

# 論文 鉄筋コンクリート造プレキャスト壁の滑り挙動に関する研究

五十嵐賢次\*1・倉田光春\*2・Sanjay Pareek\*3・木下逸人\*4

**要旨:**柱壁間にスリットを有し水平接合筋を省略したプレキャスト壁の水平加力実験を行った。パラメータは鉛直接合筋量(Ph=0.54,0.95,1.50%)とし、いずれの試験体も引張り側柱の降伏と壁頭・壁脚の滑り破壊を起こした。鉛直接合筋量を多くしても最大耐力の向上は期待できないが、履歴曲線では最大耐力以降の急激な耐力低下を防ぐ効果があった。また、併せて有限要素法による二次元弾塑性解析を行った。加力は一方向の単調載荷で、弾性剛性および最大耐力は実験値によく適合した。

**キーワード:**プレキャスト壁, スリット, 滑り挙動, 有限要素法

## 1. はじめに

これまでに筆者らは、①プレキャスト耐震壁の施工性を簡素化すること、②最大耐力以降の急激な強度低下を防ぎ靱性を確保することを目的として、柱と壁の間にスリットを設け、水平接合筋を省略した試験体の実験<sup>1)</sup>を行った。これにより、柱と梁で囲まれる耐震壁の定義からはずれることになるが、実験結果としてはスリットを設けることで初期剛性や最大耐力は低下し、変形量やエネルギー吸収量は大きくなった。このように耐震壁を強度抵抗型から、強度と変形量を調節できる靱性抵抗型に移行すれば、設計時に融通性を持たせることができる。

また、プレキャスト壁の変形量の中で、水平接合部の滑り量が顕著に表れた試験体があった。プレキャスト部材の滑りによるメカニズムはまだ解明されてなく、解析には実験で得られた係数などを用いているのが現状である。

今回、柱・梁フレーム内にあるこれらプレキャスト壁の挙動を調べることに、特に水平接合部の滑り性状を得るために、壁頭・壁脚を滑らせることを前提として実験を行った。

## 2. 試験体概要

試験体の形状および配筋を図1に、試験体諸元を表1に示す。試験体は両脇にスリット幅20mmを含む1層の壁と柱、その上下にある反力梁からなる。実験のパラメータは、水平接合部の鉛直接合筋量で、コッターは設けていない。鉛直接合筋比は Ph=0.54,0.95,1.50%の3種で、各々 PN-0.5, PN-1.0, PN-1.5 試験体とした。また、それ以外の配筋は統一した。

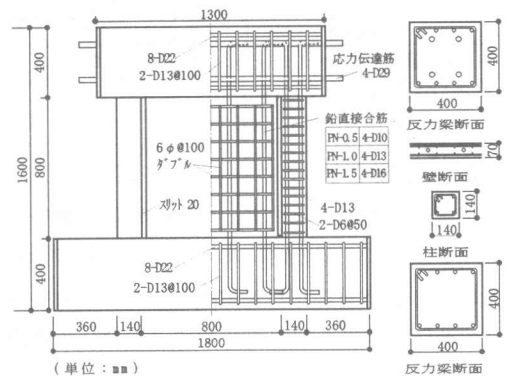


図1 試験体形状および配筋

\*1 (株)福田組建設本部技術部主任 工修 (正会員)

\*2 日本大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

\*3 日本大学助手 工学部建築学科 工博 (正会員)

\*4 日本大学大学院工学研究科建築学専攻

表1 試験体諸元

試験体	PN-0.5	PN-1.0	PN-1.5
壁厚さ	70mm		
縦横筋 (SWRM6)	6 φ @100 ダブル (Ps=0.8%)		
鉛直接合筋 (SD345)	4-D10 (Ph=0.54%)	4-D13 (Ph=0.95%)	4-D16 (Ph=1.50%)
柱断面	140 × 140mm		
主筋 (SD295)	4-D13 (Pt=1.5%)		
HOOP (SD295)	2-D6@50 (Pw=0.8%)		
反断面	400 × 400mm		
力主筋 (SD345)	8-D22 (Pt=1.1%)		
梁STP. (SD295)	2-D13@100 (Pw=0.64%)		
初期軸力	120kN		

