

論文 PC ストランドを用いた耐力壁の耐震性能に関する解析的研究

曾 令昕^{*1}・孫 玉平^{*2}・竹内 崇^{*3}・趙 軍^{*4}

要旨: 本研究では、プレストレスを導入せず PC ストランドを境界要素として用いた矩形コンクリート壁の繰り返し履歴性状を評価する解析手法を確立することを目的として、壁面のせん断変形および PC ストランドの付着すべりを考慮に入れた部材解析方法の妥当性を検討した。既往の研究で実施された実験結果との比較から、付着すべりの影響を考慮した解析方法を用いれば、PC ストランドを用いたコンクリート壁の履歴性状と終局耐力のみならず、履歴ループごとにおける残留変形角を小さく抑えられた原点指向型の履歴性状なども比較的精度良く評価できることが明らかになった。

キーワード: 履歴性状, PC strands, 強度上昇係数, 付着すべり, コンクリート耐力壁

1. はじめに

耐力壁は現代建築の中で広く使用されている耐震要素である。耐力壁がレジリエント性能を発揮するためには、2 つの構造的特徴を有する必要がある：(1)ドリフト硬化性 リー大変形時まで水平抵抗力を低下することなく安定した耐力維持すること；(2) 残留変形の抑制—地震後の残留変形を小さく抑制できることである。それらの特徴は耐力壁の修復性の向上につながる。

RC 耐力壁のレジリエンス性を改善するための方法としては、耐力壁にプレストレスをかける方法と壁の主筋として高強度材料を使用する方法等が考えられる。既往の研究において、プレストレスを導入せず、PC ストランドを境界要素として用いた RC 耐力壁の開発が取り組まれている。通常、PC ストランドは構造物または構造要素にプレストレスを導入する際に使用されるものである。一方、PC ストランドは高い引張強度を有するため、プレストレスを導入せず、境界要素として用いることで、部材のレジリエント性を向上させることが期待出来る。著者らは、これまでにプレストレスを導入せず、PC ストランドを主筋として用いた RC 耐力壁の耐震挙動に関する実験的研究を行い、PC ストランドにより壁のレジリエン

ト性能が向上することを報告している²⁾。

PC ストランドを用いた RC 耐力壁の耐震性能を適切に評価するためには、壁の最大耐力のみならず繰り返し荷重を受けるときの履歴性状も的確に捉える必要がある。しかしながら、普通強度の異形鉄筋を用いる RC 柱の解析手法をそのまま高強度鉄筋を用いた柱に適用した場合、柱の水平抵抗力が過大に評価されることが報告されている³⁾。その要因としては、高強度鉄筋には高い引張応力が生じ、付着すべりが発生するが、平面仮定に基づく従来の解析方法では、高強度鉄筋に生じる付着すべりの影響を考慮することが出来ず、高強度鉄筋を用いた柱の履歴性状に合理的な予測を提供できないためである。一方、著者らは、高強度鉄筋を主筋に用いた RC 部材に対して、鉄筋の付着すべりを考慮した部材解析手法を提案し、その解析手法により高強度鉄筋を用いた RC 部材の履歴性状を精度良く評価できることを報告している^{3) 4)}。この手法を準用し、PC ストランドとコンクリートの付着応力—すべり量関係を導入することによって、PC ストランドを用いた RC 耐力壁の履歴性状を適切に評価することが期待できる。

そこで、本論は、PC ストランドを用いた矩形 RC 耐力

表—1 既往試験体一覧

試験体名	t (mm)	D (mm)	h (mm)	n	a/D	境界要素		壁面		Q_{exp} (KN)	
						主筋	帯筋	縦筋	帯筋	正側	負側
RCSW-1	200	1280	2560	0.13	2.0	8-D12 ($p_{te}=0.37\%$)	D6@70 ($\rho_s=2.45\%$)	D8@155		656	-650
PCSW-1	200	1280	2560	0.13	2.0	8-PC12.7 ($p_{te}=0.33\%$)				783	-768
RCSW-2	200	1280	2560	0.13	2.0	8-D12 ($p_{te}=0.37\%$)		D8@70.6	D8@62	740	-654
PCSW-2	200	1280	2560	0.13	2.0	8-PC12.7 ($p_{te}=0.33\%$)				991	-954

