 (PC鋼棒は配置)	0	51.7	3.6	D25	なし	プレストレス量
Case-7	一体	400	400	52.4	3.6	D25	なし	プレストレス量
Case-8	一体	200	200	41.4	3.6	D25	なし	プレストレス量
Case-9	一体	300	300	43.2	3.6	D25	なし	プレストレス量
Case-10	一体	200		44.9	2	D25	なし	せん断スパン比
Seg-1	セグメント (800mm)	200		52.9	3.6	D25分割	なし	セグメント
Seg-2	セグメント (800mm)	200		54	3.6	D25分割	D6@250	セグメント + せん断補強筋
Seg-3	セグメント (800mm)	200		58.8	3.6	なし	なし	セグメント + 主鉄筋なし
Seg-4	セグメント (400mm)	200		44.5	3.6	D25分割	なし	セグメント長
RC	一体			45.4	3.6	D25	なし	RC

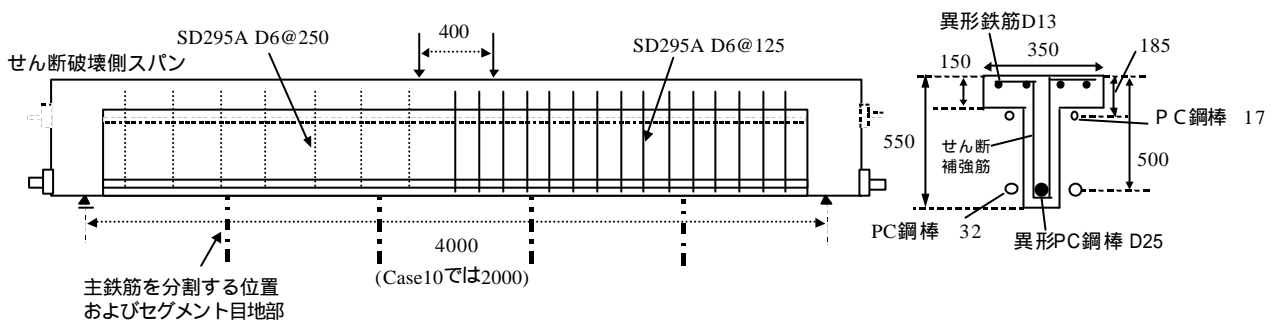


図 - 1 供試体寸法および配筋

供試体中央からヒンジ支点側には十分な量のせん断補強鉄筋を配置し、試験体中央からローラー支点側でせん断破壊性状を観察した。

2.2 荷重方法

図 - 1 に示すように、等曲げモーメント区間を 400mm とする 2 点荷重で油圧ジャッキによる静的荷重を行った。曲げひび割れ発生後除荷し、以後破壊まで荷重制御で荷重を行った。静的荷重はプレストレス導入後直ちに行った。

2.3 各供試体における着目点

Case-1 を標準供試体として、各供試体で着目する影響因子について説明する。Case-2 ~ Case-4 では、構造形式は一体であるが、主鉄筋のみ分割すること（分割位置で切断）、また主鉄筋がないことの影響を調べる。Case-5 ~ Case-9

