

[2055] プレストレストコンクリートはりのせん断耐力と破壊性状

正会員○佐藤 勉 (鉄道総合技術研究所)
 正会員 石橋忠良 (JR東日本)
 正会員 山下裕章 (大阪府)
 正会員 高田三郎 (大阪府)

1. はじめに

プレストレストコンクリートはりのせん断耐力に関する研究は、諸外国で数多く行われておりACI [1], CEB [2]の設計規準等に取り入れられている。しかし、これらの設計規準に取り入れられているプレストレスのあるはりのせん断耐力評価式は、文献[3]、[4]示されているように数多くの実験データをもとに決定されているものの、式の精度はまだ十分なものとなっていない。

また、わが国においても、昭和61年に改訂された土木学会コンクリート標準示方書[5]において、せん断耐力の評価式が新たに提案されている。これは、二羽ら[6]の研究を基礎としたものであるが、研究は緊張されていない鉄筋を用いたコンクリートはりに対して行われており、プレストレスの効果に関する考え方は、CEBに採用されているデコンプレションモーメントを用いる方法を採用している。

わが国におけるプレストレストコンクリートはりのせん断耐力に関する研究は、松下ら[7]、船越[8]、上田ら[9]による報告等があるものの、定性的な結論を示すにとどまっております、具体的なせん断耐力の提案式を示すに至っていない。

本研究は、プレストレストコンクリートはり51体による載荷試験を行い、プレストレストコンクリートはりの破壊性状及びせん断耐力について検討を行ったものである。検討項目は、主として、はりの断面形状の影響、せん断補強鉄筋の効果、プレストレスの効果、PC鋼材の曲上げの効果等について着目して行うものとした。

2. 試験概要

2.1 試験体の製作

試験体は、図-1に示すように矩形断面及びT形断面のはりとし、全部で51体について製作した。試験体の形状寸法、配置鋼材量、ケーブル形状、プレストレス力等を表-1に示す。

試験体の製作に使用したコンクリートは表-2に示す配合で、試験時の目標圧縮強度は、400kgf/cm²とした。なお、試験時材令におけるコンクリートの圧縮強度は、現場養生の標準供試体(円柱供試体φ=100mm)により確認することとし、実際には表-1に示す圧縮強度にて、試験を行った。

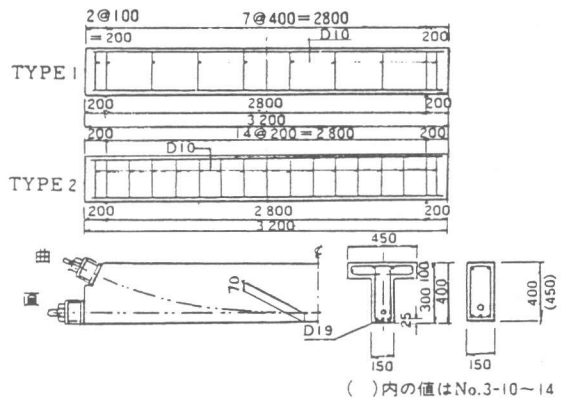


図-1 試験体の形状

使用したPC鋼材は、一般には丸棒SBPR $\phi=32\text{mm}$ を用いることとし、一部異形棒（ゲビンデスターブ $\phi=32\text{mm}$ ）を用い、また鉄筋は、SD35を用いた。鋼材の材料特性は、表-3に示す通りである。なお、ゲビンデスターブは、ねじふしバーで、付着性能は通常の異形鉄筋と同程度のものであるが、これを用いたのは、軸方向鋼材として、PC鋼材のみとし異形鉄筋を用いない試験体でせん断破壊させるために、付着性能の良好なPC鋼材を使用するのがよいと判断したためである。

試験体に配置したPC鋼材のプレストレスの導入は、コンクリート強度が 350kgf/cm^2 以上となつてから行うこととした。PC鋼材の定着は、アンカープレートをナットで固定しその後、セメントグラウトを注入（シース径 $\phi=38\text{mm}$ ）した。なお、試験体には定着部の補強のために支点から定着部付近についてスターラップを配置した。

2. 2 測定項目及び荷重方法

測定項目は、PC鋼材とスターラップのひずみ、コンクリートの表面ひずみ、たわみ、ひびわれ状況及び荷重荷重とした。PC鋼材及びスターラップのひずみの測定には、ワイヤーストレンゲージ（測長 5mm と 2mm のもの）、コンクリート表面のひずみには、ワイヤーストレンゲージ（測長 30mm のもの）を使用した。ひびわれ状況は、ひびわれ発生後荷重荷重ごとにひびわれを記録し、主なひびわれの幅も記録した。