試験体の製作は、コンクリートを平打ちとし、プレキャスト化を想定しているため、壁・柱と反力梁の2回に分けて打設した。使用材料の性状を表2に示す。

表2 材料性状

試験体	コンクリート					
	柱・壁			反力梁		
	σ c	cE	ε c	σ c	cE	ε c
PN-0.5	46.1	3.49	0.253	43.2	3.57	0.211
PN-1.0	40.6	3.10	0.270	41.4	3.62	0.221
PN-1.5	46.9	3.44	0.256	44.8	3.55	0.257
鉄筋						
	σ y	sE	接合筋	σ y	sE	
φ 6	483.8	2.01	D10	375.4	1.85	
D6	317.8	1.81	D13	356.8	1.83	
D13	355.5	1.92	D16	376.7	1.89	
D22	370.2	1.84				

σ c : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>), ε c : 圧縮強度時ひずみ (%)  
 σ y : 降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>), cE : 弾性係数 (× 10<sup>3</sup> N/mm<sup>2</sup>)  
 sE : 弾性係数 (× 10<sup>3</sup> N/mm<sup>2</sup>)

### 3. 実験方法

加力方法を図2に示す。加力時に応力集中を避けるために、反力梁にH鋼をPC鋼棒で緊結した。上部H鋼を介して試験体に初期軸力を与えて油圧バルブを開めた状態で、上部反力梁に水平力を载荷した。水平力は1台の油圧ポンプから、同一加力方向の押しと引きの2台の水平ジャッキに分岐し、加力されるようにした。

変形測定方法は図3に示す通り、層間変位(δ)を下部反力梁上端から加力位置の高さ(h=1000mm)で除した値を層間変形角 R (δ/h)とした。その他に上部反力梁の回転、壁頭と壁脚の水平接合部滑り変位を測定した。また、各

部鉄筋にはひずみゲージを貼付けた。貼付位置は柱主筋の柱頭部、柱脚部および鉛直接合筋の壁頭部と壁脚部である。

加力サイクルを図4に示す。加力は変位制御で正負2回繰返し、R=5(× 10<sup>-3</sup>rad.)以降は5 × 10<sup>-3</sup>rad.毎に増加させ、最大層間変形角は19サイクルのR=40(× 10<sup>-3</sup>rad.)の正側とした。

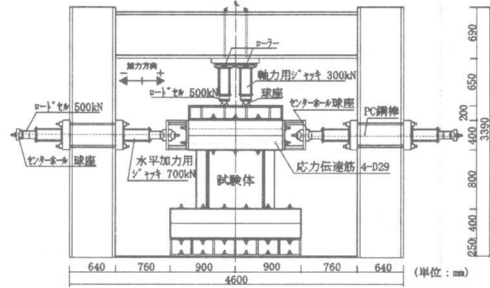


図2 加力方法

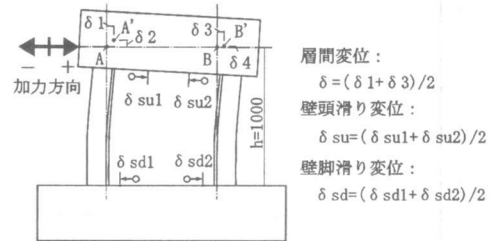


図3 変形測定方法

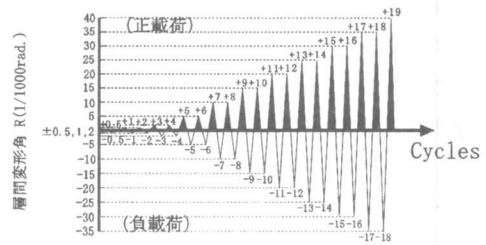


図4 加力サイクル

### 4. 実験経過

各試験体の最終破壊状況を図5に示す。

PN-0.5 試験体は R=2(× 10<sup>-3</sup>rad.)で柱に引張りひびわれ、R=5(× 10<sup>-3</sup>rad.)で壁中央にせん断ひび

われと水平接合部にひびわれが発生し、それ以降は壁には殆どせん断ひびわれは見る事ができなかった。R=10(× 10<sup>3</sup>rad.)で壁脚, R=15(× 10<sup>3</sup>rad.)では壁頭の鉛直接合筋が全て降伏した。

PN-1.0 試験体は R=2(× 10<sup>3</sup>rad.)で柱に引張ひびわれが生じ, R=5(× 10<sup>3</sup>rad.)で壁中央にせん断ひびわれが生じた。その後, R=10(× 10<sup>3</sup>rad.)で水平接合部にひびわれが発生し, 壁脚の鉛直接合筋が降伏し, R=15(× 10<sup>3</sup>rad.)で壁頭の鉛直接合筋が全て降伏した。

