

論文 内・外ケーブル方式 PC 単純はりのせん断耐力特性

高木康宏¹⁾・梅津健司²⁾・平喜彦³⁾・水野克彦⁴⁾

要旨：引張鋼材の内外配置や付着の有無，プレストレス量をパラメーターにした大型の単純 T 形はり 6 体について，静的載荷実験および非線形解析を実施した。その結果，主たる引張鋼材にコンクリートと付着のある鋼材を用いた供試体がせん断破壊したのに対し，外ケーブルやアンボンド鋼材を用いた供試体はプレストレスの有無に関わらず，全て粘りのある曲げ破壊となり，高い耐力とエネルギー吸収性能を示した。これより緊張材または引張鋼材の付着の有無がはりのせん断挙動に与える影響について考察した。

キーワード：外ケーブル，せん断耐力，付着，プレストレスコンクリート

1. はじめに

外ケーブル方式のプレストレスコンクリート(以下，PC)棒部材のせん断耐力特性については，多くの機関により研究途上であり，まだ明確にされていない。また棒部材の既往のせん断耐力評価式は，付着のある鋼材を用いたはりを主に想定しており，それによって算定したせん断耐力を外ケーブル方式のはりに適用した場合，安全側を与えるか否かについても把握されていない。そこで本研究ではそれらに関する基本的特性を得るために，プレストレスを同一とした内ケーブル供試体および外ケーブル供試体について静的載荷実験を行い，両者の破壊に至るまでの挙動や耐力の違いに着目した研究

を行った。

本研究の一部は既報¹⁾に報告したが，その後，緊張材のプレストレス量をパラメーターにした供試体や，内ケーブルに付着がない供試体についても追加して実験したので，それらの結果を総括することによって得られた知見について報告する。

2. 供試体の概要

供試体は断面が T 形の単純はりであり，寸法や載荷位置を図-1 に示す。せん断支間長(支点から載荷点までの距離: $a=3.2\text{m}$)と有効高さ($d=0.8\text{m}$)の比(a/d)は 4.0 とした。PC 鋼材は直線配置とした。外ケーブル供試体にお

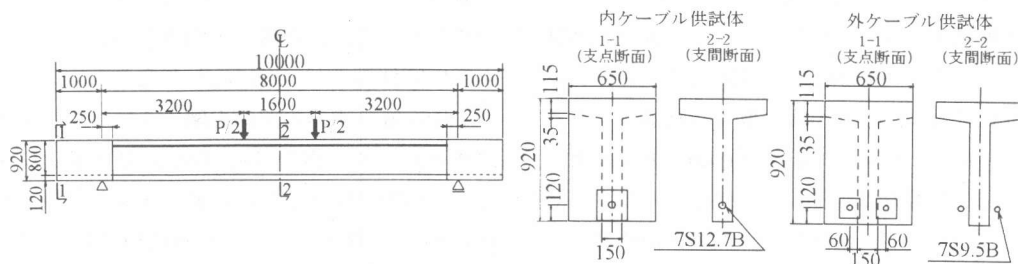


図-1 供試体寸法

- *1 住友建設 (株) 技術研究所 工修 (正会員)
- *2 住友建設 (株) 技術研究所主任研究員 (正会員)
- *3 住友建設 (株) PC 設計部課長代理 工修
- *4 住友建設 (株) PC 設計部主任 工修

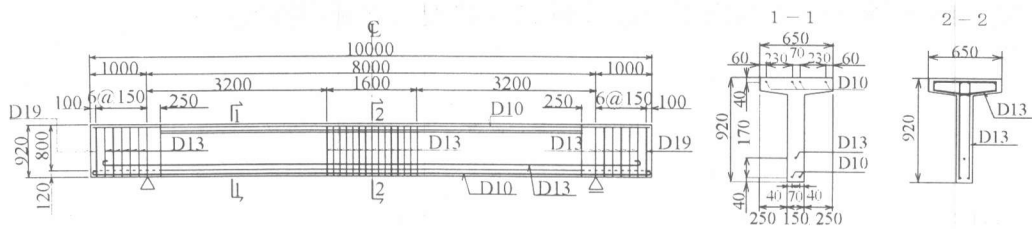


図-2 鉄筋配置要領

るデビエータは、支間に二ヶ所、それぞれ支間中央から左右に 1.05 m ずつ離れた位置に配置した。これは、載荷によりはりがたわんできたとき、外ケーブルの偏心が大きくなり減少することを防ぐために配置したものである。

