

[141] たれ壁・腰壁付き X 形配筋柱の弾塑性性状

正会員 南 宏一 (大阪工業大学工学部)

正会員 ○倉本 洋 (大阪工業大学大学院)

正会員 若林 實 (日本建築総合試験所)

1. 序

本報は、たれ壁・腰壁により短柱化した柱にX型配筋を適用し、その柱の耐震性能をどのように改善できるかを実験的に考察し、たれ壁・腰壁付き鉄筋コンクリート柱のせん断強度を理論的に求め、実験結果と比較検討を行なうものである。

2. 実験計画

柱長さを100cmとし、柱材の内法長さ比 $\eta_0 (=l_0/h)$ を3および2の2種類、主筋の配筋法A、BおよびCの3種類を選択した。配筋法Aは、全主筋平行配筋であり、配筋法B、Cは、X形主筋比0.5とするX形配筋であるが、Bは壁端位置を折り曲げ位置とし、Cは壁端位置より10cm内側の位置を折り曲げ位置とした。

3. 実験

3.1 試験体

図-1に試験体断面の形状寸法を、図-2に試験体C32の配筋状況を示す。全引張主筋比： $\rho_t = 1.27\%$ 、帯筋比： $\rho_w = 0.32\%$ とし、厚さ5cmの壁には、3 ϕ 50mm@ ($\rho_s = 0.30\%$)のシングル配筋を用いた。

3.2 試験体の材料強度

表-1に鉄筋およびコンクリートの力学的特性を示す。鉄筋は、主筋D13 (SD30)、帯筋4.5 ϕ 、壁筋3 ϕ を用い、帯筋および壁筋はSR24相当品である。

3.3 実験方法

コンクリートの圧縮強度の20%の一定圧縮力を作用させ変位制御による繰返しせん断荷重を行なった。基本制御変位量は、柱長さ100cm間の相対水平変位量から求められる部材角Rとした。

4. 破壊状況

最大荷重時のひび割れ状況を図-3に、各柱のひび割れ荷重および最大荷重を表-2に示す。破壊状況は、内法長さ比 η_0 と主筋の配筋法によって著しく異なっている。全主筋が平行配筋されている試験体では、いずれの場合も内法部分にせん断付着割裂破壊を生じ、壁部には著しい損傷はみられない。しかしながら、X形配筋併用の試験体については、内法部分にX形主筋に沿ったひび割れは生じるが、せん断付着割裂ひび割れは生じず、壁に囲まれた柱材端およびその壁部に破壊を生じている。また、配筋法Bの試験体では、折り曲げ位置でX形主筋に局部座屈が生じ、それに伴ないその近傍のコンクリートの圧壊が生じた。一方、配筋法Cの試験体では折り曲げ位置での主筋の局部座屈がみられず、柱の損傷度合は、AおよびBシリーズの試験体に比して最も小さい。

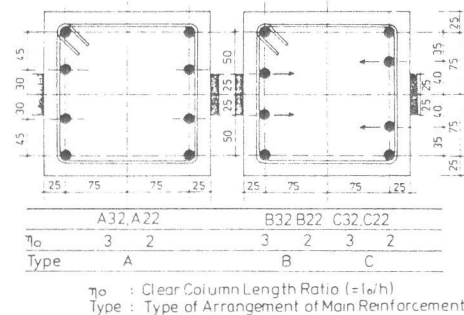


図-1 柱断面

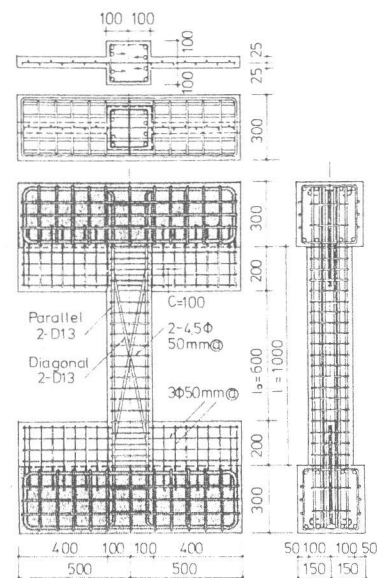


図-2 配筋状況 (C32)

表-1 材料の力学的特性

Specimen	Reinforcement			Concrete	
	D13	4.5 ϕ	3 ϕ	Fc	Ft
	σ_y (kgf/cm ²)			(kgf/cm ²)	
A32				258	24.1
A22				220	21.4
B32	3561	2657	2824	248	20.8
B22				248	20.8
C32				286	23.8
C22				278	19.1

