

(104) 外ケーブルP Cはりのせん断耐力に関する実験的研究

住友建設(株)P C設計部	正会員	○平 喜彦
住友建設(株)技術研究所	正会員	藤田 学
住友建設(株)技術研究所	正会員	梅津健司
住友建設(株)P C設計部	正会員	益子博志

1. はじめに

外ケーブル構造ではコンクリートとP C鋼材に付着がなく両者の間に平面保持の仮定が成立しないために、終局曲げ耐力の算定にあたっては、部材の変形に伴う外ケーブル張力の変化量を適切に評価する必要がある。一方外ケーブル構造のせん断耐力に関しては、プレストレス力によってせん断耐力が増加するとの報告があるものの^{1),2),3),4)}、それに関する研究はまだ少なく、外ケーブル構造のせん断挙動が内ケーブル構造と比較して、どのように異なるかは十分に把握されているとは言い難い。

このため本研究では、コンクリート部材断面内へのP C鋼材の配置の有無、および導入プレストレス量の違いがP Cはりの終局せん断耐力に与える影響に着目した実験的研究を行った。

2. 実験概要

供試体の寸法を図-1に示す。供試体の種類は、内ケーブル供試体、外ケーブル供試体、さらにせん断耐力に及ぼすプレストレスの影響に着目するために、内ケーブル供試体とP C鋼材は同一配置であるが、プレストレスを導入せずにグラウトしたRC供試体の3体とした。すべての供試体とも、断面はT桁の同一断面形状とした。

供試体の寸法は桁長10m、支間長8mとし、桁高は0.92mである。さらに、せん断支間長a(支点から載荷点までの距離)は3.2m、有効高さdは0.8mとし、せん断支間比(a/d)は4.0としている。またP C鋼材は、曲げ上げることなく直線配置とした。外ケーブル供試体においてデビエータは、支間に2箇所、それぞれ支間中央から左右に1.05mずつ離れた位置に配置した。

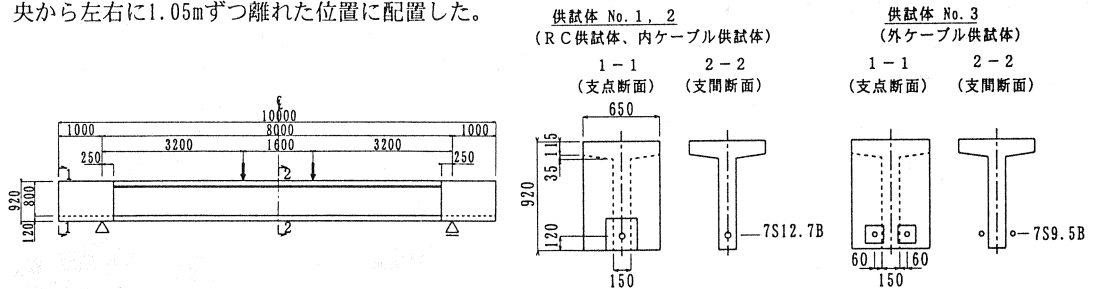


図-1 供試体寸法

P C鋼材は、外ケーブル供試体には断面の外に7S9.5B($A_p=383.9\text{mm}^2$)を2本、内ケーブル供試体には断面内に7S12.7B($A_p=691.0\text{mm}^2$)を1本配置し、両者のP C鋼材配置断面積がほぼ等しくなるようにした。なおいずれの供試体においてもせん断支間内にはスターラップを配置しないこととした(図-2)。

供試体の設定では、内ケーブル供試体は計算上せん断破壊するようにプレストレス量を設定し、外ケーブル供試体では内ケーブル供試体のプレストレス量に合わせることで、初期応力状態を等しくしている。有効プレストレス量は、支間中央におけるプレストレスによるコンクリートの圧縮応力度が、内ケーブル供試体、外ケーブル供試体とも $\sigma_i=4.9\text{N/mm}^2$ (50kgf/cm^2)となるように設定した。