PC鋼材は、内ケーブル供試体にはウェブ内に 7S12.7B を 1 本配置し、外ケーブル供試体にはウェブの外に 7S9.5B を 2 本配置しており、両者の配置断面積はほぼ等しくなるようにした。また全供試体において、せん断支間にスタラップは配置していない(図-2)。いずれの供試体も、土木学会コンクリート標準示方書²⁾により算定した曲げ耐力よりせん断耐力を低くし、せん断破壊が先行するように設計している。

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。供試体記号の"IN-"は主たる引張鋼材に内ケーブルを用いた供試体、"EX-"は外ケーブルを用いた供試体であることを意味する。IN-1、EX-1のプレストレス力(σ_m)は、はり下縁に導入されるプレストレス(σ_m)が 4.9N/mm²(50kgf/cm²)となるように設定したものである。コンクリートおよびセメントペーストグラウトの強度は、静的載荷実験日におけるものである。

載荷方法は、変位制御とし、最初に曲げひび割れ発生まで載荷してから一旦除荷し、その後破壊するまで漸増載荷を行った。

3. 実験結果および考察

表-1 供試体諸元およびコンクリート、グラウトの強度試験結果

供試体記号	PC鋼より線	有効プレストレス力(kN)	グラウトの有無	コンクリート				グラウト圧縮強度(N/mm ²)
				圧縮強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)	ポアソン比	
IN-1	7S12.7B	229	有り	45.8	3.32	37230	0.188	44.6
IN-2	7S12.7B	83	有り	50.6	3.16	37300	0.187	47.6
IN-3	7S12.7B	0	有り	48.0	3.41	35930	0.185	44.6
IN-4	7S12.7B	0	無し	47.4	3.37	37650	0.203	-
EX-1	7S9.5B × 2	115 × 2	-	47.9	3.23	35900	0.191	-
EX-2	7S9.5B × 2	0	-	50.3	3.51	35620	0.184	-

表-2 使用鋼材の材料特性

	鋼材	鋼材断面積(mm ² /本)	降伏点(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)
鉄筋	D10(SD345)	71.33	409	559	192000
	D13(SD345)	126.7	383	556	183000
PC鋼より線	7S9.5B	383.9	1750	1938	188000
	7S12.7B	691.0	1787	1986	188000

3.1 各供試体の性状

表-3に実験結果および各供試体の破壊性状を示す。全ての供試体において、曲げひび割れの発生荷重は、円柱供試体による引張強度を用いた計算値にほぼ一致した。斜めひび割れ発生荷重とは、斜めひび割れが顕著に進展したときの荷重であり、これは荷重-たわみ曲線(図-3)における荷重の落下時に符合しているものである。また、荷重と支間中央の上フランジ上面に貼付したゲージにより測定したコンクリート圧縮縁ひずみの関係を図-4に示す。全供試体において、引張鉄筋(D10,D13)は破壊に至るまでの間に降伏したが、PC鋼より線は破壊時において降伏ひずみ(試験成績書における0.2%永久伸びに対応するひずみ)0.0115に到達しておらず、未降伏であった。

図-5に各供試体の最終ひび割れ状況と破壊箇所、また IN-1,2,3 に関して、破壊に直結した斜めひび割れを太線で示し、その発生位置および角度を表-3に示す。発生位置は、斜めひ

