

## [50] 多数の小開口を持つ耐震壁の水平加力実験

正会員 ○ 是永 健好 (大成建設技術研究所)

正会員 吉崎 征二 (大成建設技術研究所)

江崎 哲朗 (大成建設技術研究所)

外村 憲太郎 (大成建設原子力部)

## 1. まえがき

原子炉建屋には、鉄筋コンクリート造耐震壁に配管のための小開口が多数あり、同一レベルに小開口が並ぶ場合も多い。このような多数小開口を持つ耐震壁に関するデータはほとんどなく、円形開口を持つせん断部材の研究もほとんどがはりに関するものである。

そこで、原子炉建屋を対象とした多数小開口を持つ耐震壁36体の試験体に対する曲げせん断加力実験を行なった。本報告は、既報告の23体<sup>1)~3)</sup>(試験体名の変更あり、付表参照)を含め、実験結果を総合的に検討したものである。

## 2. 実験概要

実験の主な目的は、開口数、開口配置、開口寸法、開口補強、壁筋比、プレストレス量等のパラメーターの相違が、壁版のせん断性状、特に終局せん断強度にどのように影響するかを把握することである。

## 2.1 試験体

図-1に代表的な試験体の形状及び配筋を、図-2に試験体の種類を示す。パラメーターは以下の通りである。

- 1) 水平断面開口数 0, 3, 5, 7, 10個
- 2) 開口段数 0, 1, 2, 4段
- 3) 開口配置 集中, 分散, 千鳥
- 4) 開口径 (cm) 0, 4.8, 10.2, 16.5
- 5) 平均壁筋比 (%) 0, 0.64, 1.07, 1.28, 2.84
- 6) 開口補強 (X型補強) 異形棒鋼 D6, D10, D13  
PC鋼線 5, 7mm  
PC鋼より線 2-φ2.9
- 7) プレストレス ( $\text{Kg/cm}^2$ ) 0, 30 (40), 60 (80)  
( ) 内は開口間の鉛直応力度
- 8) 柱型 有, 無