実験に用いた供試体の諸元および材料特性を表-1に、使用鋼材の材料特性を表-2に示す。

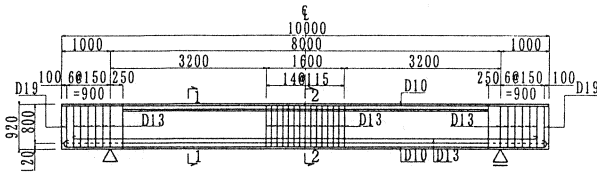


図-2 鉄筋配置要領

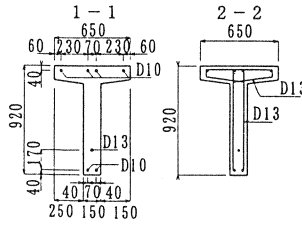


表-1 供試体諸元および材料特性

供試体	コンクリート			グラウト 圧縮強度 (N/mm ²)	PC鋼材	有効 プレストレス力	鉄筋比
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)				
R C 供試体	48.0	3.41	35930	44.6	7S12.7B	0kN	0.22%
内ケーブル供試体	45.8	3.32	37230	44.6	7S12.7B	279kN	0.22%
外ケーブル供試体	47.9	3.23	35903	—	7S9.5B×2	115kN×2	0.22%

表-2 使用鋼材の材料特性

鋼材	鋼材断面積 (mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	
鉄筋	D10(SD34S)	71.33 × 6	409	559	1.92 × 10 ⁴
	D13(SD34S)	126.7	383	556	1.83 × 10 ⁴
PC鋼材	7S9.5B	383.9 × 2	1750	1938	1.88 × 10 ⁴
	7S12.7B	691.0	1787	1986	1.88 × 10 ⁴

3. 実験結果および考察

3.1 各供試体の性状

図-3に各供試体のひび割れ状況と最終破壊箇所を示す。

R C 供試体では、純曲げ区間のコンクリート下縁に載荷荷重 $P=35\text{kN}$ で曲げひび割れが発生した。その後せん断支間にも曲げひび割れが発生し、 $P=140\text{kN}$ より曲げひび割れが斜め上方に傾斜し始めた。 $P=150\text{kN}$ で最下縁の引張鋼材である鉄筋D10が降伏した後に、 $P=215\text{kN}$ で支間に入っていたひび割れ群の最も左側(外側)の曲げひび割れが、急速に上フランジまで到達する斜めひび割れに進展した。この時荷重 P が20kNほど低下し、載荷を継続しようとしたところ、斜めひび割れがはり上縁の載荷板(幅15cm)左側に突き抜けて、脆性的に耐荷力を失った。このように破壊形態は典型的な斜め引張破壊であった。なお破壊時には、PC鋼材7S12.7Bは未降伏であった。

内ケーブル供試体では、純曲げ区間のコンクリート下縁に $P=122\text{kN}$ で曲げひび割れが発生した。その後 $P=180\text{kN}$ 以降にせん断支間にも曲げひび割れが発生し、 $P=205\text{kN}$ で曲げひび割れが斜め上方に傾斜し始めた。 $P=255\text{kN}$ で支間のひび割れ群の左側に新たな斜めひび割れが発生した直後、荷重が25kNほど低下した。この時よりPC鋼材7S12.7Bの下側に、鋼材に沿って付着割裂ひび割れが発生し始めた。その後、斜めひび割れが徐々に開口するとともに、付着割裂ひび割れの発生範囲がさらに外側に拡がりながら、荷重と支間たわみは、直線的な関係で増え続けた。 $P=557\text{kN}$ で支間左側の斜めひび割れが載荷板直下に突き抜け、斜め引張破壊した。なお、破壊に至るまでに鉄筋D10およびD13は既に降伏していたが、PC鋼材は未降伏であった。

外ケーブル供試体は、純曲げ区間に $P=122\text{kN}$ で曲げひび割れが発生したが、内ケーブル供試体と異なりせん断支間にはひび割れは発生しなかった。その後、荷重増加とともに曲げひび割れが進展し、最終的には