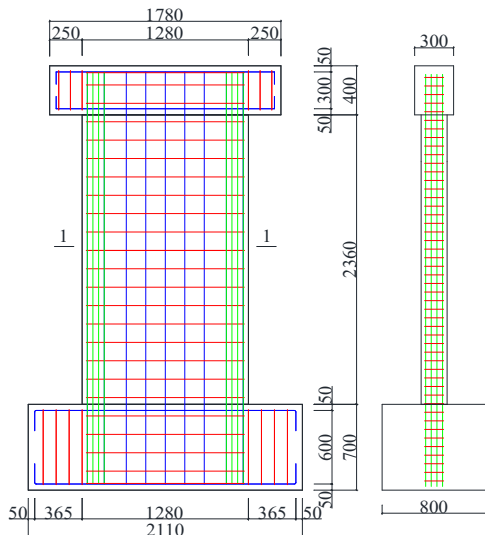
t:壁厚さ, D:壁面せい, h:壁面高さ, n:軸力比, a/D:せん断スパン比, Q_{exp} :最大水平耐力実験値, p_{te} :等価引張鉄筋比(=引張側の主筋断面積/0.95tD), ρ_s :帯筋体積比(=境界要素の帯筋体積/境界要素内の拘束コアコンクリート体積)

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築専攻 大学院生 (学生会員)

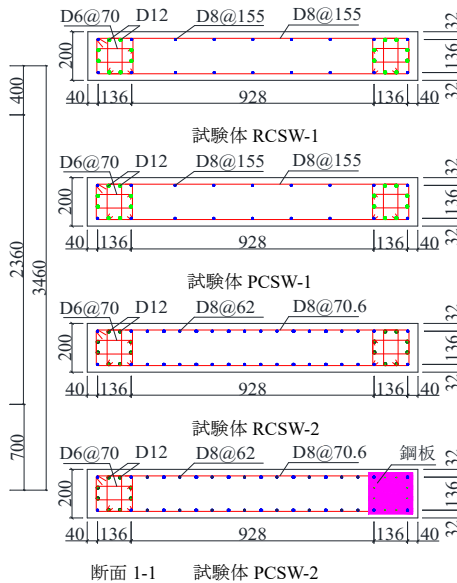
*2 神戸大学大学院 工学研究科建築専攻 教授 工博 (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科建築専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*4 鄭州大学 力学及び安全工程学院 教授 博士(工博)



図－１ 試験体の配筋詳細（単位：mm）



図－２ 端部固定



図－３ 荷重装置

壁の繰り返し履歴性状の合理的な解析法を確立するため、文献 3) と 4) で提案された手法を用いて、PC ストランドとコンクリートの付着応力すべり量関係モデルおよびせん断変形の割合を解析変数として、既往の研究で報告された、PC ストランドを用いた実物大の RC 耐力壁の履歴挙動の解析を行い、解析の精度を検討した。

2. 既往の実験の概要

2.1 試験体概要

図－１ と表－１ に試験体の配筋詳細と一覧を示す。試験体 PCSW-1 と PCSW-2 は、PC ストランドを境界要素として用いた試験体で、試験体 RCSW-1 と RCSW-2 は、PC ストランドを用いた試験体との比較を目的とした、普通強度の異形鉄筋を用いた試験体である。いずれの試験体も高さ 2300mm、壁せい 1280mm、厚さ 200mm の矩形断面壁で、壁面の上下に加力スタブを設け、軸力比は 0.13 である。水平力の荷重点は下加力スタブの上面から高さ 2560mm にあり、せん断スパン比が 2.0 である。

試験体 PCSW-1 は境界要素として PC12.7 ストランドを片側 8 本配置し、それを囲むように D6 矩形帯筋を 155mm の間隔を配置した。壁面の縦筋と横筋には D8 異形鉄筋を用い、約 155mm 間隔で配筋した。縦筋比と横筋比はそれぞれ 0.39% と 0.33% である。横筋は 135 度フックを有する帯筋であり、縦筋はダブル配筋とした。試験体 RCSW-1 は、境界要素に普通強度の D12 異形鉄筋を 8 本配置したもので、その他の配筋詳細は試験体 PCSW-1 と同じである。試験体 RCSW-2 と試験体 PCSW-2 は、それぞれ試験体 RCSW-1 と試験体 PCSW-1 の縦筋と横筋の間隔を密にしたものであり、壁の縦筋比と横筋比はいずれも 0.71% である。PC ストランドの定着に関しては、図