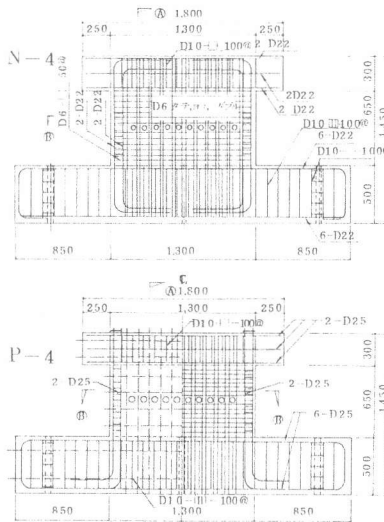


図-1 試験体の形状、配筋

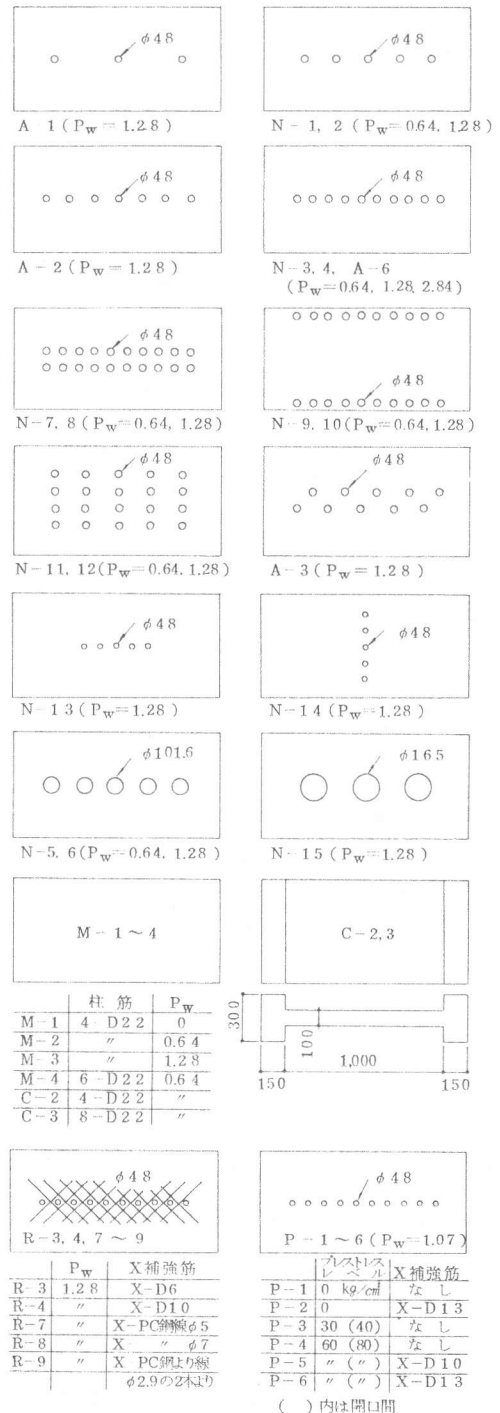


図-2 試験体の種類

### 9) 曲げ補強筋

4-D22 6-D22, 8-D22, 4-D25 (Pシリーズ)

原子炉建屋の耐震壁の壁厚は厚く、柱が壁の中に設けられる場合も多いため、試験体は柱型を持たない矩形断面の壁を標準型とした。N, Aシリーズは、開口の配置、寸法の影響を検討するための試験体である。M, Cシリーズは、開口壁と比較のための無開口耐震壁であり、Cシリーズは柱型を有している。Rシリーズは、開口補強の効果を検討するための試験体で、補強筋は異形棒鋼とP C鋼材を使用した。Pシリーズは、開口補強の有無、プレストレス量の相違による影響を検討するための試験体である。

壁厚は、Pシリーズでは12cm、他のシリーズでは10cmである。

### 2.2 加力方法

図-3に加力装置を示す。試験体の下部はり型を試験体に固定し、上部はり型に正負繰返し水平力を加えた。加力には一方向2台の油圧ジャッキを用い、1台ではり型を押し、1台でP C鋼棒(φ32)を介してはり型を引張った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊状況

図-4に一例としてN-4の荷重変形関係を、表-1に実験結果一覧を示す。

初ひび割れは、開口壁ではすべて開口部から図-5に示すように45°方向に発生した。その後、荷重の増加とともに開口部以外の壁面にもせん断ひび割れが発生した。最終的な破壊は、開口が壁面に分散している試験体(N-1, 2, A-1, 3)では開口部の影響をあまり受けずに斜め引張破壊した。その他の開口壁では、開口間の短柱状の部分に斜めひび割れ(図-6)が発生し、その部分でせん断破壊した。

ひび割れパターンの代表例を図-7に示す。ひび割れは壁筋量の多いものほど分散し、それにX補強筋量が増すとさらに分散性が良くなった。また、P C壁(P-3~6)では、緊張力によって初ひび割れ荷重はかなり増したが、ひび割れが開口部と柱に相当する部分に集中する傾向が見られた。