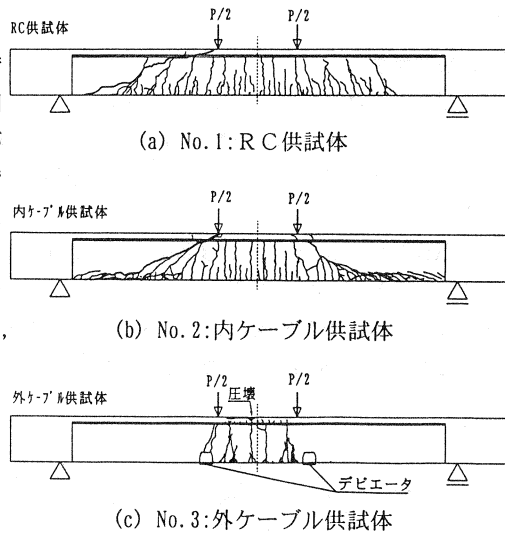


図-3 ひび割れ状況および破壊箇所

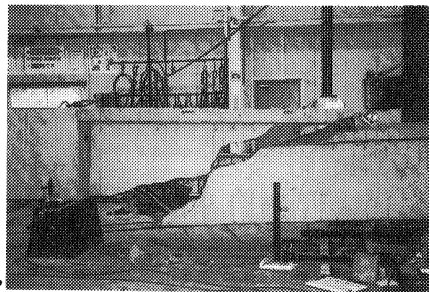


写真-1 R C 供試体破壊状況

P=623kNで支間中央のコンクリート上縁が圧壊する曲げ破壊となった。なお内ケーブル供試体と同様に、鉄筋D10およびD13は破壊に至るまでに既に降伏していたが、PC鋼材は未降伏であった。写真1~3に各供試体の最終破壊状況を示す。

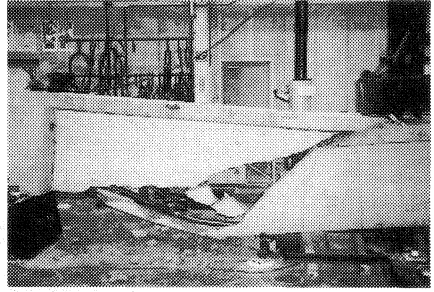


写真-2 内ケーブル供試体破壊状況

3.2内ケーブル供試体におけるタイドアーチ機構

内ケーブル供試体では、斜めひび割れ発生後に荷重-変位曲線の勾配が緩やかになったが、その後斜めひび割れ幅が徐々に広がるとともにせん断支間に斜め圧縮ストラットが形成されるタイドアーチ的機構となり、再び荷重-変位曲線が直線的に増加した。

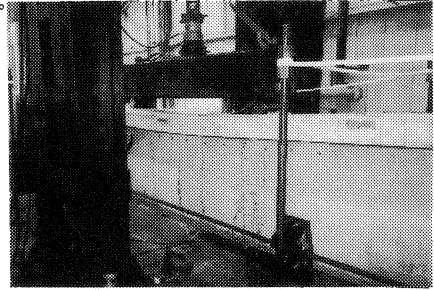


写真-3 外ケーブル供試体破壊状況

図-4には、内ケーブル供試体のせん断支間において、斜めひび割れが発生した位置の外側(端支点側)におけるコンクリートの主圧縮応力度と載荷荷重の関係を示している。図中の各データに記されている番号は、着目位置を表す図中のコンクリートひずみの計測位置に対応している。

図より内ケーブル供試体では、載荷点と端支点とを結ぶ対角線近傍で、斜めひび割れ発生(P=255kN)以降に圧縮応力度の増加が顕著になっており、斜めひび割れに沿ってコンクリートに斜め圧縮ストラットが形成されていることがわかる。