PN-1.5 試験体は R=2(× 10<sup>3</sup>rad.)で壁中央にせん断ひびわれ, R=5(× 10<sup>3</sup>rad.)で柱に引張ひびわれが発生した。R=10(× 10<sup>3</sup>rad.)では水平接合部にひびわれが発生し, せん断ひびわれも壁全体に広がった。同時に壁脚と壁頭の鉛直接合筋も全て降伏した。

各試験体ともに加力時に引張側となる柱は R=5 ~ 10(× 10<sup>3</sup>rad.)で全主筋が降伏し, 最終的には壁の隅角部コンクリートが剥落した。破壊形式は壁頭部および壁脚部の滑り破壊, 引張側柱の降伏である。鉛直接合筋量が多いほど, 壁のせん断ひびわれは顕著に現れた。

## 5. 実験結果

### 5.1 最大耐力

各試験体の最大耐力を表3に示す。表中の計算値は壁のせん断・曲げ・水平接合部のうちの最小強度 (min {wQsu, wQmu, wQh}) と, 柱の支点間距離による転倒モーメントおよび軸力の抵抗モーメントによる引張側柱の降伏 (cQy) で求めた。その際に, 壁には軸力が作用しないこととし, 水平接合部の強度算定式は Ph に上限があるので PN-1.5 試験体は Ph=0.01 を用いた。

PN-0.5 試験体および PN-1.0 試験体の最大耐力は R=5(× 10<sup>3</sup>rad.)で, PN-1.5 試験体は R=10(× 10<sup>3</sup>rad.)であった。PN-1.5 試験体と PN-1.0 試験体は, 正側でほぼ同じ値を示した。また負側の最大耐力は, 正側より 10 ~ 20%程度低下している。正側の最大耐力を計算値と比較すると, 3 試験体ともに計算値の方がやや上回ったが, 破壊モードも水平接合部で決まり, よく適合している。

以上より, 壁の滑り破壊で決まる場合に鉛直接合筋量を多くしても, Ph=1%を越えると最大耐力の増加は期待できないといえる。

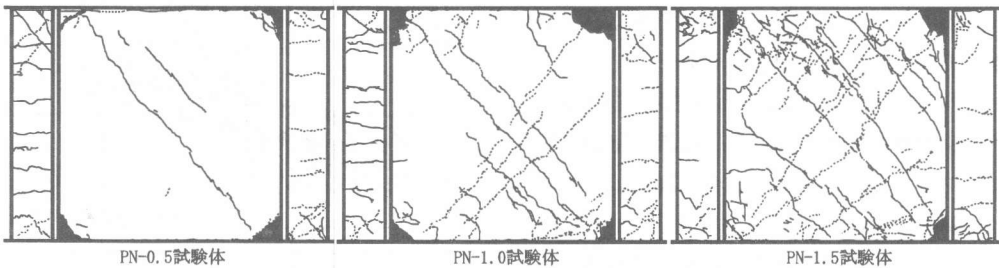


図5 最終破壊状況

表3 最大耐力

試験体	実験値	wQsu	wQmu	wQh	cQy	計算値	実/計	破壊モード
PN-0.5	278.9	177.9	91.5	72.4	225.0	297.4	0.94	引張柱降伏
	-215.0							0.72
PN-1.0	319.5	168.7	154.9	96.6	225.0	321.6	0.99	引張柱降伏
	-263.9							0.82
PN-1.5	312.0	179.1	256.4	105.3	225.0	330.3	0.94	引張柱降伏
	-276.9							0.84

(各耐力の単位: kN)

最大耐力計算値:  $Q = \min(wQsu, wQmu, wQh) + cQy$

壁せん断:  $wQsu = \left[ \frac{0.068P^{0.23}(Fc+180)}{\sqrt{M/(Q \cdot D) + 0.12}} + 2.7 \sqrt{cwh \cdot Pwh} + 0.100 \right] b \cdot j$

壁曲げ:  $wQmu = \Sigma wMu / ho$   
 $wMu = 0.5aw \cdot oy \cdot lw + 0.5N \cdot hw$