表-2 実験値

		Column											Wall			
		N	Q _{FL}	R _{FL}	Q _{SP}	R _{SP}	Q _{SD}	R _{SD}	Q _{DT}	R _{DT}	Q _{max}	R _{max}	Q _{FL}	R _{FL}	Q _{DT}	R _{DT}
A32	pos.	20.6	7.92	0.35	8.47	0.52	----	----	7.07	0.26	9.07	0.98	5.62	0.21	8.60	0.44
	neg.		-4.55	-0.35	-7.55	-0.39	----	----	-6.58	-0.27	-8.52	-0.50	----	----	-8.00	-0.45
A22	pos.	17.6	9.12	0.51	9.50	0.46	----	----	9.67	0.46	10.12	0.99	----	----	8.47	0.29
	neg.		-8.82	-0.45	-8.60	-0.42	----	----	-8.83	-0.45	-9.18	-1.00	----	----	-8.60	-0.41
B32	pos.	19.9	6.25	0.35	----	----	9.52	0.44	10.90	0.80	12.40	1.26	9.05	0.50	8.20	0.39
	neg.		-7.02	-0.27	----	----	-11.12	-0.91	-9.53	-0.51	-12.62	-1.24	----	----	-8.07	-0.35
B22	pos.	19.4	10.92	0.39	----	----	10.92	0.44	10.92	0.39	14.77	1.23	0.05	0.30	9.22	0.27
	neg.		-11.25	-0.37	----	----	-11.25	-0.37	-10.22	-0.31	-14.02	-1.00	----	----	-8.07	-0.18
C32	pos.	23.7	7.25	0.32	----	----	11.25	0.37	11.32	0.39	13.70	1.50	4.15	0.06	7.15	0.13
	neg.		-3.95	-0.25	----	----	-9.90	-0.48	-11.25	-0.37	-13.54	-1.39	----	----	-6.37	-0.44
C22	pos.	22.2	9.15	0.22	----	----	12.60	0.44	12.60	0.44	15.30	1.00	7.37	0.14	10.87	0.34
	neg.		-11.27	-0.41	----	----	-12.15	-0.51	-12.15	-0.51	-15.51	-1.02	----	----	-8.85	-0.25

図-4は、壁による柱材端の変形の拘束度合を表わしたもので、縦軸の R_e は、内法長さ l_o の部分は剛体として壁端位置の柱の水平変位量および回転量から測定された部材角を表わし、横軸は柱長さ 100 cm に対する部材角を表わす。

この図より、B22およびC22では、柱の耐力が壁部の拘束耐力を上回っていることが示される。

5. 履歴曲線

図-5に履歴曲線を示す。縦軸に作用せん断力 Q 、横軸に柱部材角 R ($l = 100\text{ cm}$ に対する値) を示す。点線は、転倒モーメントの影響を表わし、 Q_{U1} および Q_{U2} を表わす実線は、後述の理論1および理論2による理論強度を表わす。2回目の繰り返しによって囲まれる履歴面積を薄く塗りつぶしている。平行配筋のAシリーズでは、せん断破壊特有の逆S字形で、最大耐力以後の劣化の激しい履歴曲線を示している。それに対し、X形配筋併用のBおよびCシリーズでは、最大強度を維持できる限界変位量である $R = 0.015 \sim 0.02\text{ rad.}$ までの変位振幅では、安定した紡錘形の履歴曲線を示している。それ以後の変位振幅では強度劣化を生じているが、履歴曲線の形状そのものは紡錘形を示しており、X形配筋としての特性が表われている。履歴曲線の安定性からみれば、本実験では、 $\eta_o = 3$ の場合にはB形、 $\eta_o = 2$ の場合にはC形のX形配筋が効果的な配筋といえる。