これに対してRC供試体では、斜めひび割れ発生付近のコンクリートの主圧縮応力度が大きく増加することなく、斜めひび割れ発生直後に斜め引張破壊に至っている。

以上よりプレストレスを与えた供試体では、斜めひび割れ発生以降においてタイドアーチが形成され、構造系全体としての耐荷機構へ移行し、耐力が向上したことがわかる。

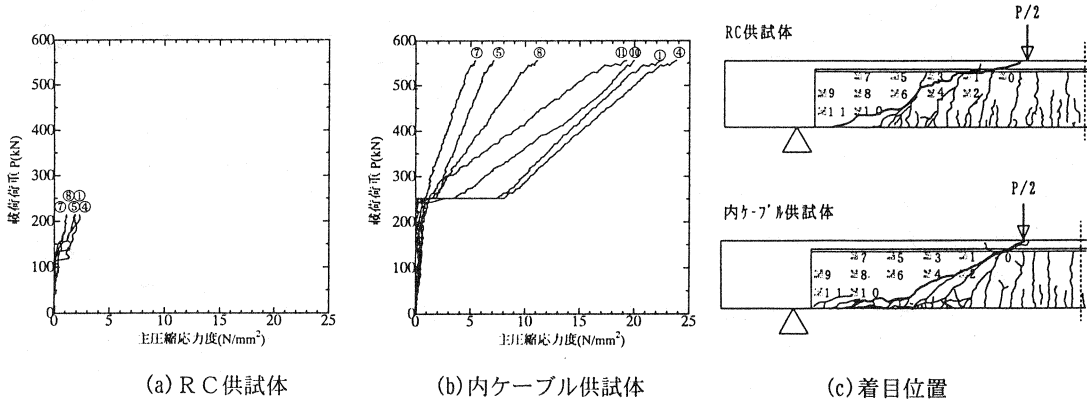


図-4 斜めひび割れ近傍の主圧縮応力度

3.3解析結果との比較

荷重と支間中央たわみの関係を図-5に、荷重と支間中央コンクリートの上縁圧縮ひずみの関係を図-6に示す。ここで、図中における解析値は、断面をファイバーモデルに置き換え、材料非線形性と幾何学的非線形性を同時に考慮した非線形骨組解析により求めたものである⁹⁾。解析において入力したコンクリートおよび鋼材の応力-ひずみ関係は、材料試験結果をトリリニアカーブに近似したものを使用した。また、外ケーブル供試体の解析においては、外ケーブルを構造部材としてモデル化している。ただし本解析においては、せ

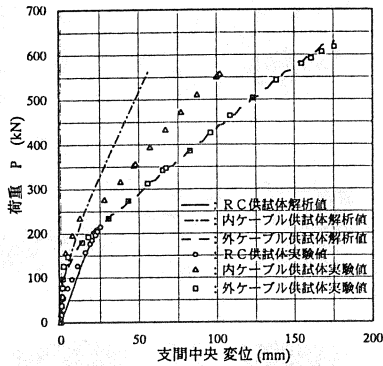


図-5 荷重と支間中央たわみの関係

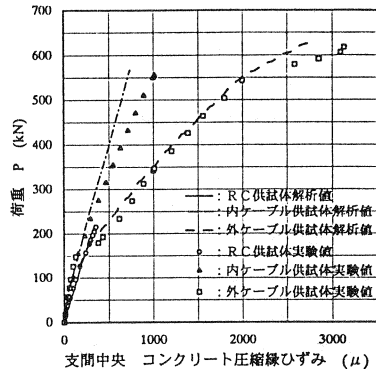


図-6 荷重と支間中央コンクリート
圧縮ひずみの関係

ん断ひび割れに伴う変形増加量については考慮されていない。

図からわかるように、RC供試体および外ケーブル供試体では、変位と荷重の関係はいずれも解析値と実験値はよく一致している。一方内ケーブル供試体では、斜めひび割れが発生する $P=255\text{kN}$ 近傍までは解析値とよく一致しているが、その後は斜めひび割れ幅が増加したことにより両者は一致していない。

実験結果と解析値との比較を表-3に示す。表中RC供試体と内ケーブル供試体に示している破壊時の解析値は、後述する既往の研究成果に基づくせん断耐力より求めたものを、外ケーブル供試体においては非線形解析より求めた曲げ破壊時の荷重を示している。表からわかるように曲げひび割れ発生荷重は、3供試体いずれにおいても、円柱供試体の引張強度を用いて解析した結果とほぼ等しい値であった。また、外ケーブル供試体の曲げ耐力については、実験結果と非線形解析結果とはよく一致している。以上より、曲げに関してはひび割れ発生荷重および終局耐力ともに比較的精度よく評価できていることがわかる。

表-3 実験結果一覧

供試体	荷重 P (kN)			破壊荷重	破壊性状
	曲げひび割れ発生荷重	斜めひび割れ発生荷重	せん断耐力		
RC供試体	実験値	35	215	215	斜めひび割れ発生直後に斜引張破壊
	解析値	33	—	173	
内ケーブル供試体	実験値	122	255	557	斜めひび割れ発生後にクイドアーチの耐荷機構となり斜引張破壊
	解析値	121	—	239	
外ケーブル供試体	実験値	122	—	623	斜めひび割れは発生せず支間中央で曲げ破壊
	解析値	121	—	668	

表-4 プレストレスによる斜めひび割れ発生
荷重とせん断耐力の増加量

3.4プレストレスの影響

RC供試体と内ケーブル供試体では導入プレストレス量のみを変化させたが、RC供試体と比較して内ケーブル供試体では斜めひび割れ発生荷重および破壊荷重が増加した。表-3におけるRC供試体のせん断破壊時の解析値としては、既往のせん断耐力算定式⁶⁾を用いた破壊荷重として示している。一方内ケーブル供試体のせん断耐力算出にはプレストレスによるせん断耐力の増加量を考慮する必要がある。既往の研究によるとこの耐力増加量として、デコンプレッションモーメントをせん断支間で除した値に係数を乗じたものを用いているが、それらは概ね $1.0M_0/a \sim 2.0M_0/a$ と報告されている^{6), 7), 8)}。このためここでは M_0/a に乗ずる係数として 1.5 として算出している。