では、コンクリート強度、プレストレス量の影響がパラメータである。Case-10 では、せん断スパン比に着目している。

Seg-1 ~ Seg-4 では、セグメント形式の供試体で、主鉄筋分割、主鉄筋がないこと、せん断補強筋、セグメント長などの影響について検討する。

最後に RC は、せん断補強のない RC 桁のせん断破壊試験である。

3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れ状況

図 - 2 に各供試体のひび割れ状況のうち、特徴的なものを破壊側のみについて示した。表 - 2 に示したように最終破壊が非常に脆性的なせん

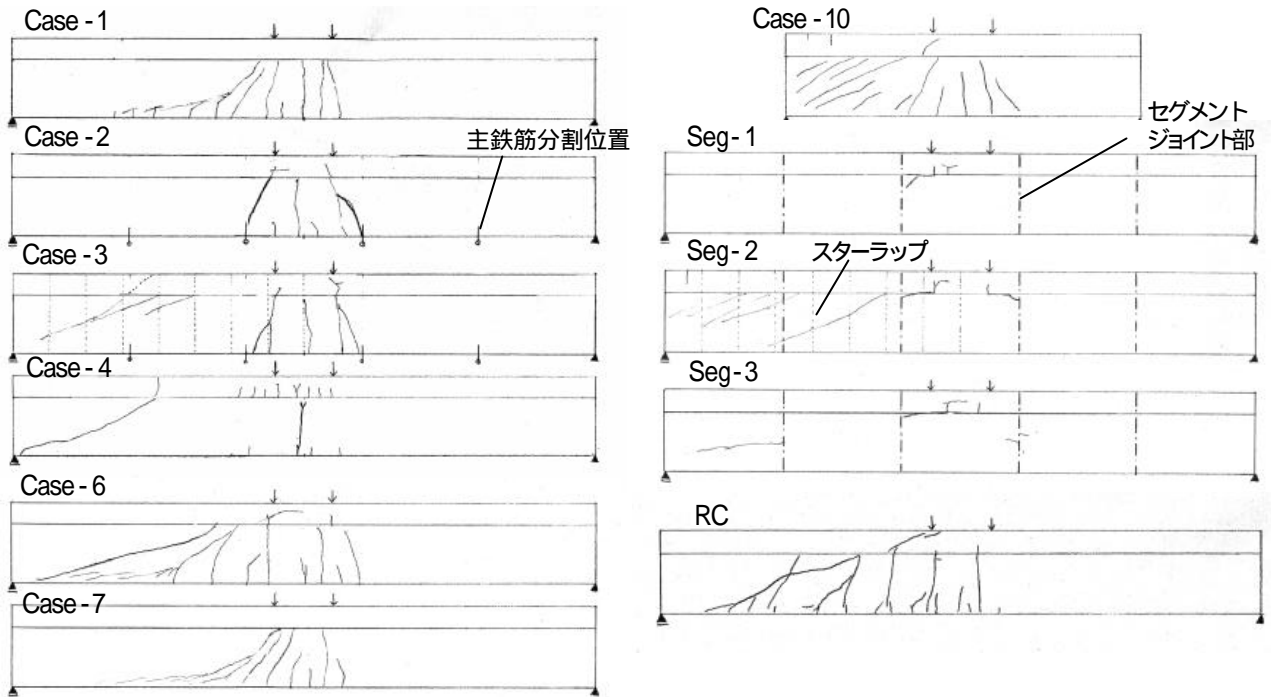


図 - 2 各供試体のひび割れ状況

表 - 2 実験結果一覧

供試体名	斜めひび割れ発生荷重 (KN)	最大荷重 (KN)	初期PC鋼棒ひずみ ($\times 10^{-6}$)	破壊時PC鋼棒ひずみ ($\times 10^{-6}$)	破壊時直前たわみ (mm)	最終破壊形態	着目点
Case-1	245	338	549	1515	13		基本供試体
Case-2		326	603	1972	17		主鉄筋分割
Case-3	382	414	610	2434	31		主鉄筋分割 + せん断補強筋
Case-4		340	568	2052	20		主鉄筋なし
Case-5	196	247	615	1161	10		コンクリート強度
Case-6	127	343	0 (0)	1117 (324)	22		プレストレス量
Case-7		403	1186 (4138)	1852 (4200)	8		プレストレス量
Case-8		363	621 (2074)	1479 (2238)	16		プレストレス量
Case-9		360	873 (3275)	1501 (3304)	12		プレストレス量
Case-10		383	577	979	4		せん断スパン比
Seg-1		324	558	2052	20		セグメント
Seg-2	333	448	683	2126	34		セグメント + せん断補強筋
Seg-3		355	594	1555	24		セグメント + 主鉄筋なし
Seg-4		84	615	751	11	セグメントの回転	セグメント長
RC	98	189			26	斜め引張破壊	RC



写真 - 1 破壊形態 - (Case-1)



写真 - 2 破壊形態 - (Case-3)

注 1) PC 鋼棒ひずみの()内の値は、図心位置 PC 鋼材のひずみ

注 2) 最終破壊形態については、3.2 で説明

断圧縮破壊となった供試体については、最終破壊時に瞬間的に発生したひび割れはここでは記していない。

脆性的な最終破壊時の荷重は、表 - 2 に示した。斜めひび割れが発生し、その後荷重が増加

して、最終破壊に至ったものもあった。これらについては、斜めひび割れ発生荷重を表 - 2 に示した。

図 - 2 に見られるように、RC では曲げひび割れが広く分散し、斜めひび割れが発生し、斜め

引張破壊した。しかし、その後荷重が増加し、載荷点と支点を結ぶ大きな破断面を形成し、脆性的な破壊をした。主鉄筋に沿う割裂破壊と定着破壊も伴ったため、最終的にはせん断圧縮破壊したと思われる。斜めひび割れ発生後の荷重の増加は、フランジの影響であると考えられる。