表－２ 材料特性

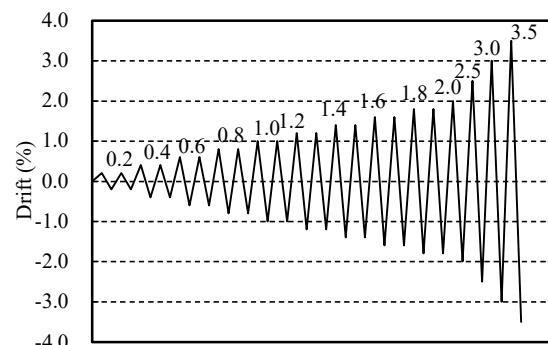
呼び	d (mm)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y (%)	E_s (MPa)
D6	6	28.3	490	662	0.22	2.19×10^5
D8	8	50.3	544	682	0.27	2.03×10^5
D12	12	113.1	473	627	0.23	2.06×10^5
PC12.7	12.7	98.7	1753*	1890	0.89	1.97×10^5

d: 直径, A_s : 断面積, f_y : 降伏点応力, f_u : 引張強さ, ϵ_y : f_y 時ひずみ, E_s : 弾性係数, *: 0.2% オフセット降伏点応力, D6, D8 と D12 は中国の規格 GB 1499.2-2007 に従う異形鉄筋 (Class III) を表す。

－２ に示すように、厚さ 10mm の鋼板を PC ストランドの定着具で挟み込み、溶接することで定着した。

2.2 材料特性

PC12.7 は、高強度ワイヤ 7 本のより線で構成され、公称直径 12.7mm である。全試験体で用いた材料の引張試験結果を表－２ に示す。コンクリートには、レディミクストコンクリートを使用し、材齢 70 日のコンクリート立方体 (150mm) の圧縮試験により得られた圧縮強度は 55.3MPa であった。



図－４ 荷重サイクル

2.3 荷重方法

荷重装置を図-3に示す。2500kN MTS サーボ制御油圧アクチュエータを用いて繰り返し水平力を加えた。軸力は、2 台の 1000kN 油圧ジャッキを用いて所定の圧縮軸力を加え、水平力荷重時も所定の軸力を維持するように調整した。また、油圧ジャッキが試験体の水平変位に追従できるように、油圧ジャッキと反力フレームの間にはスライド機構を設けた。図-4に荷重サイクルを示す。荷重は部材角制御による正負交番繰り返し荷重とした。より詳細な実験概要および実験結果については、文献2)を参照されたい。

3. 解析による履歴挙動評価

3.1 解析概要及び解析仮定

PC ストランドを用いたコンクリート壁の耐震性能を高精度に評価するためには、PC ストランドの付着すべりの影響を考慮できる解析方法を用いる必要がある。そこで、付着強度の低い超高強度鉄筋を用いた RC 部材の解析手法^{3),4)}を本試験体に適用し、解析を行った本耐力壁の解析モデルを図-5に示す。解析では、耐力壁を、一様な曲率を生じる塑性ヒンジ領域とそれ以外の付着バネ領域に分割する。解析にあたって以下の仮定を設けた。

- (1) コンクリート断面は平面保持の仮定に従う
- (2) コンクリートは引張応力を負担しない
- (3) かぶりコンクリートは崩落しない
- (4) 塑性ヒンジ領域内での主筋応力は一様である

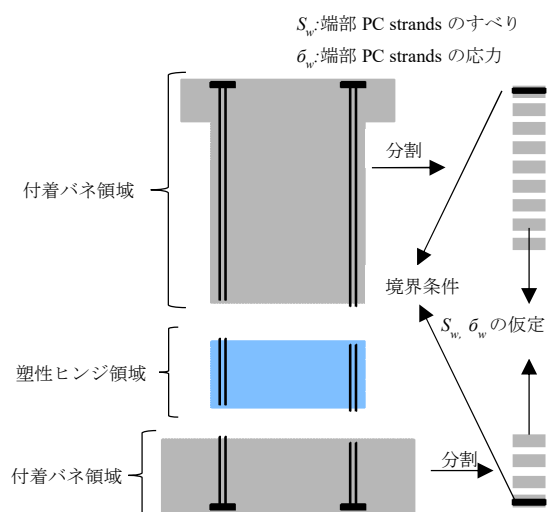


図-5 壁の解析モデル

本解析では、塑性ヒンジ領域でファイバー法を用いて、断面の曲げモーメント-曲率解析を行うが、PC ストランドに関しては、付着ばね領域からの PC ストランドの抜け出しを考慮してひずみを求める。まず付着ばね領域をいくつかの区間に分割し、それぞれの区間に PC ストランドの付着応力-すべり量関係を反映する付着ばねを設