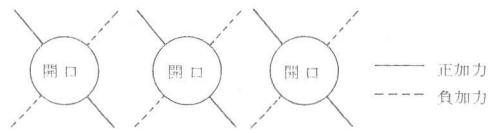


図-5 初ひび割れ発生位置



図-6 開口間の斜めひび割れ

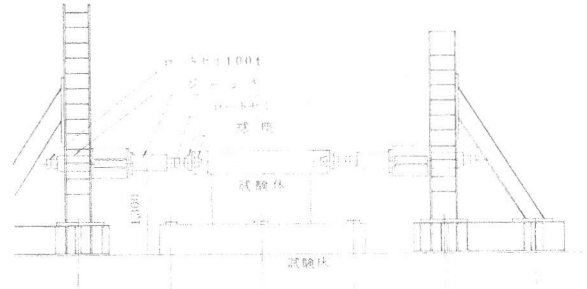


図-3 加力装置

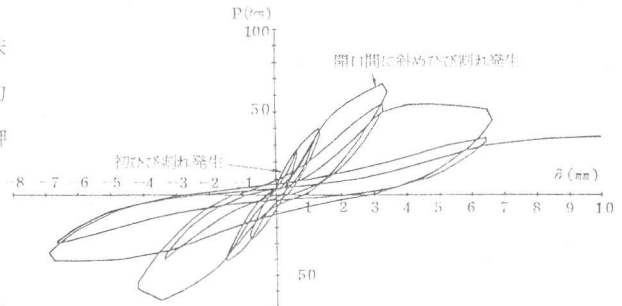


図-4 N-4 荷重変形関係

表-1 実験結果一覧

| 試験体   | $F_c$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 斜めひび割れ発生時<br>$Q$ (kg) | $\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | 最大<br>$Q$ (kg) | 荷重時<br>$\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $R$ ( $\times 10^{-3}$ ) |
|-------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------|-------------------------------------|--------------------------|
| N-1   | 306                            | 15.0                  | 14.2                         | 79.5           | 75                                  | 9.6                      |
| N-2   | "                              | 10.0                  | 9.4                          | 92.5           | 87                                  | 14.6                     |
| N-3   | 291                            | 15.0                  | 18.3                         | 55.0           | 67                                  | 4.0                      |
| N-4   | "                              | 12.5                  | 15.2                         | 67.0           | 82                                  | 5.0                      |
| N-5   | 285                            | 10.0                  | 12.6                         | 47.0           | 59                                  | 4.0                      |
| N-6   | "                              | 10.0                  | 12.6                         | 50.5           | 64                                  | 4.4                      |
| N-7   | 275                            | 12.5                  | 15.2                         | 55.0           | 67                                  | 5.0                      |
| N-8   | "                              | 15.0                  | 18.3                         | 61.5           | 75                                  | 5.0                      |
| N-9   | 294                            | 10.0                  | 12.6                         | 51.0           | 62                                  | 4.6                      |
| N-10  | "                              | 15.0                  | 18.3                         | 58.5           | 71                                  | 4.8                      |
| N-11* | 274                            | 12.5                  | 12.1                         | 62.0           | 61                                  | 7.8                      |
| N-12* | "                              | 15.0                  | 14.5                         | 68.5           | 67                                  | 7.6                      |
| N-13  | 413                            | 7.5                   | 6.5                          | 83.0           | 78                                  | 8.8                      |
| N-14* | "                              | 15.0                  | 12.9                         | 91.0           | 80                                  | 10.0                     |
| N-15  | 320                            | 5.0                   | 4.3                          | 53.0           | 66                                  | 4.7                      |
| A-1   | 335                            | 8.9                   | 7.7                          | 88.4           | 76                                  | 8.6                      |
| A-2   | "                              | 8.0                   | 8.3                          | 81.9           | 85                                  | 8.0                      |
| A-3   | "                              | 5.9                   | 5.7                          | 86.4           | 82                                  | 9.2                      |
| A-6   | 345                            | 8.4                   | 10.2                         | 73.0           | 89                                  | 7.4                      |
| M-1   | 288                            | 5.0                   | 4.3                          | 59.5           | 46                                  | 10.0                     |
| M-2   | "                              | 10.0                  | 8.7                          | 80.0           | 62                                  | 9.2                      |
| M-3   | 299                            | 17.5                  | 15.2                         | 94.0           | 72                                  | 10.0                     |
| M-4   | "                              | 12.5                  | 10.8                         | 87.5           | 67                                  | 8.4                      |
| C-2   | 357                            | 15.0                  | 13.0                         | 104.0          | 65                                  | 10.0                     |
| C-3   | 320                            | 12.5                  | 10.8                         | 117.0          | 73                                  | 10.0                     |
| R-3   | 362                            | 5.0                   | 4.3                          | 79.5           | 97                                  | 6.9                      |
| R-4   | "                              | 7.5                   | 6.5                          | 103.0          | 126                                 | 8.5                      |
| R-7   | 254                            | 8.0                   | 9.8                          | 63.5           | 78                                  | 5.2                      |
| R-8   | "                              | 9.9                   | 12.1                         | 72.3           | 88                                  | 8.5                      |
| R-9   | "                              | 8.0                   | 9.8                          | 69.1           | 84                                  | 7.5                      |
| P-1   | 306                            | 7.4                   | 7.5                          | 68.9           | 70                                  | 2.8                      |
| P-2   | "                              | 16.7                  | 17.0                         | 131.2          | 133                                 | 4.7                      |
| P-3   | "                              | 21.7                  | 22.1                         | 100.0          | 102                                 | 2.5                      |
| P-4   | 280                            | 52.5                  | 53.4                         | 92.4           | 94                                  | 1.9                      |
| P-5   | "                              | 44.4                  | 45.1                         | 122.4          | 124                                 | 2.7                      |
| P-6   | "                              | 28.4                  | 28.9                         | 152.7          | 155                                 | 3.1                      |