RC と似通った斜めひび割れが、最終となる前に発生したものは、Case-5 と Case-6 である。これらは、シリーズの中でプレストレスが比較的小さいものである。その他の供試体では、大きなプレストレス、セグメント、主鉄筋の分割、主鉄筋なしなどの影響によって RC で見られた斜めひび割れ発生が抑制されたことが分かる。Case-3, Seg-2 では、最終破壊の直前に斜めひび割れが分散して発生した。これは、RC とは異なり、せん断圧縮破壊のひび割れが、せん断補強筋によって分散され、やや脆性が緩和されたものである。

セグメント長を 400mm とした Seg-4 は、載荷過程で PC 鋼材を定着しているセグメントブロックが回転した。セグメント目地部のウェブ下端部や上フランジ部で局所的な破壊が生じ、非常に小さい荷重で破壊した。

主鉄筋分割、主鉄筋なし、セグメントなどの

要因は、曲げひび割れおよびせん断ひび割れの発生に非常に大きく影響したが、これらについては、3.3 で詳述する。

3.2 最終破壊性状

RC を除く、ほぼすべての供試体が非常に脆性的なせん断圧縮破壊をした。アーチ機構を形成したせん断圧縮破壊であることは、主鉄筋がある場合は主鉄筋に沿う割裂破壊と、主鉄筋の定着部付近での破壊が著しいことから伺えた。コンクリート強度の小さい Case-5、引張側と図心位置に PC 鋼材は配置したがプレストレスは与えていない Case-6 は、RC に似た斜めひび割れが発生した後にやや荷重が増加し、最終的にはせん断圧縮破壊した。

最終破壊形態は、RC と Seg-4 を除けば以下の 2 種類に分類できる。一つは、支点から、せん断スパンの中間点の上フランジ部へ斜めひび割れが突き抜けて破壊するものである（表 - 2 の中で破壊形態 - ，写真 - 1）。もう一つは、支点と載荷点を結ぶ斜めひび割れが発生するものである（破壊形態 - ，写真 - 2）

どちらの破壊形態にせよ、破壊時の耐力があまり変わらず、破壊荷重が圧縮強度に依存している。外ケーブルによるプレストレスなどの効果で斜めひび割れが抑制され、アーチ機構が形