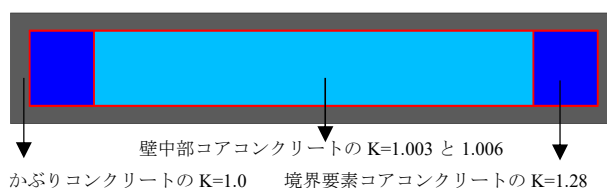


図-6 コンクリートの強度上昇係数

置する。そして、PC ストランド端部の境界条件を満足する付着バネ領域からの PC ストランドの抜け出し量を収束計算により求める。なお、本解析では、PC ストランドの端部を固定端とみなし、端部では付着すべり量が 0 となることを境界条件としている。この PC ストランドの抜け出し量に応じて、塑性ヒンジ領域内の平面保持を仮定した際の PC ストランドのひずみを低減することで、付着すべりを考慮した PC ストランドのひずみを求める。

また、P-δ 効果の考慮として、解析で得られた壁脚部の曲げモーメントから、軸力と試験体の水平変位の積を差し引いた値をせん断スパンで除して水平抵抗力を求めた。なお、本解析においては、せん断変形の全変位に占める割合を解析変数として、せん断変形を考慮するか否かによる影響を検討した。

3.2 材料の履歴モデル

PC ストランド及びコンクリートの応力-ひずみ関係モデルは、参考文献 5)にて提案されたものを準用する。PC ストランドの応力-ひずみは Menegotto-Pinto 型履歴モデルで、破断および座屈の影響は考慮していない。コンクリートの応力-ひずみ関係は NewRC 式⁸⁾を骨格曲線に用いた履歴モデルである。各モデルに使用したコンクリート圧縮強度には、立方体供試体の圧縮強度をシリンダー強度に変換した値を用いた。

PC ストランド(PC12.7)の付着応力すべり量関係は、船戸⁴⁾が付着強度の低い超高強度鉄筋向けに提案したモデル(以下、LB-HS モデルと称す)と北島⁵⁾が超高強度異形鉄筋向けに提案したモデル(以下、D-HS モデルと称す)を用いた。両モデルの違いは除荷・再負荷経路とピーク点後の繰り返し荷重包絡線にある。LB-HS モデルは、正か負のピークのどちらかに達すると、非対称型のモデルになる点と、第2と第4象限での摩擦抵抗による応力の発生を考慮している点で D-HS モデルと異なる。両モデルの形状の違いは後述の図-10 (b)を参考にされたい。両履歴モデルの PC ストランドを用いた壁の解析への適用し、履歴モデルの違いが耐震性能に及ぼす影響を検討する。なお、PC ストランドの付着強度および付着強度時すべり量は、参考文献 6)で提案されている評価式に基づいて、それぞれ 3MPa と 0.15mm とした。なお、補強筋が付着特性に及ぼす影響については考慮していない。ヒンジ領域の長さ L_p は、異形鉄筋を用いる部材を対象とする