6. せん断強度解析

6.1 解析モデル

図-6に本解析に用いた解析モデルを示す。本実験に用いた柱のせん断抵抗機構を、(1)壁厚 t 、長さ l_o の無筋コンクリートによるアーチ機構、(2)柱幅から壁厚を減じた幅 $e b (= b - t)$ を柱幅とし、長さ l とする通常の鉄筋コンクリート部材のはり機構とアーチ機構、さらに、(3)柱軸と θ の角度をもつX形主筋によるトラス機構に分類できるものと仮定する。それぞれの抵抗機構に対して静的許容応力場を満たす強度を求め、さらに、その強度に対して拡張累加強度理論⁹⁾を適用して全体の強度を求める。従って、まず、(1)と(2)の抵抗機構によるたれ壁・腰壁付き平行配筋柱の強度を求め、それに(3)のX形主筋の強度を累加してたれ壁・腰壁付きX形配筋柱のせん断強度を求める。なお、X形主筋の抵抗機構において、折り曲げ部ではトラスとしての強度が伝達できるような構造になっているものと仮定する。

Units $N, Q : \text{tf}$
 $R : 10^{-2} \text{ rad.}$

FL : Flexural Cracking
SP : Splitting Cracking along Parallel Reinforcement
SD : Splitting Cracking along Diagonal Reinforcement
DT : Diagonal Tension Cracking
max : Maximum Strength