注)  $\tau = Q / A$ ,  $\gamma_1 = 1 - \frac{e}{l}$  (\*は $\gamma_2 = 1 - \frac{e}{A_0}$ ,  $A_0$ :開口全断面積)  
 $\sqrt{h/l}$

### 3.2 結果の検討

開口の配置及び個数が、壁版の耐力にどれだけ影響するかを検討するために、図-8、9にN、Aシリーズの正側包絡線を比較して示す。図-8は壁筋比0.64%であり、無開口の試験体M-2の包絡線に近いのはN-1である。図-9は壁筋比1.28%であり、無開口の試験体M-3に近いのはN-2、A-1、A-3である。A-1は $\phi 48$ の開口を3個有し、開口間隔は400mm ( $=8.3D$ ,  $D$ は開口径)である。N-1とN-2は $\phi 48$ の開口を5個有し、開口間隔は200mm ( $=4.2D$ )である。したがって、同一レベルに開口が並ぶ場合、開口間隔が開口径の約4倍以上あれば壁のせん断耐力は無開口壁には等しいと考えても差しつかえないと言える。A-3は開口数が10個でA-2の7個よりも多いが、開口が2段に5個ずつ千鳥に配置されているため、A-2よりせん断耐力は大きく無開口壁M-3の包絡線に近い。また、N-7、8とN-11、12を比較した場合、同じ開口数( $\phi 48$ が20個)でも開口が壁全体に分散しているN-11、12の方が、せん断耐力は大きく壁の変形能力も増大している。

図-10、11に終局せん断強度 $\tau_u$ を開口径と壁筋比をパラメーターとして示す。終局せん断強度の算定にあたり、壁の長さは壁版全巾とし、学会規準による開口低減率 $r_1$ 、 $r_2$ のいずれか小さい方を適用した。表-1に示すように、開口が分散しているN-11、12と開口が縦1列5個のN-14は $r_2$ を用い、他の開口壁は $r_1$ によって終局せん断強度を算出した。

図-10に示すように、開口部の水平欠損長さ( $\ell_o$ )と開口径に対する開口間隔は同じでも、開口面積( $A_o$ )が大きくなると $\tau_u$ が小さくなる傾向が見られる。更に、開口が小さい場合(N-3、4)は無開口壁より $\tau_u$ は高く、開口が大きくなると無開口壁に比べて $\tau_u$ は小さくなる。

図-11に示すように、壁筋比1.28%までは壁筋量の増大とともに $\tau_u$ は高くなる。なお、A-6は壁筋比2.84%であるが、壁筋比1.28%のN-4と $\tau_u$ は同じである。したがって、ある程度壁筋量が増え、壁筋による補強効果に限界があると言える。ちなみに、A-6では開口間の壁筋比が

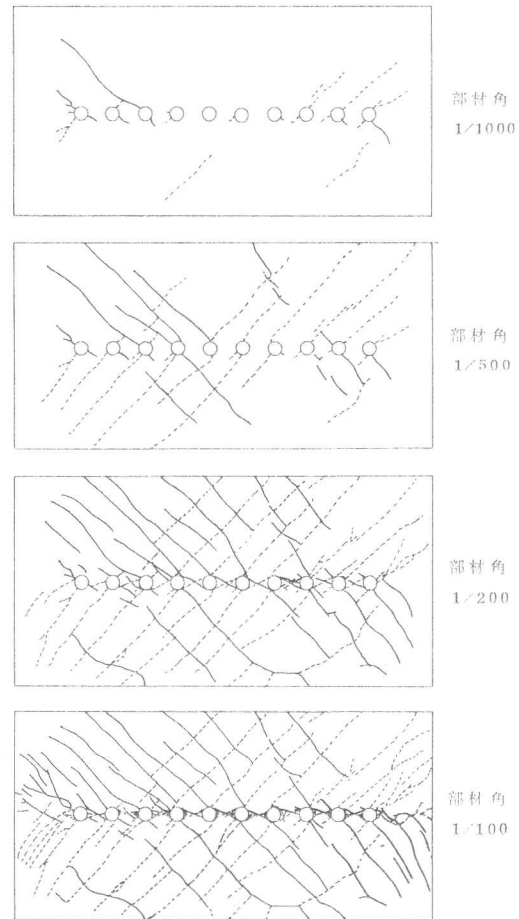


図-7 ひび割れパターン (N-4)