表-3 実験結果一覧

供試体		荷重 P(kN)			斜めひび割れ			PC鋼より繰ひずみ			破壊性状
		曲げひび割れ発生荷重	斜めひび割れ発生荷重	破壊荷重	発生位置(mm)	発生角度(°)		有効プレストレス	増加量	破壊時合計	
						以下	以上				
IN-1	実験値	122	255	557	700	21	23	0.00176	0.00605	0.00781	斜めひび割れ発生後に強固なタイドアーチ機構を発揮し、荷重に耐え続け、最終的に斜め引張破壊した。
	計算値	121	—	—	—	—	—	—	—	—	
IN-2	実験値	60	216	249	1030	49	16	0.00230	0.00064	0.00294	斜めひび割れが発生しても、すぐ壊れることはなかったが、少しの耐荷力上昇の後、斜め引張破壊した。
	計算値	60	—	—	—	—	—	—	—	—	
IN-3	実験値	35	215	215	1400	57	15	0	0.00216	0.00216	斜めひび割れ発生直後に斜め引張破壊した。
	計算値	33	—	173	—	—	—	—	—	—	
IN-4	実験値	40	—	595	—	—	—	0	0.00930	0.00930	純曲げ支間において発生した曲げひび割れが進展するばかりで、せん断支間に斜めひび割れは発生しなかった。最終的には、載荷点間のフランジ上縁コンクリートの圧縮破壊によって曲げ破壊した。
	計算値	32	—	618	—	—	—	—	—	—	
EX-1	実験値	122	—	623	—	—	—	0.00159	0.00600	0.00759	
	計算値	121	—	668	—	—	—	—	—	—	
EX-2	実験値	45	—	548	—	—	—	0	0.00630	0.00630	
	計算値	34	—	667	—	—	—	—	—	—	

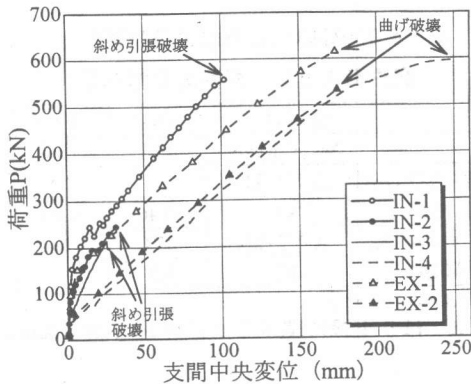


図-3 荷重と支間中央たわみの関係

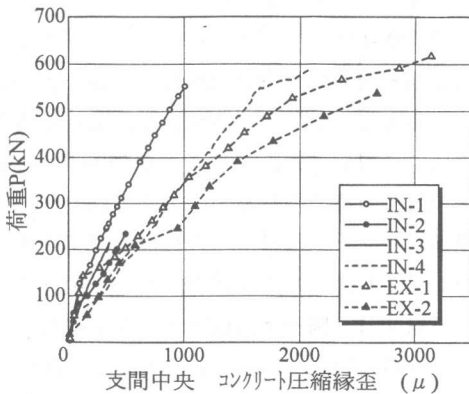


図-4 荷重と支間中央コンクリート圧縮縁ひずみの関係

び割れがはり図心(上縁より 332mm 下がり)を通過する断面の、載荷点からの距離を示した。IN-2,3 では、破壊に直結することになる斜めひび割れが、はり図心まで到達した後、それまで

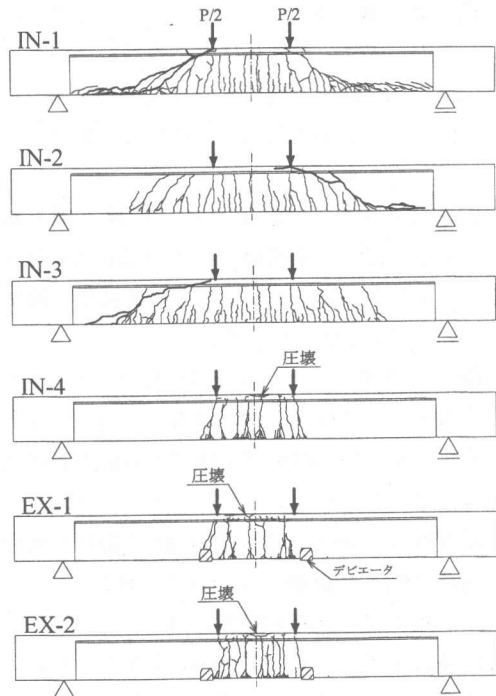


図-5 最終ひび割れ状況

より鋭角方向に角度を変えて進展した。よって、図心より下側と上側とで、斜めひび割れの角度が大きく異なったので、表-3では両者を記した。引張鋼材とコンクリートとに付着がある供試体 (IN-1,2,3) は、斜めひび割れが、IN-1,2 では載荷板直下、IN-3 では載荷板外側(支点側)におけるフランジ上縁に突き抜けて斜め引張破壊した。一方、付着のない供試体 (IN-4,EX-1,2) は全て曲げ破壊した。また図-