式(1)に示す文献7)の評価式を準用して算出し、610mmに設定した。

$$L_p = 0.1L + 0.015f_y d_b \quad (1)$$

L_p :等価ヒンジ領域の長さ、 L :部材の長さ、 f_y :主筋の降伏応力、 d_b :直径

3.3 コンクリートの強度上昇係数

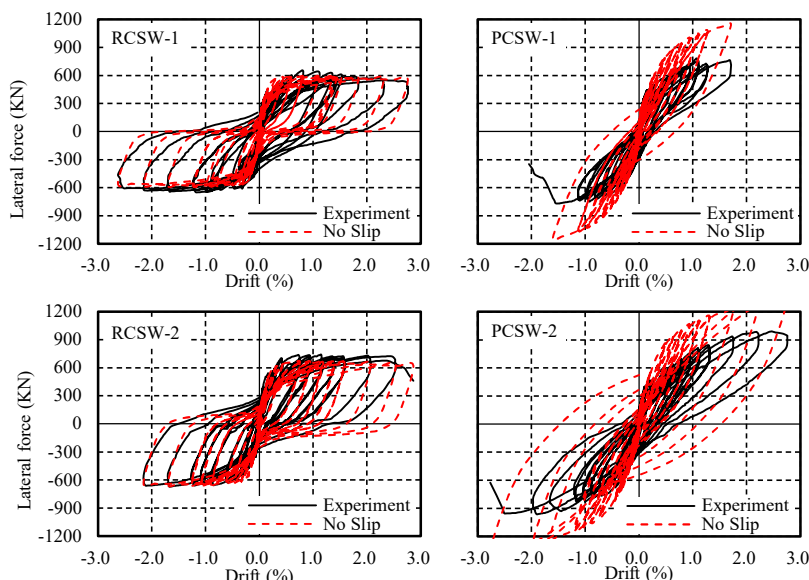
コンクリートの応力-ひずみ関係の骨格曲線には NewRC 式⁸⁾を用いるが、断面内のコンクリートは拘束度合により、コンクリート強度上昇係数 K が異なる。かぶりコンクリートでは $K=1.0$ とし、コアコンクリートに対しては、NewRC 式⁸⁾により計算し、壁の横筋により拘束されるコアコンクリートは、試験体 RCSW-1 と PCSW-1 では $K=1.003$ 、試験体 RCSW-2 と PCSW-2 では $K=1.006$ となった。また、図-6 示すように、境界要素内では、追加で複合帯筋を配しており、この帯筋により拘束された範囲のコアコンクリートは $K=1.28$ であった。

4. 解析結果と実験結果の比較

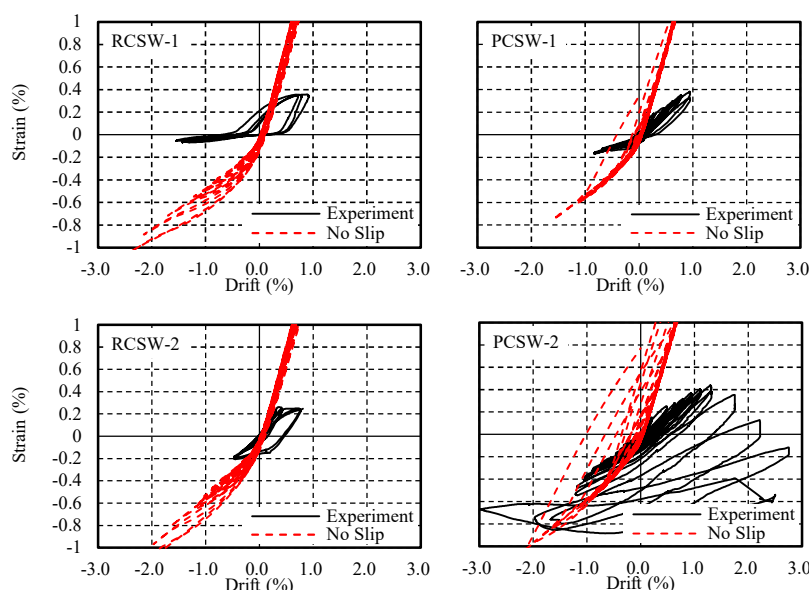
4.1 付着すべり考慮の有無の影響

図-7 と図-8 に付着すべりの考慮の有無を変数とした 2 通りの解析結果と実験結果との比較を示す。なお、ここでの解析では、せん断変形は無視し、付着応力すべり量関係モデルには LB-HS モデルを用いた。比較内容は水平力-部材角の関係と主筋ひずみの履歴と残留変形である。なお、比較した主筋ひずみは、実験値は下加力スタブの上面から 100mm の位置で計測された値で、解析値は塑性ヒンジ領域内の主筋ひずみの値である。主筋ひずみの実験値は、ゲージが不調となるまでのデータを掲載した。