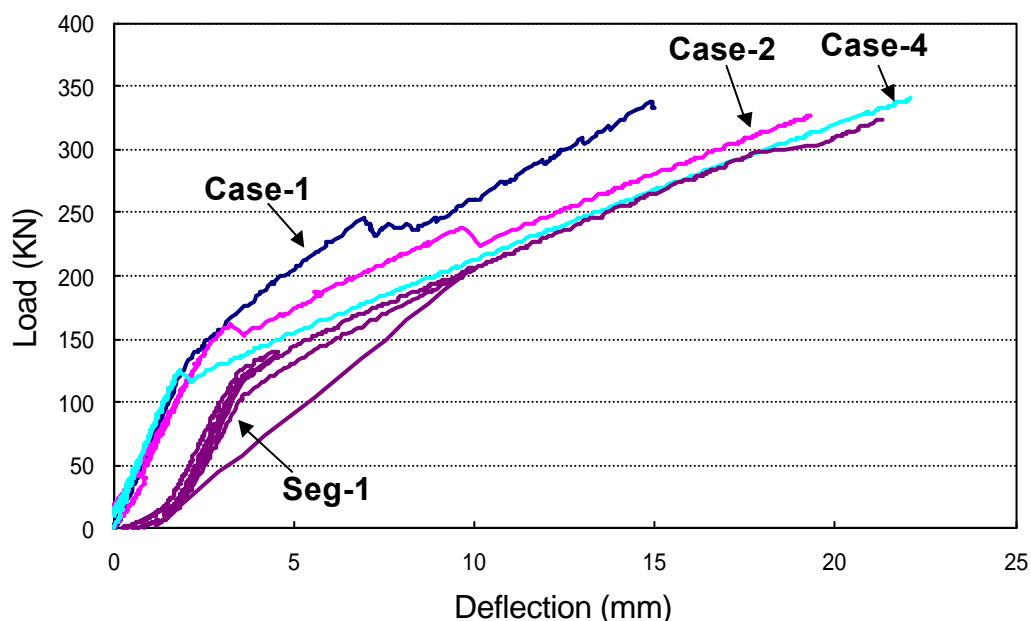


図 - 3 各供試体の荷重 - 変位関係

成されて、コンクリートの圧縮強度で決まるせん断圧縮破壊したのである。せん断耐力向上の点では外ケーブル方式のプレストレスは非常に有効であることが示された。また、せん断補強したものは、最終破壊荷重も大きく、アーチ機構が形成される場合においても、せん断補強筋は斜めひび割れを分散させる効果と耐力を向上させることが分かった。

3.3 せん断性状に及ぼす各種要因の影響

最終破壊形態がせん断圧縮破壊で、最大荷重に大きな違いが見られないことから、各種要因の及ぼす影響を定量的に議論することは難しい。しかし、ひび割れ発生状況などに各種要因の影響を見ることができた。

(1) 主鉄筋分割・有無

図 - 2 に見られるように、Case-2、Case-3 では、主鉄筋の分割位置に発生した曲げひび割れが大きく開いた。このため、せん断スパンには曲げひび割れが発生せず、斜めひび割れを生じにくくする効果があると思われる。主鉄筋がない場合 Case-4 では、曲げひび割れがスパン中央に大きいものが1本発生し、圧縮鉄筋の付近で曲げひび割れが分散した。これらの場合は、曲げひび割れが集中する無筋コンクリートのような性状を示す。その結果、斜めひび割れは発生しにくくなるが、図 - 3 に示すように、曲げひび割れ発生後の部材剛性は小さくなる。

(2) セグメントの影響

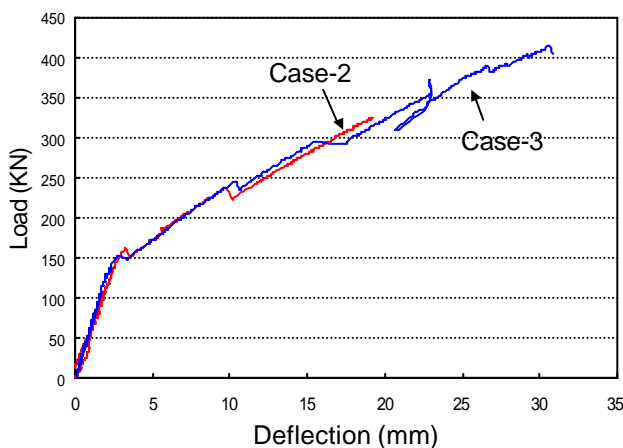


図 - 4 せん断補強筋の効果 1
(Case-2 と Case-3 の比較)

セグメント形式にした場合、曲げひび割れは特に発生せず、荷重の増加とともにセグメント接合部が開いた。ひび割れが集中するため、主鉄筋を分割した場合と同様に、斜めひび割れ発生を抑制する効果があると思われる。

図 - 3 に示すように、セグメント形式の場合（セグメント長 800mm）、荷重が小さい領域で変形が大きくなる傾向が見られる。これは、プレストレス導入時にセグメント目地部の上側が開いており、載荷初期段階に目地部の上側が閉じていることによると考えられる。目地の上部が閉じた以降は、一体打ち供試体の剛性とほぼ等しくなっている。一方で、セグメント長を 400mm とした場合は、セグメントが回転し、小さい荷重で最終破壊に至った。セグメント形式を使用する場合にこのような破壊形態は最も回避すべき状態である。適切なセグメント長、接合方法について今後検討が必要である。

(3) せん断補強筋の影響

図 - 4 および図 - 5 に示したように、一体打ち、セグメント形式のどちらにおいても、せん断補強筋によって最大耐力は大きく改善された。既述したように、せん断補強筋によって、最終破壊に至る斜めひび割れも分散して発生し、脆性が緩和された。