荷重方法は、図-2に示すように2点集中荷重とし、試験は油圧ジャッキ（ 70tf

表-1 試験体諸元

試験体	形状	a/h	PC鋼材		軸方向鉄筋 種別	せん断鉄筋 種別	せん断鉄筋 鋼材種別	せん断鉄筋 鋼材/mm	ケーブル 形状	プレスト レス力	コンクリート の圧縮強度
			種別	鋼材種別							
1-1	T形	2.7	SDPR 95/ 110 $\phi=32$	8.04	SD35 D19	8.60	SD35 D10	3.56 7.12	直線	0tf	438 kgf/cm^2
1-2		3.0									
1-3		2.7									
1-4		3.0									
1-5		2.7									
1-6		2.7									
1-7		2.7									
1-8		2.7									
1-9		2.7									
1-10		3.0									
2-1	矩形	2.7	SDPR 95/ 110 $\phi=32$	8.04	-	-	D10	3.56	直線	0	360
2-2		2.7									
2-3		2.7									
2-4		2.7									
2-5	T形	2.7	SDPR 95/ 110 $\phi=32$	8.04	-	-	D10	3.56	直線 R=866	0	374
2-6		2.7									
2-7		2.7									
2-8		2.7									
2-9		2.7									
2-10		2.7									
3-1	T形	2.2	SDPR 95/ 110 $\phi=32$	8.04	-	-	-	-	直線 R=866	0	383
3-2		2.7									
3-3		2.7									
3-4		2.7									
3-5		2.7									
3-6		2.7									
3-7		2.7									
3-8		2.7									
3-9		2.7									
3-10	矩形	2.2	SDPR 95/ 110 $\phi=32$	8.04	-	-	-	-	直線 R=300	0	432
3-11		2.2									
3-12		2.2									
3-13		2.4									
3-14		2.4									
4-1	T形	2.7	SDPR $\phi=32$	8.04	D19	8.60	D10	7.12 3.56 7.12	直線	2.0	419
4-2		2.7									
4-3		2.7									
4-4	矩形	2.7	SD95/ 110 $\phi=32$	8.04	D10	1.43	-	-	直線 R=866	0	433
4-5		2.7									
4-6		2.7									
4-7		2.7									
4-8		2.7									
4-9		2.7									
4-10		2.7									
4-11		2.7									
4-12		2.7									
4-13		2.7									
4-14		2.7									
4-15		2.2									
4-16		2.2									
4-17		2.2									

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法	スランブ	空気量	細骨材率	単位量 (kg/m^3)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
(mm) 15	(cm) 8 ± 2.5	(%) 3 ± 1	(%) 50.0	175	400	872	888	4.44

表-3 鋼材の材料特性

種 類	公称径 (mm)	公称 断面積 (cm^2)	降伏点 (kgf/mm^2)	引張強さ (kgf/mm^2)	伸び (%)
PC丸棒 (SBPR 95/110)	32	8.042	103	114	11
PC異形棒 (ST 95/110)	32	8.042	104	114	10
鉄 筋 (SD 35)	9.53	0.7122	39.7	56.7	22.7
	19.1	2.865	39	57	24

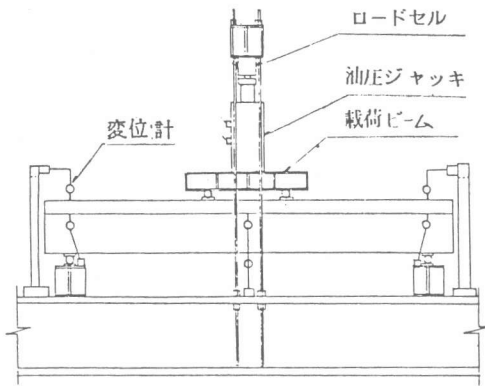


図-2 载荷状況

用)にて1tfピッチに荷重を増加させ、荷重の測定はロードセルにて行った。载荷は、0tfから斜めひびわれ発生まで载荷したら一旦除荷し、その後破壊まで载荷するものとした。