図-7 より、普通鉄筋を用いた 2 体の試験体については、付着すべりを考慮しない解析で、主筋ひずみの履歴は再現できていないが、各サイクルピークでの水平抵抗

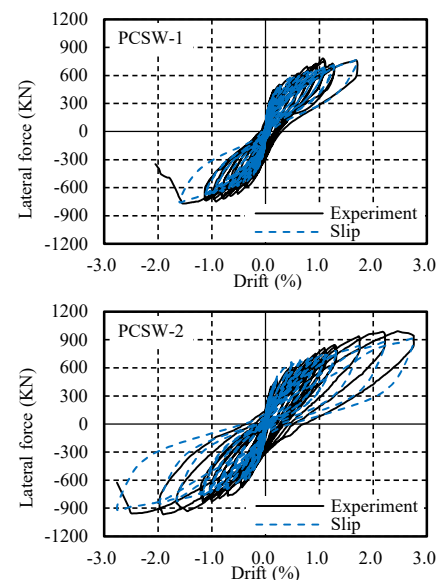


(a) 水平力-部材角関係

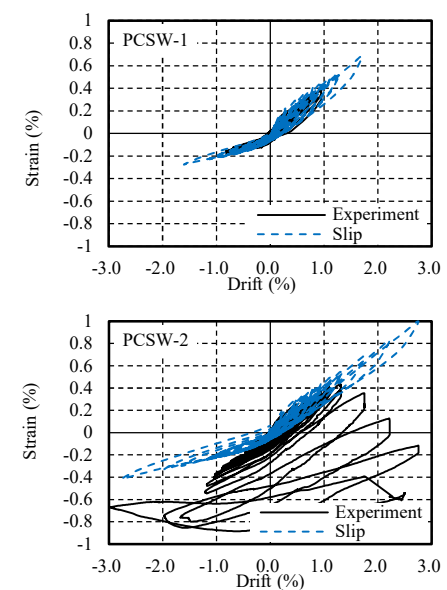


(b) 主筋 (PC ストランド) ひずみの履歴

図-7 付着すべりを無視した場合

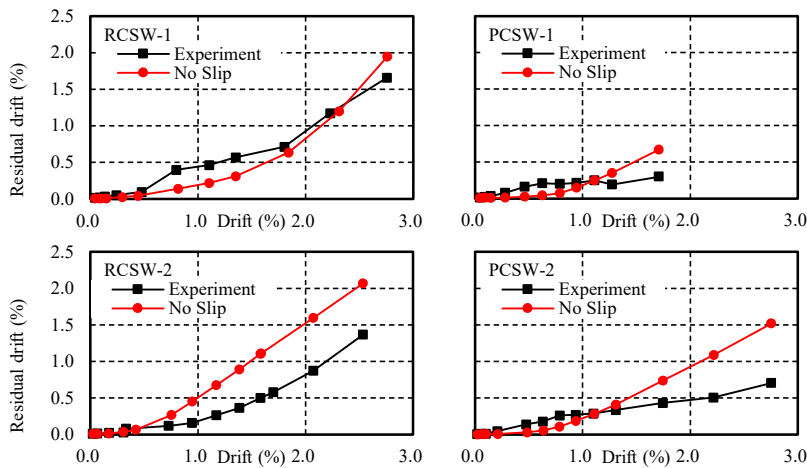


(a) 水平力-部材角関係



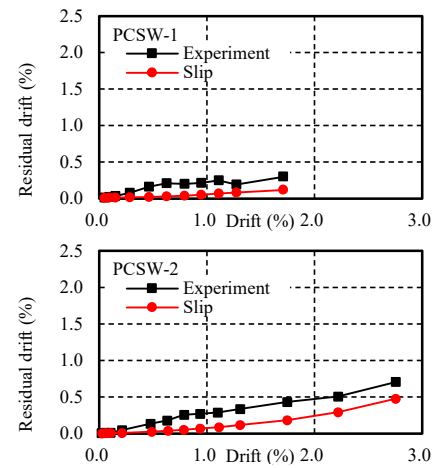
(b) PC ストランドひずみの履歴

図-8 付着すべりを考慮した場合



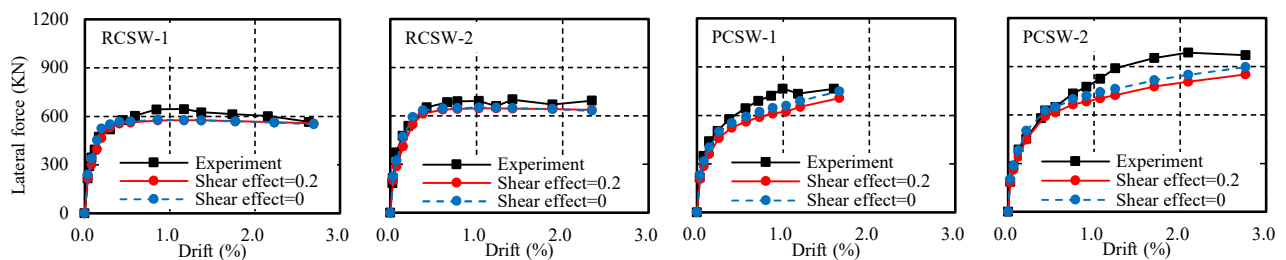
(c) 残留部材角の比較

図-7 付着すべりを無視した場合



(c) 残留部材角の比較

図-8 付着すべりを考慮した場合



各試験体の水平力の比較

図-9 せん断変形量の有無の影響

力はよく追跡できていることが分かる。しかしながら、PC スtrandを用いた2体の試験体に対しては、付着すべりを無視した解析では、紡錘型の履歴性状を示し、実験で確認された原点指向型の履歴性状と一致せず、最大耐力についても実験値を著しく過大評価した。一方、図-8に示す付着すべりを考慮した解析の結果は、履歴形状、残留変形角ともに、実験結果を精度良く評価した。付着すべりを考慮した解析の最大耐力は、それぞれ実験結果の約95%(PCSW-1)と92%(PCSW-2)程度であった。付着すべりを考慮した解析法では、部材角に対する主筋のひずみの勾配が実験値と概ね対応しており、最大耐力を精度良く評価できたものと考えられる。PC スtrandのひずみについては、付着すべりを考慮していない解析では、実験結果を過大に評価していることが分かる。それに対し、付着すべりを考慮した解析法では主筋のひずみを精度良く評価できていることが分かる。以上のことからPC スtrandを境界要素に用いたRC耐力壁の履歴性状は、付着すべりを考慮した本解析手法によって適切に予測できたことが分かる。