水平接合部:  $wQh = 0.7((Ph/2 + 0.005)b \cdot D \cdot oy + Nh)$   
 $(0.005 \leq Ph \leq 0.01, Phmax = 0.01)$

引張柱降伏:  $cQy = (at \times oy \times L + N \times L/2) / h$

## 5.2 Q-R曲線

各試験体の水平力一層間変形角 (Q-R) 曲線を図6~8に示す。

PN-0.5 試験体は  $R=+5(\times 10^3 \text{rad.})$  で耐力が急激に低下し,  $R=+15(\times 10^3 \text{rad.})$  には最大時の63%となった。それ以降は壁と柱頭部および柱脚部が接触して徐々に耐力が再上昇し,  $R=+40(\times 10^3 \text{rad.})$  では最大時の80%まで回復した。

PN-1.0 試験体は  $R=+5,+10(\times 10^3 \text{rad.})$  でほぼ同じ耐力を示し,  $R=+15(\times 10^3 \text{rad.})$  では上がらずに最大時の70%まで低下した。それ以降の耐力低下は緩やかになり,  $R=+40(\times 10^3 \text{rad.})$  では最大時の53%となった。

PN-1.5 試験体は  $R=+5,+10(\times 10^3 \text{rad.})$  でほぼ同じ耐力を示し, それ以降は緩やかに耐力低下した。 $R=+35(\times 10^3 \text{rad.})$  でも最大時の67%の耐力を保持した。

以上より, 鉛直接合筋量が多くなるほど最大耐力を保持し, それ以降の急激な耐力低下を防ぐ効果があると思われる。

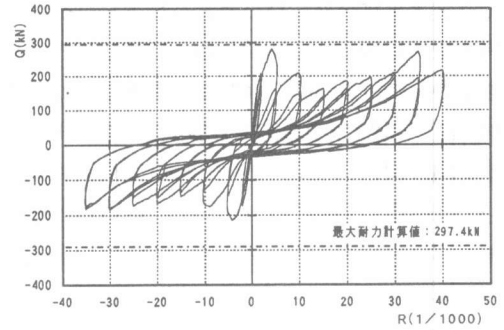


図6 Q-R曲線(PN-0.5試験体)

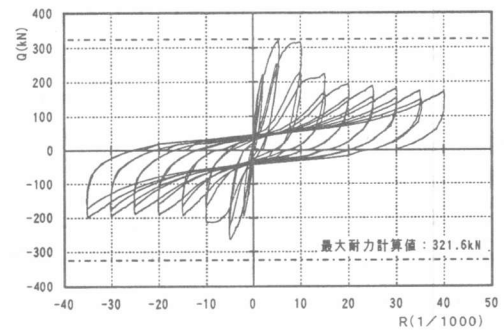


図7 Q-R曲線(PN-1.0試験体)

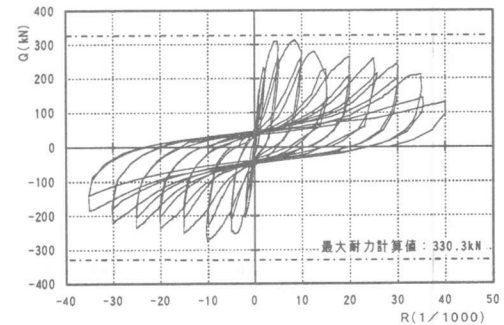


図8 Q-R曲線(PN-1.5試験体)

## 5.3 水平接合部滑り変位

層間変位は壁脚の滑り, 壁変形, 壁頭の滑り, 反力梁の回転から構成することができる。これら変位の占める割合を図9に示す。

加力当初は壁による変形が大部分を占めるが, 鉛直接合筋の降伏に伴って壁脚, 壁頭の順で急激に滑り変位の占める割合が増加し, 最終的には層間変位の約90%を占めた。