表より実験結果と解析値を比較すると、RC供試体、内ケーブル供試体のいずれにおいても実験から得られたせん断耐力は、既往のせん断耐力式から導かれた解析値を上回ったものとなった。表-4より本実験では、プレストレスによる斜めひび割れ発生荷重または破壊荷重(せん断耐力)の増加量は、前者が $0.45M_0/a$ と比較的小さい値であったが、後者は $3.9M_0/a$ という大きな結果が得られた。これより本実験においても、従来

		せん断耐力 ^{*)} (kN)	備考
内ケーブル供試体	V_{PC-1}	143	斜めひび割れ発生時
	V_{PC-2}	294	破壊時
RC供試体	V_{ac}	123	
M_0/a		44	
斜めひび割れ発生時	$V_{PC-1}-V_{ac}$	20	$=0.45M_0/a$
破壊時	$V_{PC-2}-V_{ac}$	171	$=3.9M_0/a$

*1: 自重および載荷装置重量を含む

の研究成果と同様に、プレストレスを導入した供試体はせん断耐力が向上することが確認された。

3.5 P C鋼材の付着の有無がせん断挙動に及ぼす影響

既往の研究⁹⁾によると、両端で十分に定着された付着のない引張主鉄筋を有するRC単純はりでは、腹部コンクリートに斜めひび割れが発生せず、強固なアーチリブを持つ残存アーチ機構によりせん断耐力が向上することが述べられている。本実験においても外ケーブル供試体では、せん断支間にひび割れが発生せずにせん断破壊することなく曲げ破壊に至っており、既往の研究成果と合致している。

図-7は、内ケーブル供試体と外ケーブル供試体とで、載荷荷重Pが200kN以上600kN以下における同一荷重点での断面のひずみ分布の比較を模式的に示したものである。ここではコンクリートの圧縮縁ひずみ ϵ_c や曲率 ϕ 、および引張鋼材の張力Tについて、内、外ケーブル供試体相互の大小関係を記している。

図に示したように、純曲げ区間に着目すると、両者のTはほぼ等しいものの、内ケーブル供試体と比較して外ケーブル供試体の方が、 ϵ_c 、および ϕ いずれも卓越するために、載荷荷重Pが小さいうちにコンクリートの圧縮縁ひずみが終局ひずみに到達しやすく、従って曲げ破壊しやすい構造であることがわかる。

一方、せん断支間に着目すると、外ケーブル供試体の張力Tは純曲げ区間の張力と同一となるために、内ケーブル供試体の張力より大きく、そのため ϵ_c 、 ϕ が小さく抑えられている。すなわち、外ケーブル供試体のせん断支間では、外ケーブルの張力が増加することにより曲げひび割れが入りにくくなっていることが分かる。

以上について非線形解析を用いて、支間中央およびせん断支間中央における内、外ケーブル張力の解析値を比較したものを図-8に、同様にコンクリート圧縮縁ひずみの解析値を比較したものを図-9に示す。

図より前述の概念図で示した通り、同一荷重点でのケーブル張力は両者でほぼ等しくなる一方、外ケーブル供試体では、支間中央の純曲げ区間での外ケーブル張力が、ケーブル配置区間全長にわたって一定となるため、せん断支間においては外ケーブル張力の方が大きくなっていることがわかる。このため、せん断支間においては、外ケーブル供試体では、ケーブルを介して軸力が導入され、荷重作用による正の曲げが低減されるとともに、これによりせん断耐力が向上したと考えられる。