4.2 せん断変形考慮の有無の影響

これまでに述べた解析結果は、せん断変形を無視した前提で水平抵抗力を算出するが、実際の壁試験体においては、せん断変形も生じる。そこで、本解析では、せん断変形が全変形に対して、常に一定の割合で生じると仮定し、ファイバー法で求めた曲げ変形に、せん断変形を

含めた全変形を求めた。曲げ変形とせん断変形を足し合わせた全変形量に対するせん断変形の割合は、壁の計算初期剛性の比率により算出することとした。壁の初期剛性は、式(2)~(5)により算出されることとし、計算弾性剛性に基づくせん断変形の割合は0.17程度であった。そこで、本解析では、せん断変形を考慮する場合は、全変形に対するせん断変形の割合を、少し値を丸めて0.2として解析を行った。また、実験結果から分析したせん断変形量の全体変位に占める割合は、0.13~0.27の間にあり、平均値は0.212であったため、設定した割合と概ね一致する。

$$k_e = Q/\delta \quad (2)$$

$$\delta = \delta_B + \delta_S \quad (3)$$

$$\delta_B = Q \cdot h_0^3 / (3E_c \cdot I_e) \quad (4)$$

$$\delta_S = \kappa \cdot Q \cdot h_0 / (G_c \cdot A) \quad (5)$$

ここで、A: 耐力壁の断面積、 E_c : コンクリートの弾性係数、 G_c : コンクリートのせん断弾性係数、 h_0 : せん断スパン、 I_e : 鉄筋を考慮した断面二次モーメント、 k_e : 初期剛性、 Q : 水平抵抗力、 δ_B : 曲げ変形、 δ_S : せん断変形、 κ : 形状係数

せん断変形を考慮しない場合と、全変形に対するせん断変形の割合が0.2である場合の解析結果の比較を図-9に示す。図-9より、部材角 $R=0.005\text{rad}$ 程度までは、いずれの試験体においても、せん断変形を考慮した方が、水平抵抗力が低いことが確認できる。普通鉄筋を用いた試験体は、その後の変形角では、鉄筋の降伏により剛性

