

論文 繰り返し水平力を受けるプレキャストコンクリート間仕切壁付き RC 骨組の弾塑性解析モデル

Darama Hüseyin^{*1}・田村 和夫^{*2}・塩原 等^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート骨組内にダウエル鉄筋を介して接合される完全スリット付きプレキャストコンクリート非構造壁の弾塑性解析を行った。このモデルは、非構造壁を剛体と仮定し、非構造壁と周辺フレームを接合するダウエル鉄筋の非線形復元力特性、周辺フレームとの適合条件、および力の釣り合いを考慮する方法である。この方法を1層1スパン骨組に適用して正負漸増振幅繰返し弾塑性解析を行い非構造壁の復元力の推定を試みる。また、解析を実験に適用して復元力特性の計算結果と実験値との比較によりモデル化の妥当性を検討する。

キーワード：ダウエル鉄筋，非構造壁，完全スリット，弾塑性解析，復元力特性

1. はじめに

最近の中高層鉄筋コンクリート造集合住宅では、骨組内に設けられるコンクリート非構造壁が地震時の性能に悪影響を及ぼすことがないように完全スリットが採用され、構造設計は非構造壁の影響を無視して行われていることが増えている。しかし実際には、非構造壁は面外方向に働く地震力などの力により転倒や脱落が起こることのないように周囲の骨組に接合され、完全に骨組と分離されているわけではない。これらの耐震性に及ぼす効果に関する既往の研究はほとんどないのが実情である。

完全スリット型の非構造壁は、図-1に示すように、コネクタの剛性と強度が相対的に小さい場合には、ロッキングする剛体とみなせる。層間変形が生じると小変形の範囲(<約1.0%)では骨組と非構造壁を接続するコネクタに変形が集中し、コネクタがエネルギーを消費する。層間変形が大きくなると骨組と非構造壁の間隔が狭まり、大変形(>約1.0%)では両者が接触し、非構造壁のストラット機構が圧縮ブレースとして層間変形の増大を抑制する。

このように、コネクタを有する完全スリット型の非構造壁と周辺骨組の相互作用は、一種の制震機構としてとらえることができる。この影響を定量的に考慮した耐震設計を行うには、復

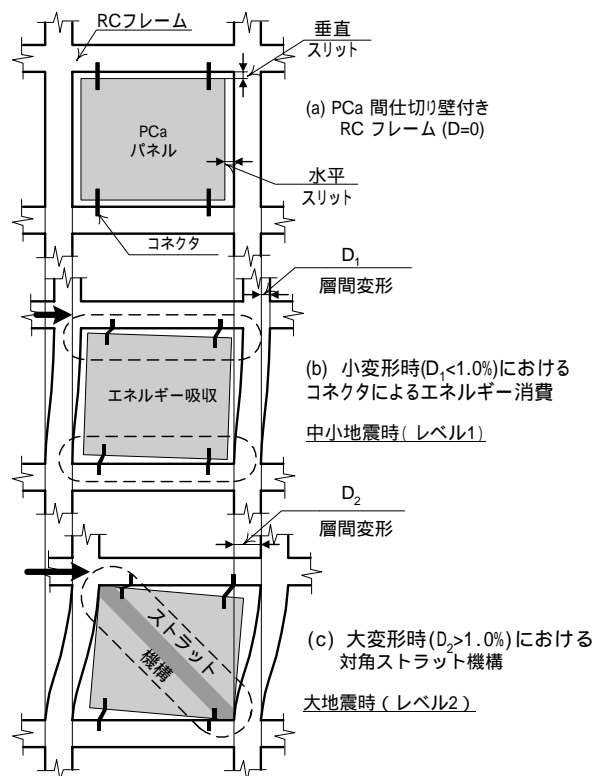


図-1 地震時における PCa 間仕切壁の二重挙動

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 博士課程 (正会員)

*2 清水建設(株) 技術研究所施設基盤技術センター長 工博 (正会員)

*3 東京大学 工学系研究科建築学専攻 助教授 工博 (正会員)

元力特性を材料，強度，位置，個数，及び位置などの諸元から推定することができるモデルが必要となる。本研究では，このような機構の非線形復元力特性を推定するための解析モデルを提案して，正負繰返し漸増振幅弾塑性解析を行い，解析結果と実験値とを比較してモデルの妥当性を検討する。

2. 解析モデル

非構造壁と周辺骨組のコネクタを介した相互作用は一般的には複雑となるが，ここでは，上・下・側面にコネクタを持つ1枚のパネルが設置された簡単な1層1スパンフレームを扱う。

解析モデルを図-2(a)に示す。非構造壁を表すパネル要素は剛とする。コネクタは，独立した引張・せん断ばねからなる Discrete Spring (以下 DS) モデルで表す。パネルと周辺骨組に隙間がない場合，ロッキングばねを導入する。

2.1 接合部の要素

パネル要素と構造骨組間の相互作用を扱うには，接合部の剛性を評価する必要がある(図-3)。例えば，図-3の丸印に示すコネクタの荷重変形関係は，式(1)，(2)のように表される。

$$\{F\}_{03-011} = [K]_{03-011} \cdot \{\Delta\}_{03-011} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} p_{x03} \\ p_{y03} \\ p_{x011} \\ p_{y011} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & -k_x & 0 \\ 0 & k_y & 0 & -k_y \\ -k_x & 0 & k_x & 0 \\ 0 & -k_y & 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{x03} \\ \delta_{y03} \\ \delta_{x011} \\ \delta_{y011} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

