

論 文

[2130] 片持ち水平加力を受ける壁式プレキャスト壁の有限要素法材料非線型解析

正会員 ○和田 俊良 (北海道職業短期大学校)

正会員 山本 俊彦 (東急建設技術研究所)

正会員 上田 正生 (北海道大学工学部)

1. はじめに

近年、日本建築学会から「壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の挙動と設計法」¹⁾が刊行されるに及び、プレキャスト (以下Pcaと略す) 構造による壁式構造の設計・施工例が比較的多く散見されるようになってきた。しかしながら、Pca構造物は接合部や打継面等を有するため、一体打ちされた鉄筋コンクリート (以下RCと略す) 構造物とは大きく異なった力学性状を示すことが知られており、有限要素法等による材料非線型解析手法が高度に発達した今日においてさえ、その変形挙動の追跡は必ずしも容易ではなく、接合部や打継面のモデル化等、検討されるべき多くの問題が残されているのが現状である。

著者等はここ数年、接合部及び打継面を考慮したPca構造物の有限要素解析に関する研究を行っているが、本論文では既報²⁾の壁式Pca壁の試験体を例に取り、主として接合部の非線型挙動のモデル化等、著者等の解析手法の妥当性について若干の検討・考察を試みることにする。

2. RC壁とPca壁の解析における問題点

一体打ちされたRC壁の従来の非線型解析では、Darwin等³⁾の手法に代表されるようなコンクリートと鉄筋の材料非線型性を考慮した数多くの研究が成され、その解析精度は高いものとなってきたものの、コンクリートの構成則と破壊基準、亀裂発生以後のせん断剛性の評価、亀裂の開閉及びコンクリートの繰返し挙動等、取り挙げられて久しい解析上の問題が数多く残されているのが現状と思われる。中でも亀裂の発生によるコンクリートの不連続性をどのようにモデル化して取り扱うかは、解析結果に大きな影響を与えるのは周知の事実である。

著者等は、RC壁解析手法 (本解析手法を一体打ちされたRC部材に適用した例では、比較的良好な結果が得られている) を更に発展させて、Pca壁の変形挙動を解明するためには、初期変形状態から卓越し、コンクリート亀裂と類似した挙動を示す可能性があると思われる接合部や打継部境界面の不連続性を、如何に評価するかが肝要と考え、既報⁴⁾で、接合部と打継面にクラックリンク要素を用いてモデル化し、Pca壁有限要素法弾性解析を行った。弾性解析値とPca壁初期実験値の比較・検討を行ったところ、Pca壁の接合部及び打継面のせん断剛性と鉛直剛性がかなり失なわれていたものと評価しなければ、Pca壁の実験値と解析値は良い一致をみず、Pca壁の材料非線型解析を行うには、一体打ちされたRC壁の解析上の問題の他に、更に、接合部や打継面の不連続性による非線型挙動を如何に評価して解析に組み込むかが、新たな問題として加わることが確認されたものと思われる。

3. 本材料非線型解析手法

1) コンクリートと鉄筋の取扱い

本材料非線型解析では、コンクリートに4角形4節点アイソパラメトリック要素 (Gauss点2x2)、鉄筋にトラス要素を適用して解析を行う。コンクリートは直交異方性材料として取扱い、また、図1に示すようにコンクリート包絡曲線は初期状態から各

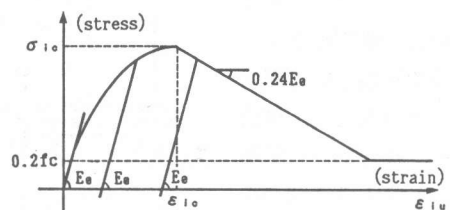


図1 コンクリートの応力-歪曲線

主応力方向の最大圧縮強度までSaenzモデルで表示し、終局残留圧縮応力はコンクリート一軸圧縮強度の0.2倍とした。また、本解析ではPca壁の繰り返し挙動を解析対象とはしていないが、繰り返し計算中の局所的なコンクリートの除荷現象を考慮して、コンクリート要素Gauss点の等価一軸歪増分が正となった時、除荷と判定しコンクリートの応力-歪関係は、初期弾性係数による除荷経路をたどり、包絡曲線上の除荷開始歪よりコンクリートの等価一軸歪が小さくなった時に包絡曲線上に再度戻るものとする。亀裂の開閉はDarwin³⁾に倣い、等価一軸歪から亀裂発生歪を差し引いた歪の正負で判定し、亀裂発生後のコンクリートは全く応力を負担せず、一次亀裂発生後のせん断剛性もまたDarwinの仮定に従うものとした。コンクリートの破壊基準はDarwinモデルを使用するが、圧縮-引張場の矛盾点を一部修正した式⁵⁾を用いた。