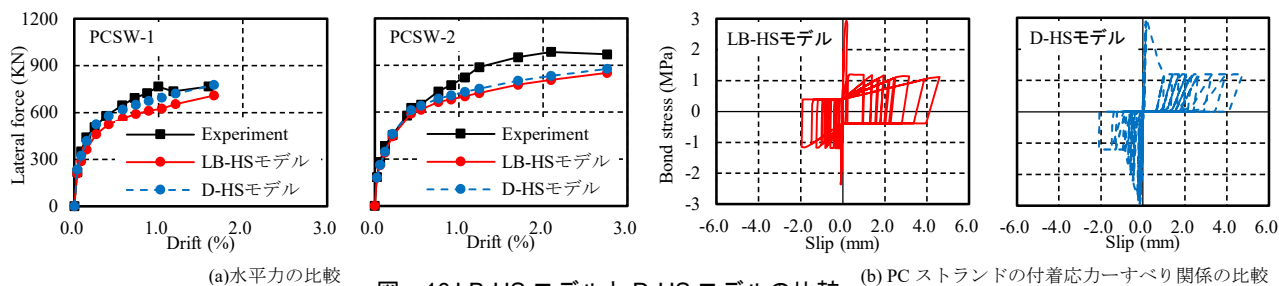


図-10 LB-HS モデルと D-HS モデルの比較

がほぼ 0 となるため、せん断変形の影響はほとんど見られなかった。一方で、PC ストランドを用いた試験体の水平抵抗力は、部材角 $R=0.005\text{rad}$ 以降も、高い 2 次剛性を示すため、せん断変形の考慮の有無によって、解析結果に差が生じていることが分かる。そのため、PC ストランドを用いた RC 壁においては、せん断変形の考慮の有無が初期剛性だけでなく、大変形域での耐力評価にも影響を及ぼすため、せん断変形の影響を適切に評価する必要がある。

4.3 付着すべりモデルの比較

2 つの付着すべりモデル (LB-HS モデルと D-HS モデル) を使用した解析法による試験体 PCSW-1 と試験体 PCSW-2 の解析結果と実験結果との比較を図-10 に示す。なお、せん断変形の割合は 0.2 としている。解析結果を比較すると、水平抵抗力において D-HS モデルの方が LB-HS モデルよりも大きな値となった。その原因としては、試験体 PCSW-2 の付着応力すべり量関係の例として、図-10(b) に示すように、D-HS モデルは、付着応力すべり量関係において、正負のピークが発生する対称型モデルであるが、LB-HS モデルでは片側のみにピークが発生するモデルで、その付着応力の差が水平抵抗力に表れたと考えられる。従って、PC ストランドを用いた壁の耐震性能に関して、付着すべりを考慮した解析の精度を確保するには、付着強度と強度時すべり量だけでなく、両者の履歴特性に関しても適切に評価する必要がある。

5. 結論

本研究は、PC ストランドを用いた RC 耐力壁の履歴性能を評価するための解析手法を示した。実験結果との比較により、以下の知見を得た。

- (1) PC ストランドの付着すべりを考慮した数値解析により、壁の履歴性状と主筋のひずみを精度良く評価できる。一方、PC ストランドの付着すべりによる影響を無視した解析法は、壁の履歴性能及び残留変形角を過大評価する傾向にある。
- (2) PC ストランドを境界要素に用いた壁の解析における、せん断変形の影響の考慮は、初期剛性だけでなく、大変形域での水平抵抗力の評価に影響を及ぼす。
- (3) PC ストランドを境界要素に用いた壁の耐震性能に

関して、付着すべりを考慮した解析により評価を行う上では、付着強度と強度時すべり量だけでなく、付着応力の履歴特性に関しても適切に評価する必要がある。また、PC ストランドの座屈やコンクリートの圧壊の影響を解析で考慮することも必要と考えられる。これは今後の課題としたい。

謝辞

本研究の一部は中日政府間国際共同研究(2016YFE0125600)、中国教育部創新団隊發展計画(IRT_16R7)及び中国河南省中原千人計画(ZYQR201912029)の支援を得た。

参考文献

- 1) Sargsyan, G., Cai, G., Takeuchi, T. and Sun, Y.: Seismic Behavior and Assessment of Drift-Hardening Concrete Columns, 16th WCEE, No.664, Jan.2017
- 2) Yuan, W., Zhao, J., Sun, Y. and Zeng, L.: Experimental Study on Seismic Behavior of Concrete Walls Reinforced by PC Strands, Engineering Structures, Vol.175, pp.577-590, 2018
- 3) 福原武史, 他: 高強度鉄筋を用いた高強度 RC 部材および骨組みの耐震性能評価法の提案, 日本建築学会大会構演梗概集 pp.195-196, 2005.9
- 4) 船戸祐樹, 孫玉平, 竹内崇, 蔡高創: スパイラル溝を有する超高強度鉄筋の付着特性のモデル化と柱部材の履歴解析への応用, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.157-162, 2012.7
- 5) 北島英樹, 他: 高強度 RC 部材の付着すべり問題を考慮した耐震性能評価法の提案, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 44 号, pp.349-352, 2005.3
- 6) 是永健好, 渡辺英義: PC 鋼より線とグラウト材の付着特性評価, 日本建築学会大会構演梗概集(構造IV), pp.1083-1084, 1999.9
- 7) Committee European De Normalization (CEDN): Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures (Part 2), pp.16, 2005
- 8) 孫玉平, 崎野健治, 吉岡智和: 直線型横補強筋により拘束された高強度 RC 柱の曲げ性状, 日本建築学会構造系論文集, No.486, pp.95-106, 1996