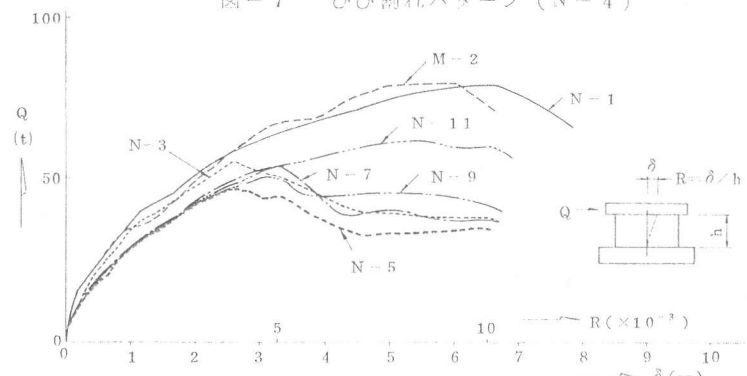


図-8 N、Aシリーズ包絡線の比較 ( $R_v=0.64\%$ )

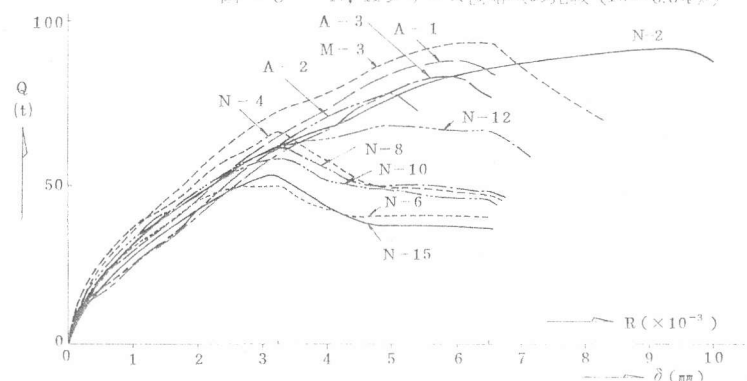


図-9 N、Aシリーズ包絡線の比較 ( $R_v=1.28\%$ )

5.48%である。

図-12にはRシリーズの正側包絡線を比較して示す。図中には比較のために無開口壁のM-3とX補強筋のないN-4の包絡線も示す。各試験体ともX補強筋を施したことによって、変形能力が増大した。異形棒鋼を用いたR-3, 4では耐力も増加したが、X補強筋としてPC鋼材を用いたR-7, 8, 9はあまり耐力の上昇はなかった。最大耐力時に、R-3, 4ではX補強筋が降伏したのに対して、R-7, 8, 9ではひずみレベルが異形棒鋼の降伏ひずみ程度であった。

図-13にはPシリーズの正側包絡線を比較して示す。P-1, 2はPC壁との比較のためのRC壁である。この図から、X補強が施されていないP-1, P-3, P-4を比較すると、プレストレス(0, 30, 60 kg/cm<sup>2</sup>)が高くなるほど、最大荷重に達するまでの剛性は高く、最大荷重時の変形が小さいことが確認できる。また、P-4はP-3に比べてプレストレスが2倍になっているにもかかわらず、最大耐力はほぼ同じである。したがって、プレストレスの増大による耐力の上昇は、それに見合ったコンクリート強度の上昇がないかぎり限界があると言える。なお、PC壁におけるX補強筋(D10, D13)の効果はRC壁同様に期待できた。

#### 4. 結 論

原子炉建屋を対象とした多数の小開口を持つ耐震壁の実験を行なった結果、各種パラメーターの相違による終局せん断強度及び変形性能の違いがはきつめられた。剛性、ひび割れ強度等については、より大きい試験体を用いて今後検討する必要がある。

#### 〔参考文献〕

- 1) 吉崎, 外村他: 多数小開口を持つ鉄筋コンクリート耐震壁の強度の変形 その1 開口配置と寸法の影響, 建築学会大会, 昭55.9
- 2) 吉崎, 外村他: 同名 その2 開口配置と寸法の影響Ⅱ, 建築学会大会, 昭56.9
- 3) 吉崎, 外村他: 同名 その3 開口補強効果, 建築学会大会, 昭56.9
- 4) 村角, 外村他: 同名 その4 解析による検討, 建築学会大会, 昭56.9