3より分かるように曲げ破壊した供試体は、斜め引張破壊した供試体に比べて、高い耐力とエネルギー吸収を示した。

なお表-3の破壊荷重の計算値は、IN-3は二羽らの提案式³⁾によるせん断耐力、IN-4, EX-1, 2はファイバーモデルを用いた非線形解析⁴⁾による曲げ耐力から求めた荷重である。解析は、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮しており、曲げ耐力の値は、コンクリートの終局ひずみが、0.0035に到達したときとした。

3.2 プレストレスの影響

図-5、表-3より分かるように、プレストレス力が増える供試体ほど、斜めひび割れの発生位置はせん断支間において載荷点に近く、はり図心より下側の斜めひび割れは、角度が緩やかであった。

破壊荷重とプレストレス力の関係を図-6に示すが、斜め引張破壊したIN-1, 2, 3に着目すると、プレストレスが増すほど破壊荷重が増加していることが確認できる。

既往の研究^{5), 6), 7)}によれば、プレストレスを導入した単純はりの、導入していないはりに対する斜めひび割れ発生時のせん断力の増加量は、デコンプレッションモーメント M_0 をせん断支間 a で除した値に係数 k_i を掛けたもの ($=k_i \times M_0/a$) で評価されている。報告⁷⁾では、断面が矩形でせん断支間比が3、コンクリート強度 40N/mm^2 が2体、 80N/mm^2 が8体のPC単純はりについて静的単調載荷実験を行っており、その結果、係数 k_i は筆者らが計算したところでは、斜めひび割れ発生荷重に関しては $k_1 = 0.7 \sim 2.4$ (平均 1.7)、斜め引張破壊荷重に関しては $k_2 = 2.4 \sim 7.8$ (平均 4.6) である。今回の実験におけるIN-1, 2のIN-3に対するせん断力の増加量 ΔV_i および係数 k_i を表-4に示す。今回の k_i は報告⁷⁾の実験平均値より低い、これは供試体の断面形状、コンクリート強度等の条件の相違が影響しているものと推察される。

3.3 緊張材の付着の有無がはりのせん断挙動に及ぼす影響

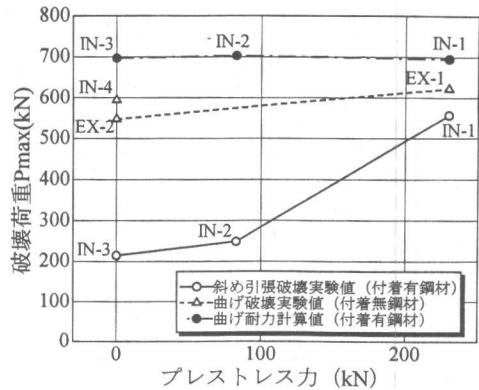


図-6 破壊荷重とプレストレス力の関係

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

	供試体	IN-1	IN-2
	M_0/a (kN)	43.7	15.7
斜めひび割れ発生	ΔV_1 (kN)	20	0.5
	k_1	0.46	0.03
斜め引張破壊	ΔV_2 (kN)	171	17
	k_2	3.9	1.1

*) $M_0 = \sigma_{FL} \times Z_i$

Z_i : はり下縁に関する断面係数 (-28500cm^3)