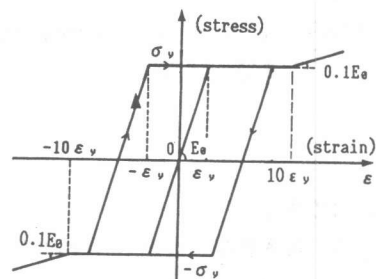


図2 鉄筋の応力-歪曲線

図2に鉄筋のモデル化の概要を示す。鉄筋の応力-歪曲線はトリ・リニア型であり、降伏歪の10.0倍の歪に達した時に初期弾性係数の0.1倍の剛性を保持する歪硬化を仮定し、除荷時には初期弾性係数で除荷経路をたどるものとした。

2) 接合部の取扱い

図3に接合部の実際の応力状態とモデル化の概要を示す。Pca壁の水平部にモルタルによるウエットジョイントを、鉛直部にコンクリート打設によるシャコッターを施すと、Pca部材の乾燥状態や組立精度によって不均一な接合部境界面が形成される。Pca壁が水平力と軸力を担うと、微視的に見れば、水平接合部ではモルタルを中間層として、すべりせん断と境界面に垂直な圧縮・引張力が作用し、同時に鉛直接合部の境界面周囲にはせん断力とシャコッターの凹凸による支圧力、そして水平接合部と同様の境界面に垂直な力が働くものと考えられ、また、接合筋の近傍では、各接合部境界面での、このようなすべり摩擦及び非弾性接触現象に、更に鉄筋のダボ効果等が加わった極めて複雑な応力状態を呈しているものと思われる。この応力状態を有限要素法で微視的に正確に表現することは、殆ど不可能であるばかりではなく、Pca壁の全体挙動を追跡するという視点にたてば解析精度の向上にはなんの意味を成さないものと考えられる。そこで、本解析では、ある程度巨視的に接合部の応力状態を捉えることを考え、図3及び図4のような接合部のモデル化を行った。即ち、接合部境界面は、モルタル中間層やシャコッターの凹凸を無視して直線とし、接合部境界面の幾何学的不連続性を、コンクリート要素にダブル節点を設け、これらをクラックリンク要素で結ぶことによって表現し、コンクリート要素の形状として考慮しなかったシャコッターの凹凸による噛み合い効果を、クラックリンク要素のせん断剛性と鉛直剛性で調整して表現することを考えた。接合筋は、接合部内を貫通する鉄筋トラス要素をコンクリート要素のダ

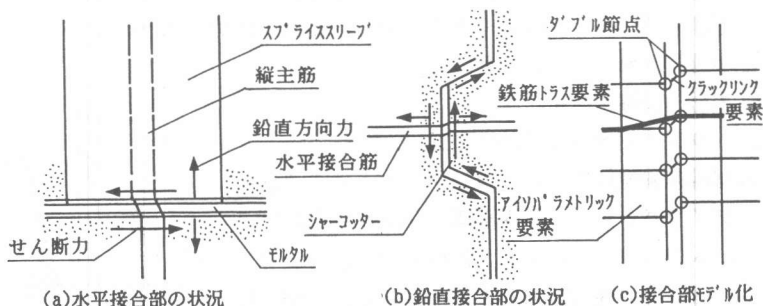


図3 接合部の実際の状態とそのモデル化

ブル節点の一方に連結させて取り扱った。

4. 実験結果と本材料非線型解析との比較・検討

4. 1 実験の概要

本論文では、著者等の既報²⁾の水平外力を受けるPca壁実験から試験体WPC II-1のみを解析対象とするが、試験体及び接合部の詳細は既に報告しているので、ここでは概略のみを示すことにし、図5に試験体詳細、図4 接合部の座標表1に試験体一覧、表2にコンクリート材料性状及び表3に鉄筋の材料性状を示す。試験体は、8層壁式Pca壁建築物の最下層を想定してPca壁に22kg/cm²の圧縮応力が保持されるように、頭スラブに取りつけたオイルジャッキで軸力が制御され、同時に頭スラブの左右両端の水平オイルジャッキで押引きされた。