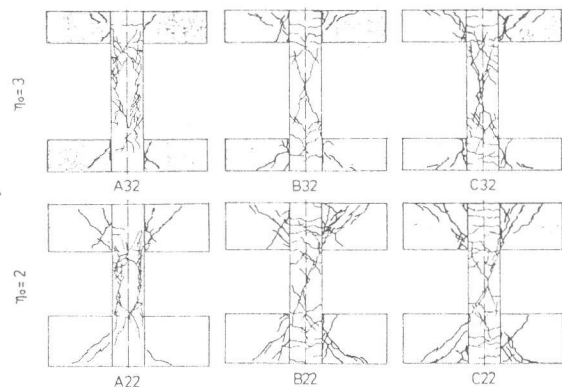


図-3 ひび割れ状況

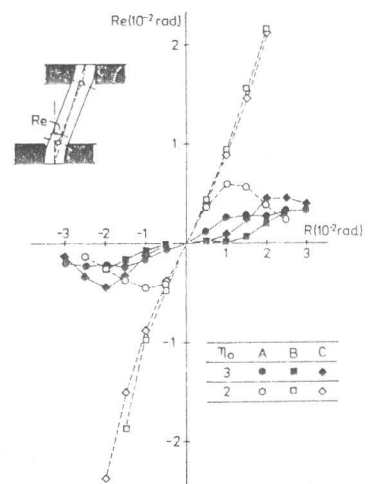


図-4 柱の変形

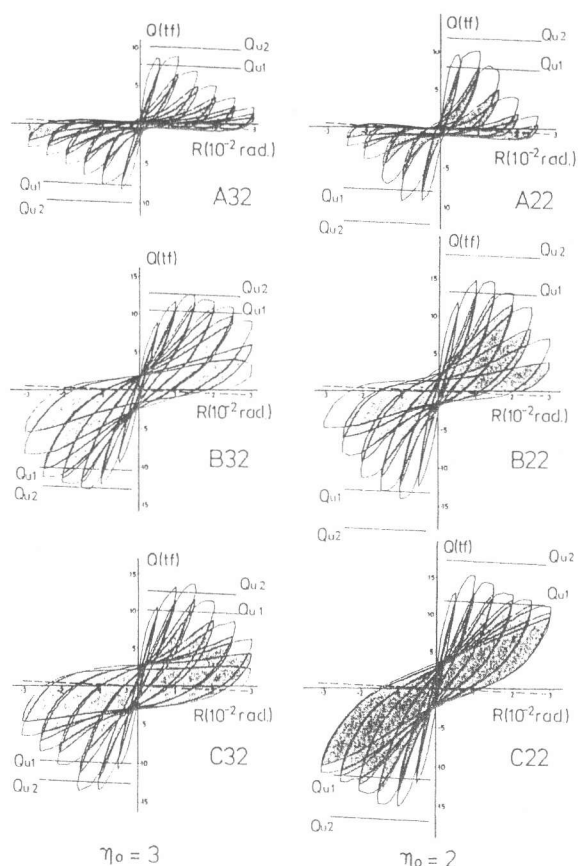


図-5 履歴曲線

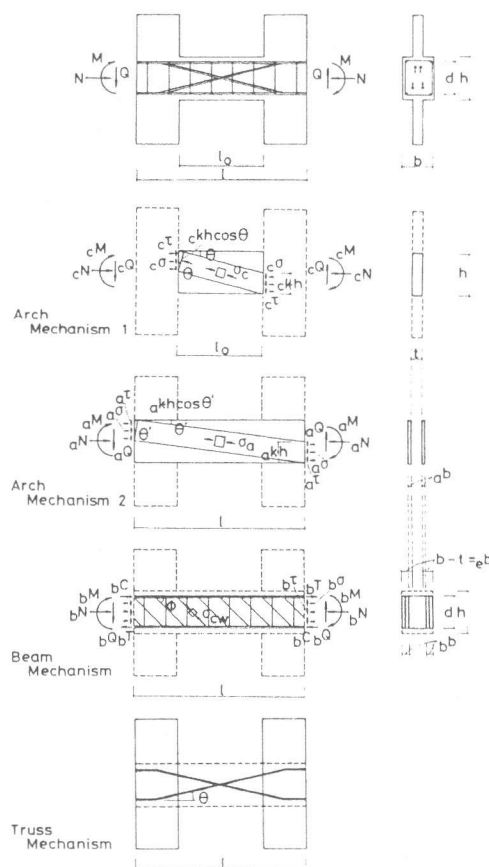


図-6 解析モデル

表-3 n-q 方程式

$n_0 = -2\phi$	$q = \{\sqrt{4(n+2\phi)(t_1-n-2\phi)} + (n_0 \cdot t_1)^2 - n_0 \cdot t_1\} / 2$
$n_1 = -2\phi - t_1(1-\gamma_0/\gamma)/2$	$q = \{\sqrt{4n_1(1+\Lambda-n_1)} + \xi_1^2 + 2\Lambda(4\gamma \cdot \gamma_0 - 1 - n \cdot n_0) - \xi_1\} eb_1 / 2$
$n_2 = -2\phi + 1/2 - (eb_1 \cdot \gamma + t_1 \cdot \gamma_0) \lambda_1 / \sqrt{\lambda_1^2 + 1}$	$q = \lambda_1(n - n_2) + q_2$
$n_3 = -2\phi - (2\delta \cdot eb_1 \cdot \gamma + t_1 \cdot \gamma_0) \lambda_1 / \sqrt{\lambda_1^2 + 1} + \Psi \cdot eb_1(d_1 + n) + (2\delta \cdot eb_1 + t_1) / 2$	$q = \{\sqrt{4n_j(2\delta + \Lambda - n_j)} + \xi_2^2 + 4\delta\Lambda(4\gamma \cdot \gamma_0 - 1 - n \cdot n_0) - \xi_2 + 2\Psi d_1\} eb_1 / 2$
$n_4 = -2\phi + \Psi \cdot eb_1(d_1 + n) + (2\delta \cdot eb_1 + t_1) / 2$	$q = \Psi eb_1 d_1 + (2\delta \cdot eb_1(\sqrt{1+n^2} - n) + eb_1(\sqrt{1+n\delta} - n_0)) / 2$
$n_5 = 2\phi + \Psi \cdot eb_1(d_1 - n) + (2\delta \cdot eb_1 + t_1) / 2$	$q = \{\sqrt{4n_j(2\delta + \Lambda - n_j)} + \xi_2^2 + 4\delta\Lambda(4\gamma \cdot \gamma_0 - 1 - n \cdot n_0) - \xi_2 + 2\Psi d_1\} eb_1 / 2$
$n_6 = 2\phi - (2\delta \cdot eb_1 \cdot \gamma + t_1 \cdot \gamma_0) \lambda_2 / \sqrt{\lambda_2^2 + 1} + \Psi \cdot eb_1(d_1 - n) + (2\delta \cdot eb_1 + t_1) / 2$	$q = \lambda_2(n - n_7) + q_7$
$n_7 = 2\phi + 1/2 - (eb_1 \cdot \gamma + t_1 \cdot \gamma_0) \lambda_2 / \sqrt{\lambda_2^2 + 1}$	$q = \{\sqrt{4n_7(1+\Lambda-n_7)} + \xi_1^2 + 2\Lambda(4\gamma \cdot \gamma_0 - 1 - n \cdot n_0) - \xi_1\} eb_1 / 2$
$n_8 = 2\phi - t_1(1-\gamma_0/\gamma)/2 + 1$	$q = \{\sqrt{4(n - eb_1 - 2\phi)(t_1 - n + eb_1 + 2\phi)} + (n_0 \cdot t_1)^2 - n_0 \cdot t_1\} / 2$
$n_9 = 2\phi + 1$	