今回の供試体において、外ケーブルのようにコンクリートと付着を持たない緊張材を用いた場合 (EX-1) は、内ケーブルのように付着のある緊張材を用いた場合 (IN-1) より高いせん断耐力を有していることが実験結果により確認された。この現象は、Kani のくし歯理論⁸⁾からも説明できると考えられるが、ここでは外ケーブル構造と内ケーブル構造との異なる耐荷機構に着目し、それがもたらす影響について図-7により考察する。図-7は前述の非線形解析によって、IN-1における斜めひび割れ発生直前の荷重 $P=250\text{kN}$ 時に着目し、ひずみ分布、張力分布をEX-1と比較して描いたものである。EX-1では、曲げモーメントが最大となる純曲げ支間断面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渡って一定に生じる (摩擦を無視した場合) ため、曲げモーメントの卓越していないせん断支間の断面においては、EX-1はIN-1よりPC鋼材張力増加が大きくな

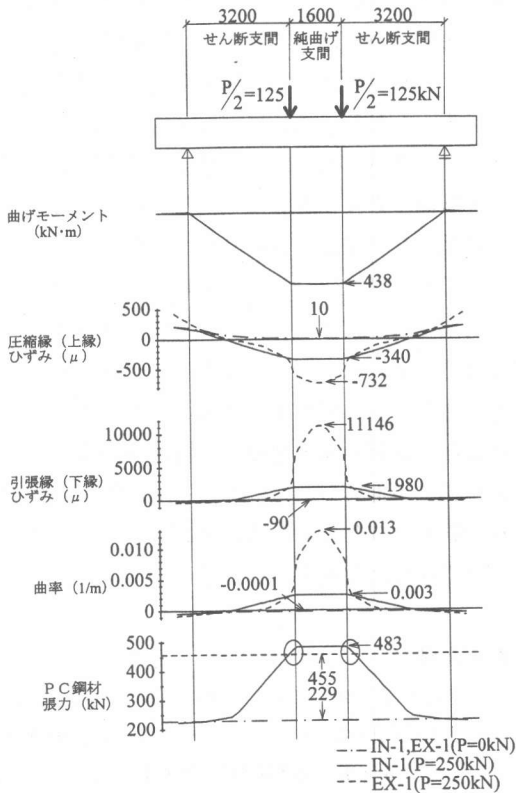


図-7 本実験におけるはりの非線形解析によるひずみ、曲率、張力分布

り、それに釣合うコンクリートが負担する圧縮力も増加する。それに伴い、断面の曲率や圧縮縁、引張縁のひずみの増加が抑制される結果となる。荷重Pによる曲げ作用により、支間の下縁側は引張領域となるが、EX-1の支点から1.2mの区間では、その引張縁にすら未載荷時(P=0kN)よりも圧縮ひずみが累加されるほどで、引張応力度の発生が抑えられている。その結果、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。

池田らは、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鉄筋コンクリート単純はりでは、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が発揮されてせん断耐力が向上することを示した²⁾。一方、今回の実験は、引張鋼材に緊

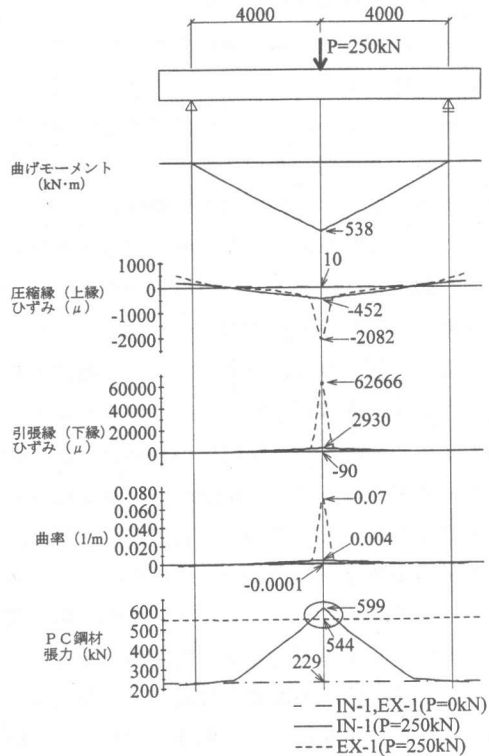


図-8 支間中央一点荷重を想定したはりの非線形解析によるひずみ、曲率、張力分布

張材(PC鋼より線)を用いた供試体による実験であり、外ケーブルのようにコンクリートと付着を持たない緊張材を用いたPC単純はりにおいても、せん断耐力が向上する結果が得られた。これより池田らにより確認された性状は、本実験によりPC構造でも成り立つことが確認される。