4. 2 本材料非線型解析のための接合部モデルの設定

3節で接合部の解析上の取扱いについては述べたが、本試験体の材料非線型解析を行うには、本試験体に適合した、水平接合部及び鉛直接合部の詳細なせん断応力-すべり変位及び鉛直剛性モデル化が必要である。

1) 水平接合部のせん断モデル化

本試験体WPC II-1の水平接合部のせん断応力-すべり変位 ($\tau - \delta$) 関係を知るために、図6に試験体の水平外力をPca壁底盤面積で除してせん断応力に換算した値と、壁脚部上部に測定用鉄骨フレームを固定し、試験体の基礎上面から64mmの高さで実測した壁脚部とPca壁の両側面相對変位の相加平均変位から曲げ変形変位成分を差し引いた水平すべり変位の $\tau - \delta$ を示す。図6より、水平接合部のすべり変位を加力芯スパン中央変位で除した値は、部材角1/1000で12.3%、部材角18/1000で22.9%となり、Pca壁は明瞭なすべり現象を呈している。また、他2体の試験体においても、同様の実測結果の整理を行ったが、 $\tau - \delta$ 関係はほぼ等しいものとなった。このWPC II-1の実験曲線を一次回帰直線で近似し、クオドリ・リニアモデルとしたが、初期せん断剛性は580.0Kg/cm³となりかなり剛性は低く、順次197.5kg/cm³、

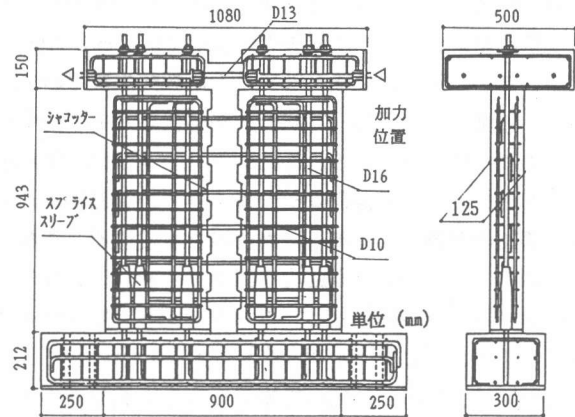
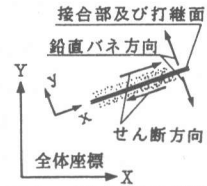


図5 試験体詳細

表1 試験体一覧

試験体	水平接合部		鉛直接合部		頭継ぎ筋	軸力
	鉛直方向筋	コッター	水平方向筋			
wpc II-1	6-D16	70x75x15	6-D10		2-D13	22.0kg/cm ²
wpc II-2	6-D16	70x75x30	6-D10		2-D13	22.0kg/cm ²
wpc II-3	6-D16	70x75x7.5	6-D10		2-D13	22.0kg/cm ²

表2 コンクリート材料性状

試験	強度	ヤング係数
	kg/cm ²	kg/cm ²
プレキャスト	圧縮 345.0	315761.0
	割裂 25.4	
後打	圧縮 365.0	324784.0
コンクリート	割裂 21.6	

表3 鉄筋材料性状

鉄筋	断面積	ヤング係数
	cm ²	kg/cm ²
D10	0.71	
D13	1.27	2100000.0
D16	1.99	
スリブ	16.61	

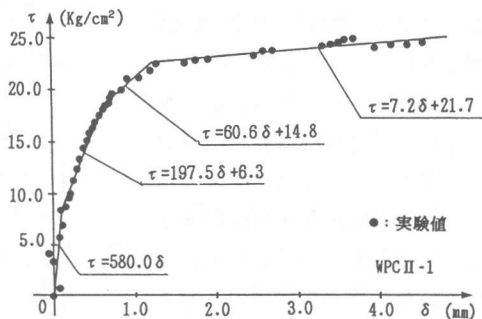


図6 水平接合部の $\tau - \delta$

60.6kg/cm³及び7.2kg/cm³と通減すると評価され、かつ、これを正負対称として水平接合部に設定したクラックリンク要素のせん断非線型挙動モデルとした。尚、この水平接合部のせん断非線型挙動モデルは、本試験体のために展開したものであり、より一般化された非線型 τ - δ モデルとするには、今後、接合部の実験と解析値の比較により、より詳細な検討が必要である考えられる。