6.2 たれ壁・腰壁付き平行配筋柱の n-q 方程式

たれ壁・腰壁付き平行配筋柱の n-q 相関曲線は、9 区間に分けて表現され、各区間における n-q 方程式および特定点における無次元化軸力： n_i （ただし、 $i = 0, 9$ ）を表-3に、また、方程式に用いた記号を表-4に示す。なお、せん断補強係数： Ψ が Ψ_0 （ $= 2\phi/\eta$ ）を超える場合には、 $\Psi = \Psi_0$ として計算する。

6.3 たれ壁・腰壁付きX形配筋柱の n-q 方程式

たれ壁・腰壁付きX形配筋柱の n-q 方程式は平行配筋柱の n-q 方程式にX形主筋のトラス機構による n-q 方程式を累加することにより求められる。ただし、この解析では、X形主筋の角度 θ を任意に選択できるよ

表-4 記号

$\lambda_1 = [\alpha \cdot \omega_1 - (\alpha \cdot \gamma + \sqrt{(\alpha \cdot \gamma)^2 - \omega_1 \cdot \rho_1}) \gamma] / [B_1 \cdot \omega_1 - (B_1 \cdot \gamma - \sqrt{(B_1 \cdot \gamma)^2 - \omega_1 \cdot \rho}) \gamma]$	
$\lambda_2 = [\alpha \cdot \omega_2 - (\alpha \cdot \gamma + \sqrt{(\alpha \cdot \gamma)^2 - \omega_2 \cdot \rho_2}) \gamma] / [B_2 \cdot \omega_2 - (B_2 \cdot \gamma + \sqrt{(B_2 \cdot \gamma)^2 - \omega_2 \cdot \rho}) \gamma]$	
$\alpha = (d_1 + \eta) / 2$	$\beta_1 = (d_1 + \eta - 1) / 2$
$\delta = (1 - 2\Psi) / 2$	$\rho = \gamma^2 - \alpha^2$
$\omega_1 = \alpha^2 + \beta_1^2$	$\omega_2 = \alpha^2 + \beta_2^2$
$\xi_1 = \eta + \Lambda \cdot n_0$	$\xi_2 = 2\delta \cdot \eta + \Lambda \cdot n_0$
$n_j = (n + 2\phi - eb_1 \cdot \Psi(d_1 + \eta)) / eb_1$	$\bar{n}_j = (n - 2\phi - eb_1 \cdot \Psi(d_1 - \eta)) / eb_1$
$q_2 = (eb_1 \cdot \gamma + t_1 \cdot \gamma_0) / \sqrt{\lambda_1^2 + 1} - (eb_1 \cdot \eta + t_1 \cdot n_0) / 2$	
$q_7 = (eb_1 \cdot \gamma + t_1 \cdot \gamma_0) / \sqrt{\lambda_2^2 + 1} - (eb_1 \cdot \eta + t_1 \cdot n_0) / 2$	
$\eta = l/h$	$n_0 = l_0/l_i$
$t_1 = t/b$	$eb_1 = eb/b$
$\Phi = at \cdot \sigma_y / (b \cdot h \cdot F_c)$	$\bar{\Psi} = aw \cdot \sigma_w / ((h-t) \cdot x \cdot F_c)$
$n = N / (b \cdot h \cdot F_c)$	$q = Q / (b \cdot h \cdot F_c)$

表-5 実験値と理論値の対応

	p^{Φ}	d^{Φ}	ψ	η_0	d_1	n	q_{th}		q_{me}		q_{me}/q_{th}			
							Theory 1	Theory 2	pos.	neg.	Theory 1 pos. neg.	Theory 2 pos. neg.	Theory 1 pos. neg.	Theory 2 pos. neg.
A32	0.175	0	0.033	3	0.75	0.199	0.076	0.100	0.088	0.082	1.16	0.88	1.09	0.83
A22	0.206	0	0.038	2	0.75	0.200	0.091	0.105	0.115	0.104	1.26	0.83	1.14	0.75
B32	0.091	0.091	0.034	3	0.75	0.200	0.105	0.129	0.125	0.127	1.19	0.97	1.21	0.98
B22	0.091	0.091	0.034	2	0.75	0.200	0.133	0.182	0.149	0.141	1.12	0.82	1.06	0.77
C32	0.079	0.079	0.030	3	0.75	0.207	0.088	0.111	0.119	0.118	1.36	1.08	1.34	1.06
C22	0.081	0.081	0.030	2	0.75	0.199	0.106	0.155	0.137	0.139	1.30	0.89	1.31	0.90