プレキャスト部材の接合部にある接合筋にはダウエル効果による抵抗機構がよく知られてい

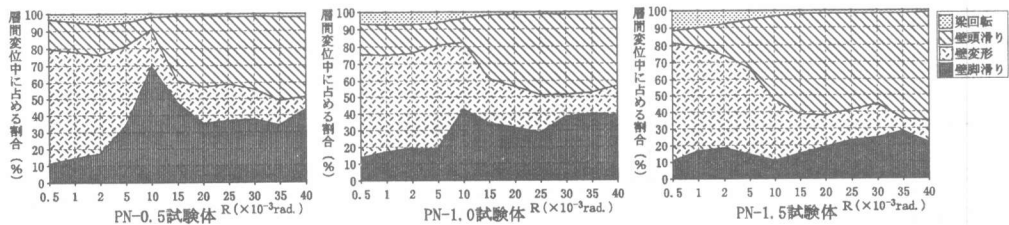


図9 変位成分割合

るが、その場合に接続筋は引張り降伏ではなく、塑性ヒンジを形成して降伏する挙動<sup>2)</sup>を示す。今、鉛直接合筋にはせん断力の他に転倒モーメントによる付加軸力が作用しているが、その数値は壁頭よりも壁脚の方が大きくなる。軸力が大きくなると、塑性モーメントが小さくなるために、壁脚の鉛直接合筋は早期に塑性ヒンジを形成し、滑り破壊する傾向にあると思われる。

また、壁脚・壁頭が滑り破壊した以降は反力梁の剛性割合が増し、梁回転による変形量が小さくなった。

## 6. 有限要素法による解析

### 6.1 解析条件

解析は有限要素法によるコンクリート構造物の二次元弾塑性解析<sup>3)</sup>で行った。解析モデルは図10に示すように試験体の上下反力梁、加力治具の鉄骨も含めた。コンクリートと鉄骨は三角形要素、鉄筋は線要素に分割しており、三角形要素の節点はX、Y方向の2自由度、線要素の節点はX、Y、 $\theta$ の3自由度とした。鉄骨は厚さ400mmで $E=2.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ を用いてほぼ剛体とし、応力集中を避けるようにした。拘束条件は下部反力梁底面のX、Yを固定とした。

加力は2点荷重の初期軸力 $N$ (120kN)をかけた後に、水平力 $Q$ を等分布で押しと引きを合わせて1kN毎の荷重増分とした。

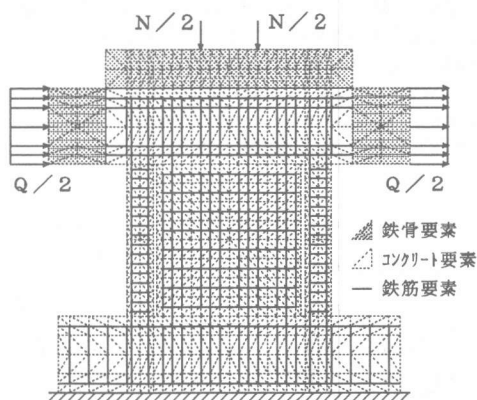


図10 解析モデル

コンクリートと鉄筋の材料特性を図11に示す。コンクリートの圧縮特性は、材料試験で得られた値とL.P.Saenz<sup>4)</sup>の提案式を引用して最大耐力時までを曲線化し、これを1軸応力下で判定した。また、鉄筋の材料特性はバイリニアで、降伏後のひずみ硬化は $H'=sE \times 10^6$ とした。

今回、水平接合部は滑り挙動が明確にモデル化できないので一体として取扱い、解析は一方の単調荷重で部材の最大耐力までとした。

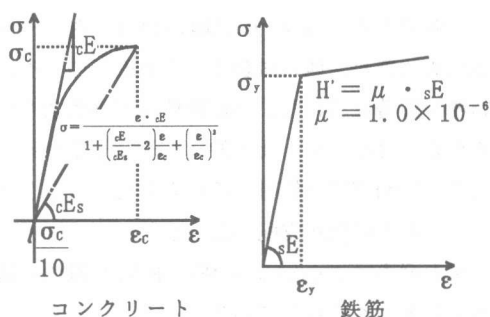


図11 材料特性

### 6.2 解析経過

PN-1.5試験体の最大耐力時ひびわれと鉄筋の降伏状況を図12に示す。各試験体とも鉄筋の降伏状況はほぼ同じとなり、鉛直接合筋量が多いほど壁中央のせん断ひびわれも多くなった。

解析経過としては、いずれの試験体も壁脚・引張側柱脚の順で曲げひびわれが発生した。その後、壁脚・壁頭の水平接合部と引張側柱のひびわれが進展し、やがて壁中央部にせん断ひびわれが発生した。壁脚のひびわれが水平接合部全てに広がり、引張側柱脚の全主筋が降伏した