载荷位置は、せん断スパン-桁高比(a/h)を2.2, 2.4, 2.7, 3.0の4通りとなる位置とした。

3. 試験結果及び考察

3.1 破壊性状

表-4に各試験体の破壊荷重を示す。試験体は、一部の試験体を除いて支点と载荷点の中央付近に発生した斜めひびわれが進展し、急激に破壊している。

試験体4-9~12の破壊後のひびわれ状況を図-3に示す。試験体4-9~12の4体は、試験体の形状と軸方向鋼材は同一で、共にスターラップない試験体で、プレストレスが10, 20, 30, 40tfと異なっているものである。図-3に示す4体のひびわれ図及び試験状況から、次の事柄が観察された。

(1) プレストレス力が増加することによって、せん断ひびわれと部材軸とのなす角度が小さくなる傾向がある。

(2) プレストレス力の最も大きい試験体4-12は、左右のせん断ひびわれ面がつながり、タイドアーチ的な状態となり、最終的にクラウン部で圧壊している。

(3) プレストレスの増加とともに破壊時の

表-4 実験及び計算結果

試験体	破壊荷重 P _{max}	計算値		P _{max} / P _{cal1}	P _{max} / P _{cal2}
		P _{cal1}	P _{cal2}		
1-1	18.5	12.8	16.0	1.45	1.16
1-2	23.5	16.9	19.9	1.39	1.18
1-3	30.8	21.5	28.0	1.43	1.10
1-4	30.0	24.0	31.3	1.25	0.96
1-5	25.0	17.0	24.2	1.47	1.03
1-6	30.0	20.9	28.2	1.44	1.06
1-7	33.3	27.0	33.6	1.23	0.99
1-8	37.0	31.2	37.8	1.19	0.98
1-9	24.4	20.2	26.9	1.21	0.91
1-10	27.5	22.4	28.8	1.23	0.95
2-1	8.0	6.1	6.6	1.31	1.21
2-2	10.8	10.5	11.1	1.03	0.97
2-3	15.8	14.0	16.5	1.13	0.96
2-4	19.6	15.9	19.4	1.23	1.01
2-5	16.7	10.9	12.9	1.15	1.24
2-6	25.5	14.2	20.1	1.80	1.27
2-7	24.0	16.2	22.7	1.48	1.06
2-8	30.4	17.4	23.9	1.75	1.27
2-9	29.4	20.0	27.1	1.47	1.08
2-10	29.0	21.9	28.5	1.32	1.02
3-1	21.1	6.6	9.9	3.20	2.13
3-2	15.0	8.2	11.2	1.83	1.34
3-3	13.9	8.2	11.1	1.70	1.25
3-4	16.5	14.6	21.4	1.13	0.77
3-5	11.4	14.5	18.8	0.79	0.61
3-6	27.4	17.1	23.6	1.60	1.16
3-7	17.0	16.4	24.7	1.04	0.70
3-8	21.0	19.4	25.8	1.08	0.81
3-9	29.5	22.8	29.4	1.27	1.00
3-10	17.5	8.4	10.8	2.08	1.62
3-11	17.4	11.9	18.3	1.46	0.95
3-12	23.0	14.3	19.9	1.60	1.16
3-13	16.1	11.3	14.1	1.42	1.14
3-14	15.9	17.7	20.1	0.90	0.79
4-1	27.0	19.6	26.6	1.38	1.02
4-2	25.0	18.6	25.7	1.35	0.97
4-3	28.0	18.3	24.7	1.53	1.13
4-4	7.0	6.8	7.5	1.03	0.93
4-5	7.7	6.5	7.1	1.18	1.08
4-6	17.3	10.9	13.1	1.59	1.32
4-7	17.0	10.6	12.8	1.60	1.33
4-8	5.8	6.5	7.1	0.89	0.82
4-9	10.0	8.3	9.2	1.20	1.09
4-10	10.1	11.0	14.4	0.92	0.70
4-11	15.2	12.1	15.4	1.26	0.99
4-12	16.5	13.9	16.9	1.19	0.98
4-13	21.5	18.8	22.2	0.97	0.97
4-14	17.5	15.4	18.7	1.14	0.94
4-15	29.0	22.4	28.0	1.29	1.04
4-16	24.3	19.9	24.3	1.22	1.00
4-17	22.9	15.1	19.6	1.52	1.17