付表 試験体名変更一覧(文献1, 2)のみ)

| 旧名      | 新名  | 旧名      | 新名   | 旧名      | 新名   |
|---------|-----|---------|------|---------|------|
| 0.6S 5H | N-1 | 1.2L 5H | N-6  | 0.6S20V | N-11 |
| 1.2S 5H | N-2 | 0.6S20H | N-7  | 1.2S20V | N-12 |
| 0.6S10H | N-3 | 1.2S20H | N-8  | 1.2S 5C | N-13 |
| 1.2S10H | N-4 | 0.6S20S | N-9  | 1.2S 5V | N-14 |
| 0.6L 5H | N-5 | 1.2S20S | N-10 | 1.2L'3H | N-15 |

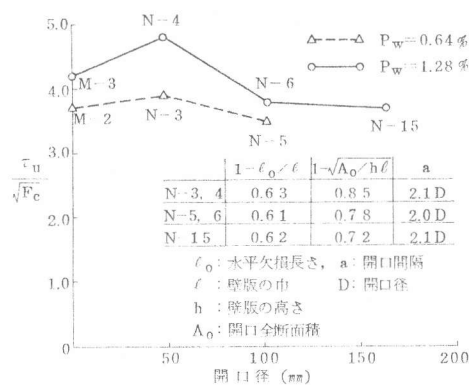


図-10  $\tau_u / \sqrt{F_c}$  - 開口径

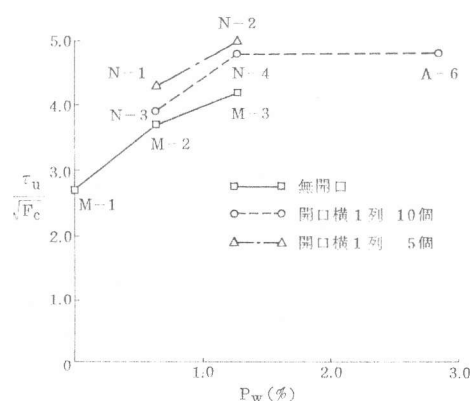


図-11  $\tau_u / \sqrt{F_c}$  - 壁筋比

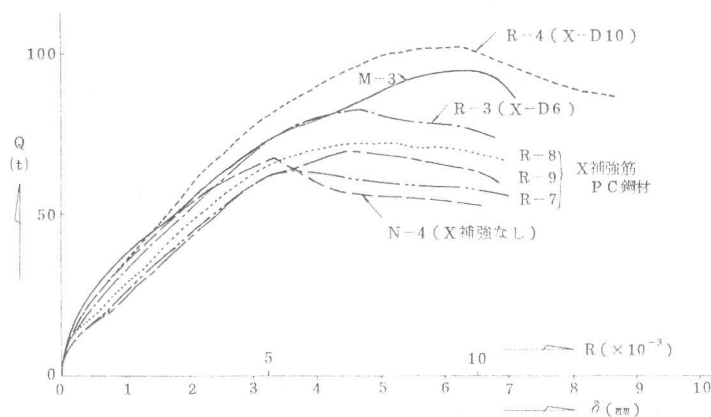


図-12 Rシリーズ包絡線の比較

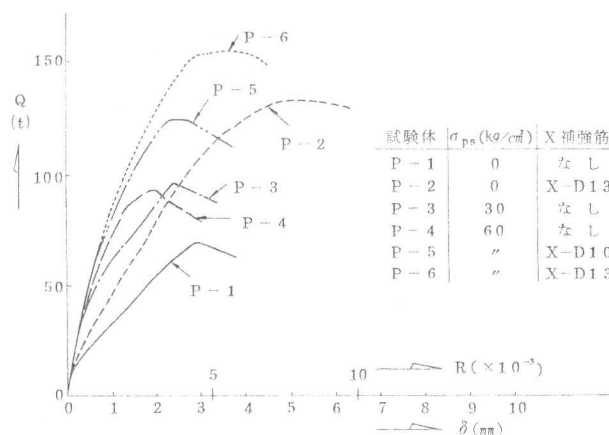


図-13 Pシリーズ包絡線の比較