2) 鉛直接合部のせん断モデル

鉛直接合部の変形挙動については、既往の実験報告¹⁾から、鉛直接合部は亀裂発生まで弾性挙動を呈し、シャコッターを有する鉛直接合部の亀裂発生時のすべり量は試験体によらず0.05~0.07mm、最大耐力時のすべり量はコンクリート圧縮強度によって0.05~2.0mmとなるが、一方、シャコッターの無い鉛直接合部では、亀裂発生までの変位量は非常に小さく、すべり量0.45~1.40mmで接合部が降伏し、その後すべり変位は急激に増大するようになり、このようにシャコッターの有無が鉛直接合部の τ - δ 関係を大きく変えること、また、 τ - δ 曲線形はシャコッターの有無によらず正負対称となり、負担せん断応力はコッター筋比の影響を受けることが指摘されている。これらの実験結果から、コッター筋比0.38%とし、鉛直接合部のせん断応力を鉛直接合部コンクリート圧縮強度で無次元化した値を鉛直接合部の絶対すべり量の関数とし、コッターが有る場合はクオドリ・リニア、コッターが無い場合はトリ・リニアとしたモデルが提案¹⁾されている。

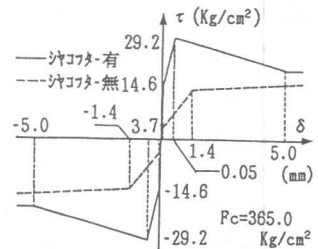


図7 鉛直接合部の τ - δ

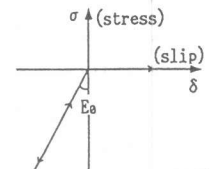


図8 テンションカットオフ材料

本解析では、この2種類の提案モデルを本試験体の鉛直接合部の τ - δ 関係に適用し、図7に実線がシャコッターが有る場合、破線がシャコッターが無い場合として示す。

3) 水平接合部の鉛直方向テンションカットオフ・モデル

接合部の鉛直方向の引張変形成分(目開き)と接合部のすべりせん断応力分布には密接な連成効果が容易に考えられるが、実験結果より、目開きによる接合部の応力状態の変化は、目開きが確認された時点で、せん断抵抗が減少することが指摘されているものの、その挙動については、実験結果の裏づけからまだ定量化されていない。本解析では、先に述べた接合部境界面での微視亀裂や不均一性を考慮して、目開きによるせん断抵抗の減少を、図8のようなテンションカットオフ材料で取扱い、相対変位が負の値を持った時のみに210000kg/cm³の剛性を有し鉛直方向に完全接合状態になるものと仮定した。

4. 3 解析の種類の設定

本試験体を材料非線型解析するには、水平及び鉛直接合部の接合性状により、接合部モデルの種々の組合せモードが考えられる。本解析では、考えられる多くの組合せモードから、表4に示すように、1) 水平接合部及び鉛直接合部とも完全接合状態と仮定したもの(W1)、2) 水平接合部の τ - δ 関係に本試験体から求めたクオドリ

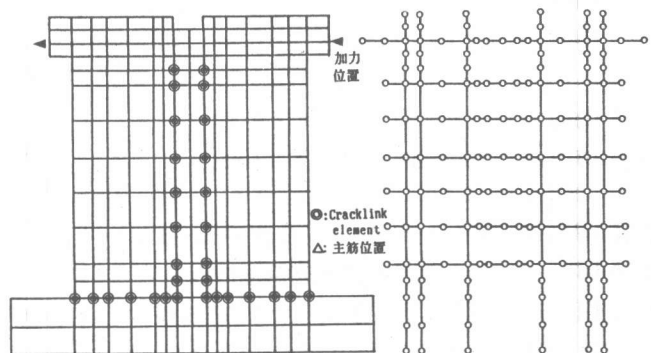


図9 コンクリート要素分割

110 鉄筋要素分割

リ・リニアモデルを、鉛直方向はテンションカットオフ材料（以下TC：テンションカットオフと称す）を使用し、鉛直接合部の $\tau-\delta$ 関係はシャコッターが有る場合のクオドリ・リニアモデルとし、鉛直接合部の鉛直方向は分離しているもの（W2）、3）W2に変更を加え、水平接合部の鉛直方向が引張となると、同時にすべり方向のせん断力を完全に失うよ