にしているの、たれ壁・腰壁付き平行配筋柱の
 相関曲線がもつ直線部の勾配 λ_1 , λ_2 とX形
 主筋の相関曲線の勾配 $\tan \theta$ との関係によって
 累加則が次の4つの場合に分けられる。

- Case 1 : $\theta > \tan^{-1}(1/n)$
 Case 2 : $\tan^{-1}(1/n) \geq \theta > \tan^{-1}\lambda_1$
 Case 3 : $\tan^{-1}\lambda_1 \geq \theta > \tan^{-1}(-\lambda_2)$
 Case 4 : $\tan^{-1}(-\lambda_2) \geq \theta$

7. 実験値と理論値の対応

本実験による最大強度を2種類の解析法、理
 論1および理論2を用いて比較検討を行なった。
 理論1は、6.2および6.3節で述べた解析
 法で耐力を算定するもので、理論2は、壁端位
 置で柱材が完全に固定されていると仮定して、
 柱長さ l_0 の柱材の耐力を算定するものである。

図-7に各試験体の理論1および理論2による $n-q$ 相関曲線 I_1 および I_2 と実験値の関係を示す。
 また、表-5に理論値と実験値の比較を示している。いずれの試験体においても実験値は I_1 と I_2 の間
 にあるが、平行配筋のAシリーズでは理論1に、X形配筋のCシリーズでは理論2にそれぞれ近い結果を
 示し、Bシリーズにおいては、B22は理論1に、B32は理論2にそれぞれ近い結果を示している。

たれ壁・腰壁付き平行配筋柱については、ほぼ理論1の方法で予測できると考えて良く、このような複
 雑な抵抗性状をもつ柱の抵抗機構をある程度把握できていると考えて良い。また、X形配筋柱については
 実験値と理論値の対応は必ずしも良くないが、壁の耐力を十分大きくすることにより、ほぼ理論2の方法
 で予測できると考えられる。

8. 結論

たれ壁・腰壁によって短柱化した柱にX形配筋を適用し、柱の性能がどのように改善されるかを6体の
 試験体について実験を行ない、さらに、せん断強度の理論解を導くことを試み次の結論を得た。

- (1) たれ壁・腰壁によって短柱化した柱にX形配筋を適用することにより、耐力およびエネルギー消費
 能力を飛躍的に大きくできる。
- (2) たれ壁・腰壁付きX形配筋柱では、柱材の破壊よりも壁部の破壊が生じやすいので、X形配筋の効
 果を発揮させるためには、壁部分の耐力を十分に大きくする必要がある。
- (3) たれ壁・腰壁付き平行配筋柱のせん断強度は、壁部分で拘束されたアーチ機構による強度と残りの
 柱部分のアーチ機構とはり機構による強度の累加によってほぼ評価できる。
- (4) たれ壁・腰壁付きX形配筋柱では、上述の平行配筋柱の強度にX形主筋の強度を累加して求めるこ
 とができるが、実験値は若干安全側の値を示す。

(参考文献) 1) 南宏一; せん断を受ける鉄筋コンクリート部材の極限解析について、日本コンクリート
 工学協会, RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 1982年 6月 pp.1-18

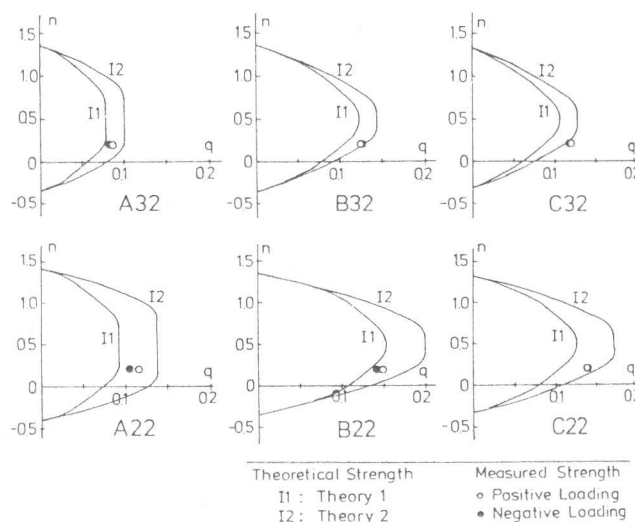


図-7 $n-q$ 相関曲線