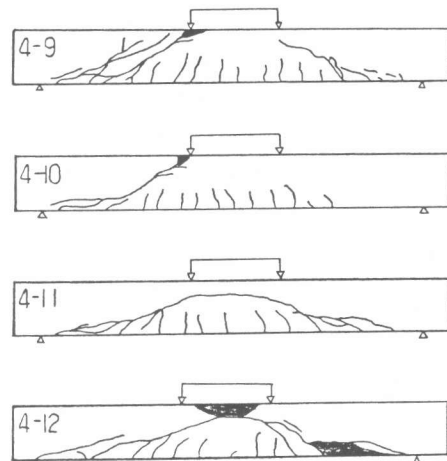


図-3 破壊後のひびわれ状況

コンクリートの剥離及び破壊音は大きくなる。

3. 2 セン断耐力に及ぼす各要因の影響

(1) 断面形状の影響

部材の断面形状がせん断耐力に及ぼす影響は、鉄筋コンクリートT形はりにおいて上フランジ幅を変えた実験[10]がある。プレストレストコンクリートはりにおいても、文献[10]の結果から、断面形状が矩形とT形の場合ではせん断耐力が異なることが予想される。図-4は M_o/M_d (記号は後述)を横軸に、縦軸に試験体の破壊荷重 P_{max} (鋼材は直線配置でスターラップのない試験体)を取り、実験結果をT形断面と矩形断面に区別して示したものである。

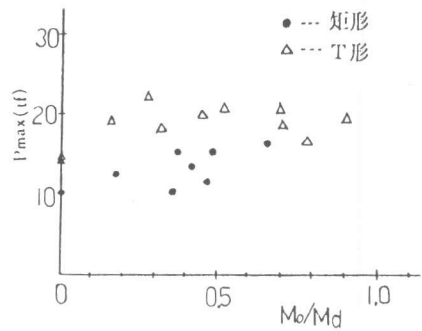


図-4 形状の影響

図-4より、コンクリートの分担するせん断力の実験値は、矩形断面の試験体よりT形断面の試験体の方が大きく、プレストレストコンクリートはりにおいても文献[10]と同様のことが言えるようである。今回実験に用いたT形断面の試験体は、ウェブ厚さが15cmで、上フランジ幅を45cmの形状と一定としており、文献[10]からウェブ厚の3倍以上のフランジ幅を持ったはり、矩形断面のはりよりもコンクリートの分担するせん断力は約25%大きいこと、また図-4の結果からもほぼ25%

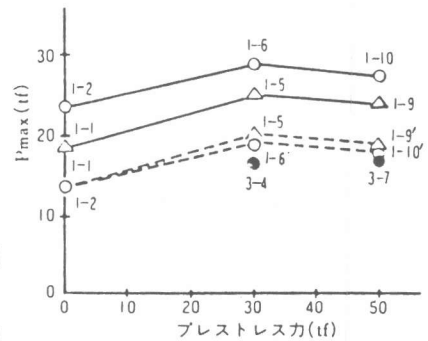


図-5 セン断補強鉄筋の効果

程度のせん断耐力の違いが生じていることから、以下の検討において断面形状の影響を考慮するための係数 $f=1.25$ を乗ずることによって、T形断面のせん断耐力を評価することとする。

(2) セン断補強鉄筋の効果

せん断補強鉄筋が、プレストレストコンクリートはりのせん断耐力に及ぼす影響を従来から用いている(1)式で評価することの妥当性について検討する。

$$V_s = A_w \cdot f_y \cdot z \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \quad \text{..... (1)}$$

ここで、 V_s :せん断補強鉄筋の分担するせん断力

A_w :1組のせん断補強鉄筋の断面積

f_y :せん断補強鉄筋の降伏点応力度

z : $d/1.15$ d :有効高さ

α :せん断補強鉄筋と部材軸とのなす角度

s :せん断補強鉄筋の間隔

断面形状と軸方向鋼材量が同一、せん断補強鉄筋とプレストレス力の異なる試験体による結果から、せん断補強鉄筋の効果について整理したものを図-5に示す。図-5の点線で示した値はせん断補強鉄筋のせん断耐力に及ぼす影響を(1)式により差し引いたものであり、図中のスターラップのない試験体3-4,3-7とほぼ等しくなっており、(1)式を用いることがほぼ妥当であることがわかる。

(3) プレストレスカの効果

図-6は、プレストレストコンクリートはりにおけるプレストレスカの効果(β)を検討したものである。

ここで、 β :プレストレスによるコンクリートの負担するせん断力の割増係数

M_o : 検討断面 (a/2点) での引張り縁の合成応力度が0となる曲げモーメント

M_d : 検討断面 (a/2点) での破壊曲げモーメント

V_c : コンクリートの負担するせん断力[11]で、(2)式を用いる

$$V_c = 0.94f_c^{1/3} \cdot (100p_h)^{1/3} \cdot (100/h)^{1/4} \cdot (0.75 + 1.4/a/h) \cdot f \cdot \beta \cdot b \cdot h \quad \text{..... (2)}$$

$$p_h = (A_p \cdot d_p / h + A_s \cdot d_s / h) / bh$$

f_c : コンクリートの圧縮強度 h : はり高 b : はり幅 a : せん断スパン

A_p, d_p : PC鋼材の断面積、有効高さ A_s, d_s : 鉄筋の断面積、有効高さ

f : 断面形状の影響を考慮するための係数(T形はりの場合 $f=1.25$)