表4 解析の種類一覧

モデル	水平接合部		鉛直接合部		引張強度
	水 平	鉛 直	水 平	鉛 直	
W1	完 全	完 全	完 全	完 全	σ_s
W2	実 験	T C	実験有	分 離	σ_s
W3	実 験	T C C	実験有	分 離	σ_s
W4	実 験	T C C	実験無	分 離	σ_s
W5	実 験	T C C	実験無	分 離	$0.5\sigma_s$
W6	完 全	完 全	分 離	分 離	σ_s

TC: テンションカットオフ TCC: テンションカットオフ連成 σ_s : 割裂強度

うに、水平接合部のせん断方向の挙動と鉛直方向の挙動を連成（以下TCC：テンションカットオフ連成と称す）させたもの（W3）、4）W3の鉛直接合部の $\tau-\delta$ 関係にシャコッターが無い場合のトリ・リニアモデルを使用したもの（W4）、5）W4のコンクリート引張強度を割裂強度の1/2としたもの⁶⁾（W5）、6）鉛直接合部のみ完全分離としてコンクリート引張強度と割裂強度は等しいとしたもの（W6）、以上計6つの解析種類を設定した。

試験体の要素分割は、図9のコンクリート要素分割と図10の鉄筋要素分割を基本として行い、加力頭スラブ及び壁脚部は壁厚に対して十分厚く、また実験結果より加力頭スラブ及び壁脚部に大きな損傷は観察されなかったため、計算効率を考慮して、頭スラブ及び壁脚部のコンクリートは弾性体として取り扱い、頭スラブに等分布荷重を、頭スラブの左右両端の水平オイルジャッキ取り付け位置に集中荷重を作用させた。

4. 4 実験値と解析値との比較とその考察

1) 荷重-変位曲線

図11に、先に述べた試験体WPC II-1の加力芯スパン中央での荷重-変位曲線の実験値と前節で設定した6種類の解析結果を示す。各接合面を完全接合状態と仮定したW1は、実験値よりも初期状態から剛性が高く、最大耐力も39.0tとなり実験値の最大耐力26.9tの1.45倍の値を示し、実験結果からかけはなれたものとなった。水平接合部に本試験体から求めたクオドリ・リニアモデルとテンションカットオフ材料を、鉛直接合部にシャコッター有のクオドリ・リニアモデルを使用したW2、これに水平接合部の鉛直及び水平せん断剛性をテンションカットオフ材料を介して連成させたW3では、高応力場でW1よりもかなり剛性は低下するものの、W2の最大耐力は39.0t、W3の最大耐力が36.0tとなりW3の最大耐力が幾分低下したに過ぎなかった。次にW3モデルの鉛直接合部の水平せん断抵抗をシャコッターが無いとするトリ・リニアモデルに変更したW4では、W3よりも変位は大きく、最大耐力も31.0tとなり、実験最大耐力の1.15倍となって、やや実験値に近づいた。更に、コンクリートの引張強度を割裂強度の0.5倍としたW5は、W4よりも変形は大きくなり実験値に近づいたが耐力は32.0tとなり、逆に、耐力は1.0t上昇した。W4とW5の最大耐力の差異は、解析上でのコンクリートの圧壊の取扱いと僅かな鉄筋トラスの応力負担の違いによるものと思われる。最後に鉛直接合部が完全に分離しているとしたW6では、かなりの高荷重域まで変形挙動はほぼW5と一致したが、最大