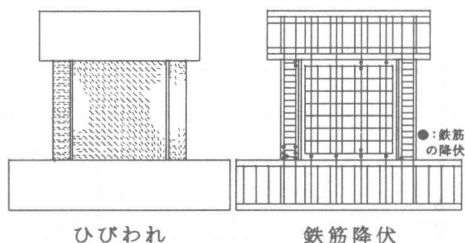


図12 最大耐力時状況(PN-1.5試験体)

後に、壁脚の鉛直接合筋が全て降伏した。この時に試験体は部材降伏を迎えて大変形を起こし、それ以降は殆ど耐力は上昇しなかった。

水平接合部の滑り挙動を除いて、諸現象の発生順序は実験によく適合しており、破壊形式は引張側柱脚の降伏と壁脚の鉛直接合筋降伏による水平接合部破壊であった。

### 6.3 弾性剛性・最大耐力

弾性剛性と最大耐力の解析結果を表4に示す。両者ともに PN-1.0 試験体のコンクリートの圧縮強度が、他の試験体よりも低いのでその影響が顕著に現れた。弾性剛性は実験値よりやや大きくなったが、比較的良好に適合している。ここでは鉛直接合筋量の違いよりも、コンクリートの弾性係数が支配的となった。

最大耐力は PN-0.5 試験体と PN-1.5 試験体は実験値とよく適合している。

表4 解析結果

試験体	弾性剛性			最大耐力		
	実験	解析	実/解	実験	解析	実/解
PN-0.5	365.5	416.9	0.88	278.9	285	0.98
PN-1.0	361.6	379.8	0.95	319.5	279	1.14
PN-1.5	380.2	414.8	0.92	312.0	322	0.97

(弾性剛性：kN/mm，最大耐力：kN)

### 6.4 Q-R曲線

各試験体のQ-R曲線を図13に示す。いずれの試験体も部材降伏時の剛性が高くなっているが、これは解析値には水平接合部の滑り変位が考慮されていないからである。今後の検討課題

としては、水平接合部の滑りモデルの提案および繰返し荷重による除荷剛性を設定し、最大耐力以降の履歴追跡である。これらのデータを得るための接合部詳細実験を行い、順次解決していく必要がある。

### 7. おわりに

鉛直接合筋量をパラメータにした今回の実験では以下のことが明らかになった。

- 1) 鉛直接合筋量が多いほど、壁のせん断ひびわれは顕著に現れる。
- 2) 壁の滑り破壊で決まる場合に、鉛直接合筋量を多くしても  $Ph=1\%$  を越えると、最大耐力の増加は期待できない。
- 3) 鉛直接合筋量が多くなるほど、最大耐力を保持し、それ以降の急激な耐力低下を防ぐ効果があると思われる。
- 4) 鉛直接合筋は付加軸力の大きい壁脚の方が早期に塑性ヒンジを形成し、滑り破壊を起こす傾向にある。
- 5) 有限要素法解析では、弾性剛性・最大耐力については実験値によく適合した。

### 参考文献

- 1) 五十嵐賢次，他：「可撓性を有するプレキャスト耐震壁の実験的研究」，構造工学論文集，Vol.43B，pp.239-247，1997.4
- 2) 例えば，望月重，他：「壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力」，日本建築学会構造系論文報告集 No.424，pp.11-22，1991.6，など
- 3) 例えば，磯畑脩：「有限要素法によるコンクリート構造物の2次元弾塑性解析」，日本建築学会論文報告集，No.189，pp.43-50，1971.11，など
- 4) L.P.Saenz：「Disc.of" Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete" by Desayi and Krishnan」，Journal of ACI，Proc.V.61，No9，pp.1229-1235，1964.9

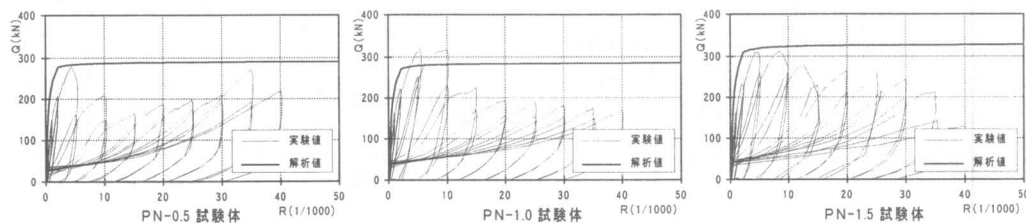


図13 Q-R曲線