今回の実験では、斜めひび割れが発生する可能性のある区間において、外ケーブル張力が内ケーブル張力よりも大きくなったことから、前述の通り外ケーブル供試体はひび割れが生じにくい条件にあった。その結果、外ケーブル供試体は内ケーブル供試体よりもせん断耐力が向上した。これより、そのような区間における外ケーブル構造の斜め引張破壊に関するせん断耐力は、内ケーブル構造において精度が認められている既往のせん断耐力評価式を用いて算定し

ておけば安全側であると言える。

しかし、図-7のPC鋼材張力分布に楕円に示した区間のように、外ケーブル張力が内ケーブル張力よりも小さく、かつ曲率や引張縁ひずみが卓越する区間において斜めひび割れが発生する場合には、ひび割れが生じやすい条件にあるので、せん断耐力はむしろ低下する可能性がある。図-7において、楕円部1カ所当たりの部材軸方向長さは0.2mであった。

ちなみに図-8に、支間中央に一点載荷を想定したときの非線形解析によるひずみ、張力分布を示す。この場合、楕円部の片側せん断支間における軸方向長さは、0.37mとなり2点載荷のときより長くなっている。この載荷形態は、連続桁の中間支点が中心で、支間の曲げモーメントの交番点を端支点とした区間を切り出して逆さまにしたモデルと見なすことができる。すなわち、連続桁の中間支点付近のような部位では、外ケーブル構造とした場合、内ケーブル構造と比較してせん断耐力は向上する条件下にないと推察されるので、外ケーブルPC連続桁の設計に関しては注意が必要であろう。ただし、(支間/桁高)比が15~20である実橋レベルにおいて、そのような区間(楕円部)が斜めひび割れの発生し得る区間にあるか否かについては未検討であり、今後の検討を要すると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ① PC鋼材の付着の有無により、荷重-たわみ曲線、ひび割れの発生箇所および進展状況、破壊形態は全く異なり、PC鋼材とコンクリートとに付着がある供試体が斜め引張破壊したのに対し、付着がない供試体は曲げ破壊する実験結果となった。
- ② コンクリートと付着のあるPC鋼材を用いた供試体において、プレストレスが大きいほど、斜め引張破壊荷重は増加し、斜めひび割れ角度は緩やかになることが確認できた。

③ 本供試体において、外ケーブル供試体は内ケーブル供試体に比べて高いせん断耐力を有していた。これは外ケーブル構造の内ケーブル構造とは異なる耐荷機構が原因している。即ち、外ケーブル供試体では、曲げモーメントが最大となる断面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。このため曲げモーメントの卓越していないせん断支間の断面では、外ケーブル構造は内ケーブル構造より、ケーブル張力およびそれと釣合うコンクリートが負担する圧縮力が増加する。それに伴い断面の曲率増加や引張縁での引張応力度の発生が抑えられる。その結果、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) 平喜彦ほか：外ケーブルPCはりのせん断耐力に関する実験的研究、プレレストコンクリート技術協会第9回シホジウム論文集、pp.547-552、1999.10
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書(平成8年制定)設計編、1996.3
- 3) 二羽淳一郎ほか：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
- 4) 玉置一清、新井英雄、板井英次、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、プレレストコンクリート技術協会第5回シホジウム論文集、pp.309-314、1995.10
- 5) 佐藤勉ほか：プレレストコンクリートはりのせん断強度、鉄道総研報告、Vol.2、No.8、pp.19-24、1988.8
- 6) 鳥取誠一、涌井一：プレレストコンクリートはりのせん断耐力、プレレストコンクリート技術協会第3回シホジウム論文集、pp.5-8、1992.11
- 7) 建設省土木研究所ほか：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-高強度コンクリートPCはり部材の曲げせん断強度に関する調査一、1995.3
- 8) Kani,G.N.J. : The Riddle of Shear Failure and Its Solution, Jour. of ACI, pp.441-466, April 1964
- 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、No.293、pp.101-109、1980.1