図-6は、せん断補強鉄筋の効果を(1)式により取り除き(2)式を用いてプレストレスによるコンクリートの負担するせん断力の割増係数 β を示したものである。図-6より、 M_o/M_d と β との関係はばらつきが大きく、現行の設計規準[12]等を用いている $\beta_n = 1 + M_o/M_d$ と比較しても、実験結果からは、プレストレスの効果をさらに評価する必要があると考えられる。図-6において M_o/M_d をパラメータとして近似式、(3)式を求めた。式の精度は低いものの以降の検討において、(3)式を用いるものとする。

$$\beta_1 = 1 + (M_o/M_d)^{0.5} \quad \text{..... (3)}$$

(4) PC鋼材の曲上げ効果

図-7は、PC鋼材の曲上げ効果を示したものである。点線の値は、曲上げ効果の影響を(4)式を用いて評価できるものとして、PC鋼材によるプレストレス力のせん断力に平行な成分を、PC鋼材が曲線配置された試験体の破壊荷重 P_{max} より差し引いたものである。

$$V_{pe} = P_e \cdot \sin \alpha \quad \text{..... (4)}$$

ここで、 V_{pe} : PC鋼材によるプレストレス力のせん断力に平行な成分

P_e : PC鋼材のプレストレス力

α : 検討断面のPC鋼材と部材軸とのなす角度

試験体3-6, 3-9は、PC鋼材を直線配置した試験体3-4, 3-7よりせん断耐力が若干大きくなっているが、その他の点線の値はほぼ直線配置したものと同様になっており、(4)式はほぼPC鋼材の曲上げ効果を評価しているものと思われる。

3.3 せん断耐力の算定式

これまでの検討結果より、プレストレスコンクリートはりに対するせん断耐力算定式として、(5)式で評価するものとし、その計算結果を表-4に示す。

$$P_{cal2} = V_c + V_s + V_{pe} \quad \text{..... (5)}$$

ここで、 P_{cal2} : プレストレスコンクリートはりのせん断耐力の計算値

V_c : (2)式による V_s : (1)式による

V_{pe} : (4)式による

また、土木学会コンクリート標準示方書[5]に示されてい

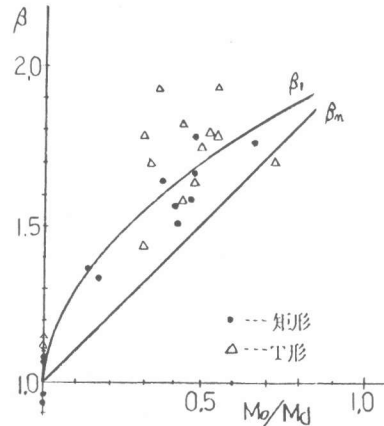


図-6 プレストレスの効果

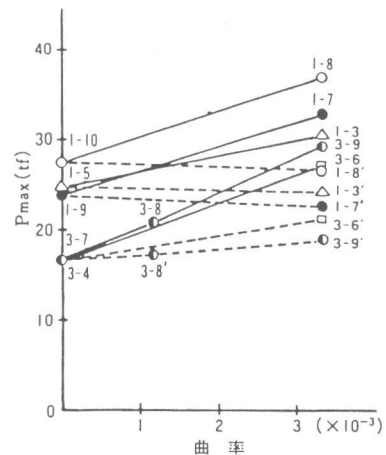


図-7 PC鋼材の曲上げ効果

るせん断耐力算定式を用いて、求めた計算値(P_{cal1})も表-4示した。なお、土木学会は、 V_c として(6)式を用いることとしている。

$$V_c = 0.9 \cdot f_c^{1/3} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot b_w \cdot d \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 $\beta_p = (100p')^{1/3}$ $\beta_d = (100/d)^{1/4}$

$$\beta_n = 1 + M_o/M_d \quad p' = (A_s + A_p)/b_w \cdot d$$

図-8に土木学会示方書により求めた P_{cal1} と実験値との比較を示す。図-8より、 P_{max}/P_{cal1} は、ばらつきが大きく、ほとんどのデータが1.0を越え十分安全側の値となっている。(P_{max}/P_{cal1} の平均値1.37変動係数35%)