(4) プレストレスの影響

外ケーブル方式のプレストレスによってせん断耐力が大幅に改善されることが確認された。

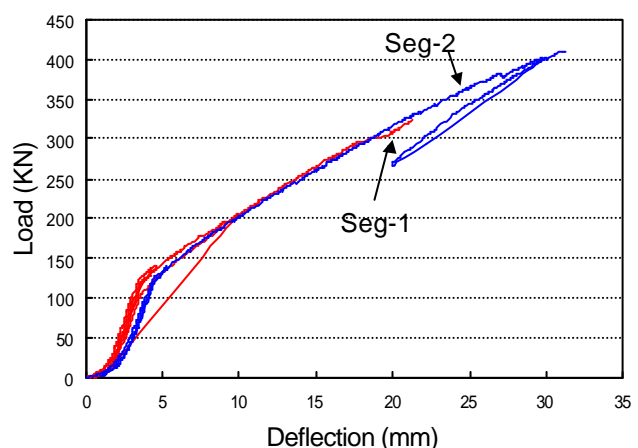


図 - 5 せん断補強筋の効果 2
(Seg-1 と Seg-2 の比較)

本研究では、最終破壊形態がせん断圧縮破壊となったため、RCの斜めひび割れ発生荷重と比較すると、PC桁の破壊荷重は3倍～4倍となっている。これは、プレストレスの効果に加えて、外ケーブルにはコンクリートとの付着がないこと、上フランジの影響などによると思われるが、今後定量的な評価が必要である。

(5) せん断スパン比

本研究では、せん断スパン比を変化させたことによる破壊形態の違いは特に見られなかった。

3.4 せん断耐力に関する考察

RCの斜めひび割れ荷重は、せん断補強鉄筋を配置していないコンクリート梁のせん断耐力を精度よく算定するとされている二羽らの式⁴⁾による計算値とほぼ一致した(式(1))。計算によるせん断破壊時の荷重は83.6kNであった。しかし、実験では、その後約2倍にまで荷重が増加している。通常、3.6程度のせん断スパン比では、斜めひび割れの発生とともに斜め引張破壊するが、上フランジの影響が非常に大きいためせん断圧縮破壊に移行したと思われる。この実験シリーズでは、上フランジが大きく影響している可能性があると思われる。

$$V_{cd} = f_{vcd} b_w d \quad (1)$$

$$f_{vcd} = 0.2(100 p_c f'_c)^{1/3} d^{-1/4} [0.75 + 1.4(a/d)]$$

(記号については参考文献参考)

4. まとめ

外ケーブル方式を用いたPC桁のせん断破壊性状について実験的に検討を行った。せん断破壊性状に及ぼす、セグメント、プレストレス量、主鉄筋の分割、主鉄筋の有無、せん断補強筋など各種要因の影響について分析を行い、下記に示す事項が実験より明らかになった。

(1)外ケーブルによる補強で、せん断耐力は大きく向上する。せん断スパン比が3.6においてもアーチ機構が形成され、破壊荷重が格段に向上した。ただし、プレストレスだけでなくフランジの影響もあると思われる。

- (2)セグメント形式の場合も、一体打ちとほぼ同じ破壊荷重となった。载荷のごく初期にたわみが大きくなることが分かった。これは、プレストレス導入時にセグメント目地部の上側が開いており、载荷初期段階に目地部の上側が閉じていることによると考えられる。また、セグメント長が短い場合に、不安定な挙動を示した。
- (3)主鉄筋の分割や、主鉄筋がないことによって曲げひび割れが局所化した。斜めひび割れは発生しにくくなるが、部材のたわみは大きくなった。
- (4)一体打ち、セグメント形式の両方において、せん断補強筋を配置することで、破壊荷重が大幅に改善され、斜めひび割れが分散することで最終破壊の脆性さが緩和された。

参考文献

- 1) 睦好宏史，山口統央，MATUPAYONT Songkiat，徳山清治：プレキャストセグメントを用いた外ケーブル式PCはりの曲げ性状および靱性改善に関する研究，土木学会論文集，No.544，V-32，pp.155-165，1996.8
- 2) 伊藤忠彦，山口隆裕，池田尚治：プレキャストセグメントはりの曲げせん断特性に関する実験的研究，プレレストコンクリート，Vol.39，No.1，pp.83-96，1997.1
- 3) 新津正義，睦好宏史，佐野正，殿川康一：外ケーブルを用いた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報告集，Vol.21，No.3，pp.949-954，1999
- 4) 二羽淳一郎，山田一宇，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372 V-5，pp.167-176，1986.8