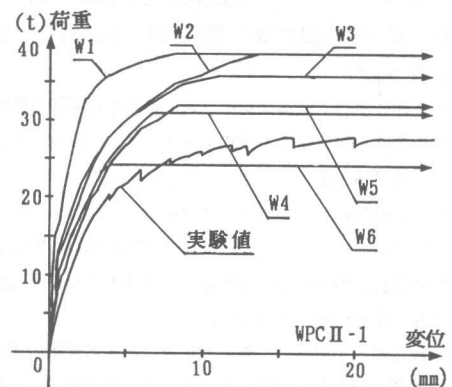


図11 荷重-変位曲線

耐力は24.0tとなり唯一実験値を下回った。

2) 縦主筋の荷重-ひずみ曲線

図12と図13に、Pca壁のスプライス・スリーブ直上での縦主筋の実験値と解析値W4及びW5の荷重-歪曲線を示す。荷重レベル約20.0tまでは、縦主筋V3を除いて実験値と解析値はほぼ一致した傾向を示すが、この荷重レベルよりも高荷重域となると、図12の左壁では、実験値の方が解析値よりも圧縮領域が左壁内で広く分布していることを示し、同時に図13の右壁の縦主筋の解析歪曲線は、実験値よりもやや小さな引張歪を負担していた。このような左壁における、高応力状態での圧縮場の歪変化の違いは、本解析ではスプライス・スリーブと縦主筋の形状の違いをトラス要素の断面積のみで取り扱うために、スプライス・スリーブと縦主筋の境界部での応力集中が表現できず、これがPca壁の縦主筋の歪分布に影響を与えたためと思われる。

5. まとめ

本論文では、主にPca壁の水平及び鉛直接合部の非線型挙動に着目して、実験結果

より接合部の非線型モデル化を行い、水平外力と軸力を担うPca壁の有限要素材料非線型解析を行ったが、予期した通り、接合部モデルの組合せモードの違いが、解析結果に大きな影響を与え、どの解析値も実験値を的確に追跡するには至らなかった。今後、Pca壁の非線型解析を精度良く行うために、Pca接合部実験による接合部のせん断非線型モデルの改良の試みと、解析によるモデルの検討を重ねて行く予定である。更に、本解析では考慮しなかった引張亀裂が入った領域におけるコンクリートの圧縮強度の低減率等⁶⁾についても検討を加えていくつもりである。尚、本計算にはSONY社製32bitNEWS-841を使用し、倍精度計算を行った。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の挙動と設計法、1989
- 2) 山本俊彦、和田俊良：壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造鉛直接合部に関する実験的研究 -その3-、日本建築学会学術講演梗概集、1988
- 3) David Darwin and David A. Pecknold: Analysis of RC Shear Panels Under Cyclic Loading, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.102, No. ST2 Feb. 1976
- 4) 和田俊良、山本俊彦、上田正生：型持ち水平外力を受ける壁式プレキャスト壁の有限要素弾性解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989
- 5) 土橋由造、上田正生：周辺を拘束したRC床版の圧縮膜効果について、日本建築学会論文報告集第296号、1980.10
- 6) 張愛卿、松戸正士、野口博：RC高層壁式ラーメン構造の壁柱の非線型解析：コンクリート工学年次論文報告集、1989.7

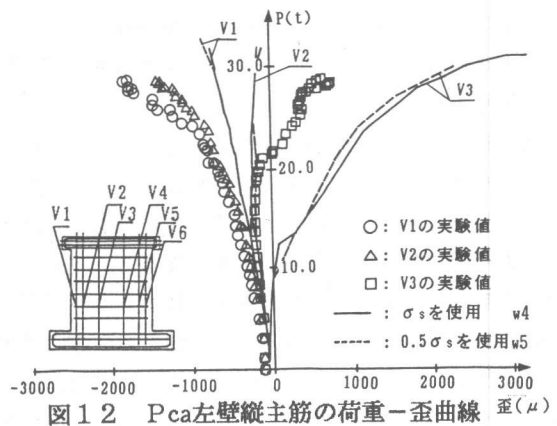


図12 Pca左壁縦主筋の荷重-歪曲線

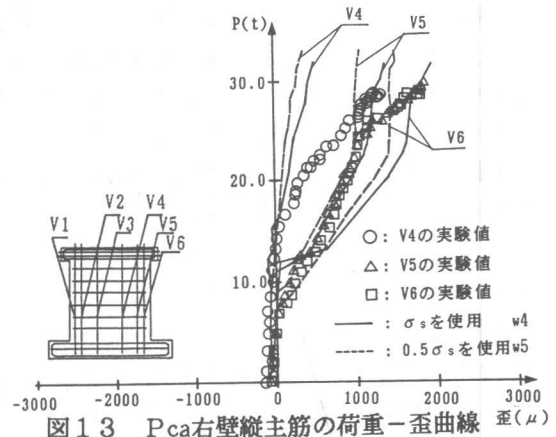


図13 Pca右壁縦主筋の荷重-歪曲線