図-9に今回検討した(5)式により求めた P_{cal2} と実験値との比較を示す。図-9より、 P_{max}/P_{cal2} は、比較的1.0付近の値が得られており(P_{max}/P_{cal2} の平均値1.07変動係数21%)、今回の実験範囲ではほぼ(5)式でプレストレスコンクリートはりのせん断耐力の平均値が評価できるものと考えられる。

4. まとめ

今回の実験及び考察から、明らかとなった主な点を列記する。 図-9 P_{cal2} による比較

- (1) プレストレス力が増加することによって、せん断ひびわれと部材軸とのなす角度が小さくなる傾向がある。
- (2) 今回の実験に用いた試験体において、断面形状が矩形断面のものとT形断面のものでは、T形断面の方がせん断耐力が大きい。
- (3) せん断耐力に及ぼすせん断補強鉄筋の効果は、ほぼ(1)式で評価してよいと考えられる。
- (4) せん断耐力に及ぼすプレストレス力の効果は、(3)式で近似できるもののばらつきが大きい
- (5) せん断耐力に及ぼすPC鋼材の曲上げ効果は、ほぼ(4)式で評価してよいと考えられる。

5. おわりに

プレストレスコンクリートはりのせん断耐力について、実験により検討を試みた。せん断耐力の評価式として(5)式を用いることにより、耐力の平均値に近い値が計算で求められることがわかった。しかし、式の精度は十分とは言えず、さらに検討する必要があると考えられる。

[参考文献]

- [1] ACI Committee318, Building Code Requirements for reinforced Concrete
- [2] CEB-FIP, Model Code for Concrete Structures, CEB-FIP International Recommendations, 1978
- [3] J.G. MacGregor, P.Gergely, Suggested Revisions to ACI Building Code Clauses Dealing with Shear in Beams, ACI Journal, Vol.74, No.10, Oct, 1977, PP. 493-500
- [4] O.Hedman, A.Losberg, Design of Concrete Structures with Regard to Shear Forces, CEB Bulletin D' Information, No.126 June 1978, PP.183-209.
- [5] コンクリート標準示方書設計編, 土木学会 1986, 10.
- [6] 二羽、山田、沢、岡村、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、土木学会論文集第372号、V-2、1986年8月 PP.167-176
- [7] 松下、足立、PCはりにおけるスターラップの分担せん断力、第4回コンクリート工学年次講演会論文集、1982、PP.317-320
- [8] 船越稔、プレストレスコンクリート単純梁のせん断強さ、広島大学工学部研究報告、V01.25.No.1, 1976, PP.49-58
- [9] 上田、堀部、鉄筋コンクリートはりのせん断挙動に与える軸圧縮の影響、第41回土木学会年次学術講演会5部門、1986, PP.319-320
- [10] A. Placas, P.E.Regan, Shear Failures of Reinforced Concrete Beams, Proceedings of ACI, vol.68, Oct. 1971, PP.763-773
- [11] 石橋、斎藤、吉田、RCはりの腹部に配置された軸方向鉄筋のせん断破壊性状に及ぼす影響について、セメント技術年報40、1985、PP.391-393
- [12] 国鉄建造物設計規準解説(プレストレスコンクリート鉄道橋)、土木学会、昭和58年2月

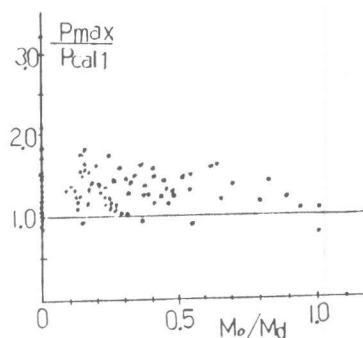


図-8 P_{cal1} による比較

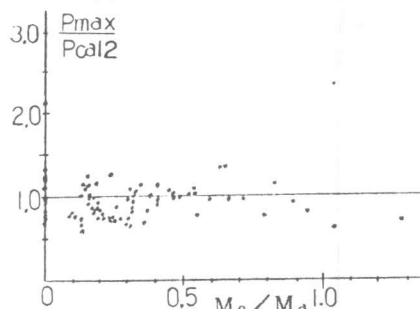


図-9 P_{cal2} による比較