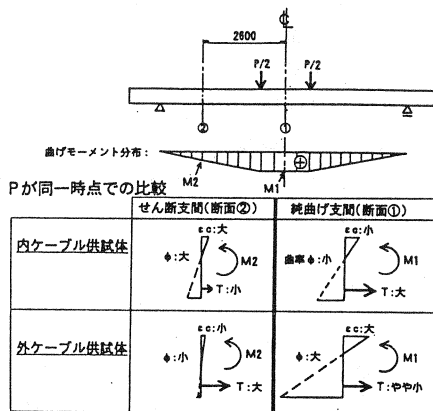


図-7 ひずみ分布の比較概念図

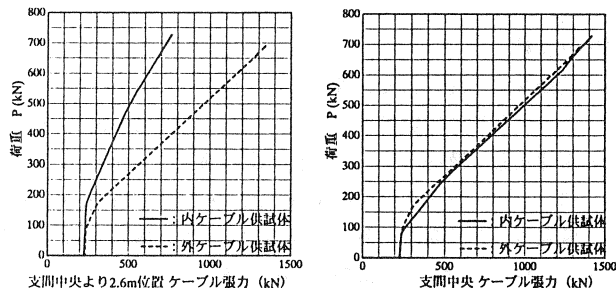


図-8 着目断面におけるP C鋼材張力の比較

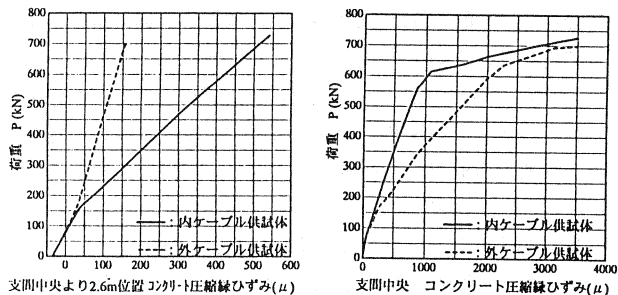


図-9 着目断面におけるコンクリート圧縮縁ひずみの比較

4. まとめ

本実験で得られた知見をまとめると以下の通りである。

①各供試体の破壊性状

R C 供試体の破壊形態は、斜めひび割れ発生直後に耐荷力を失う典型的な斜め引張破壊であった。一方内ケーブル供試体の破壊形態が斜め引張破壊によるせん断破壊型であったのに対して、内ケーブルと初期応力状態および鋼材量をほぼ等しくした外ケーブル供試体の破壊形態は曲げ破壊型となった。

②内ケーブル供試体の耐荷機構

内ケーブル供試体は、斜めひび割れ発生後、載荷近傍と支点間に斜め圧縮ストラットが形成されるタイドアーチ的な耐荷機構へと移行し、構造系全体として耐荷力が向上した。

③プレストレスの影響

はりのせん断耐力に及ぼすプレストレスの影響として、R C 供試体に対する内ケーブル供試体のせん断耐力の増加量を、デコンプレッションモーメントをせん断支間で除した値 (M_0/a) に係数を乗じたもので表すと、斜めひび割れ発生荷重は $0.45M_0/a$ 、斜引張破壊荷重は $3.9M_0/a$ という実験結果となった。

④外ケーブルの張力増加量の影響

外ケーブル供試体では、曲げモーメントが最大となる純曲げ区間で必要とされた外ケーブルの張力が、その配置区間全長にわたりほぼ一定に生じる。このため外ケーブル供試体は内ケーブル供試体に比べ、せん断支間において張力増加量が大きく、はりの外ケーブル位置に軸圧縮力が導入されることとなる。その結果、せん断支間での曲げひび割れや斜めひび割れの発生が抑制され、せん断耐力が増加したと考えられる。

〔参考文献〕

- 1) 近藤悦郎, 睦好宏史, 高橋博威, 佐野正: 外ケーブルによるせん断補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp. 1015-1020, 1994
- 2) 新津正義, 睦好宏史, 佐野正, 殿川康一: 外ケーブルを用いた R C 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
- 3) 鄭慶玉, 松井繁之: 外ケーブルのせん断補強効果に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 385-390, 1998
- 4) 三方康弘, 井上晋, 小林和夫, 仁枝保: せん断補強筋のない P C はり部材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 319-324, 1998
- 5) 玉置一清, 新井英雄, 板井栄次, 山崎淳: 非線形解析プログラムの外ケーブル構造の適用と今後の標準化について, プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集, pp. 309-314, 1995
- 6) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いない R C はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 372 号/V-5, pp. 167-176, 1986
- 7) 建設省土木研究所: 高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書, 1995
- 8) 鳥取誠一, 涌井一: プレストレストコンクリートはりのせん断耐力, プレストレストコンクリート技術協会第3回シンポジウム論文集, pp. 5-8, 1992
- 9) 池田尚治, 宇治公隆: 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 293 号, pp. 101-109, 1980