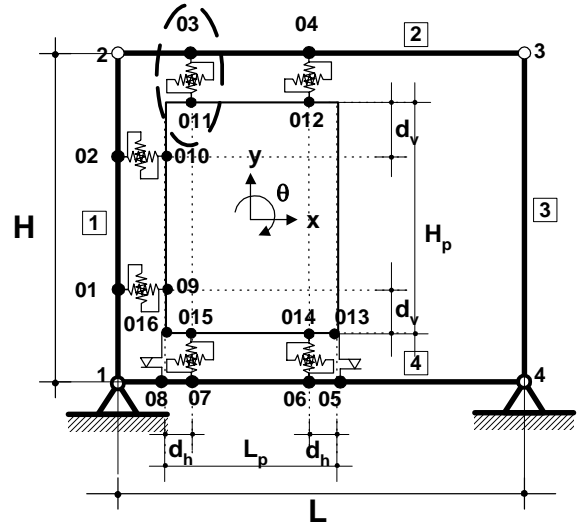
ここに， p_{xi} および p_{yi} はばねの復元力， k_y および k_x は引張・せん断ばねの剛性とした。

また，ロッキング機構は式(3)，(4)のように表される。

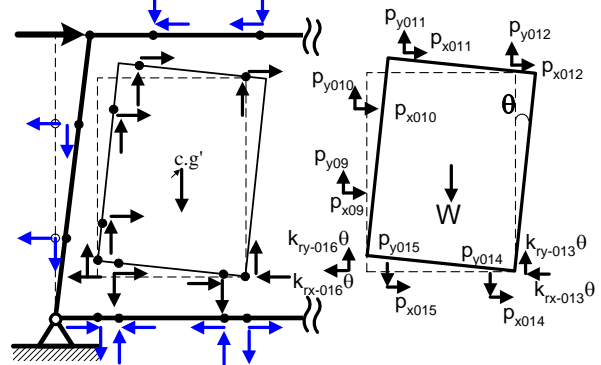
$$p_{r-016} = \frac{(1 - \text{sign}(\theta))}{2} k_{r-016} \theta \quad (3)$$

$$p_{r-013} = \frac{(1 + \text{sign}(\theta))}{2} k_{r-013} \theta \quad (4)$$

ここに， p_{ri} は反力， θ_{ri} はパネル要素の回転角とした。ロッキングばねの剛性 k_{ri} は弾性で，向きの影響は符号関数に含まれている。



(a) 独立ばねの解析モデル



(b) 剛体パネルのモデル

図-2 PCa 間仕切り壁つき RC 骨組解析モデル

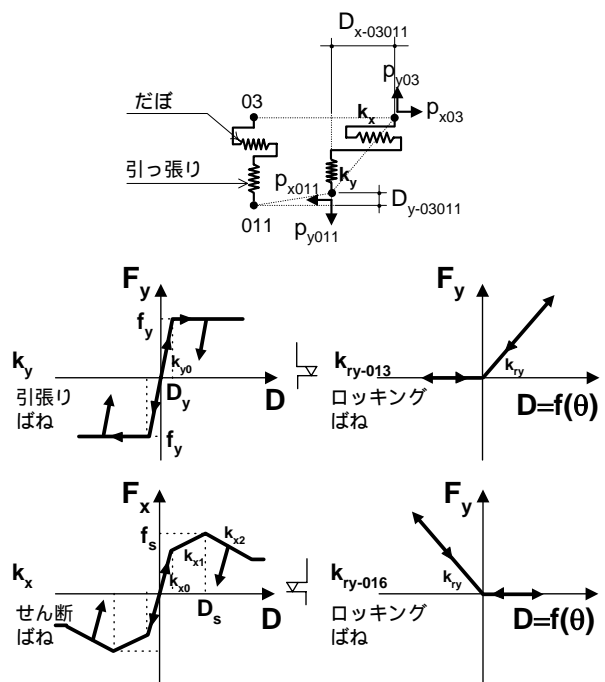


図-3 接合部モデルとばね要素

このような構造システムの弾塑性解析法は、筆者らがすでに文献1で報告している。この方法を要約すれば、パネルの変位 x 、 y と回転角 θ を、(1) 周辺フレームとの適合条件、(2) コネクタの構成則、(3) パネルに作用する力の釣り合い条件をすべて満たすように繰返し計算によって探索し、層間変位と復元力を求める方法である。

2.2 ダウエル鉄筋

ダウエル鉄筋は、中高層住宅で実際に採用されることのあるコネクタの一つである。ダウエル機構は、せん断力を伝達する機構の一種で、ダウエルの強度と剛性に影響する要因に、材料強度であるコンクリートの降伏強度 (f_y) [N/mm²] やひび割れ強度 (f_c) [N/mm²]、鉄筋の直径 (d_b) [mm]、スリット幅 (e) [mm]、引張り力比 (T/T_y) 等がある。ダウエル鉄筋に引張り力が作用する場合のダウエルせん断強度を予測するために4.2節では式(5)を用いる。²⁾

$$V_u^2 + (10f_c e d_b)V_u - 1.7d_b^4 f_c f_y = 0 \quad (5)$$

ここに、 V_u は終局せん断強度とした。ダウエル強度のせん断と引張りの相互作用は、式(6)に示すダウエル強度低下式(線形)を用いて表す。

$$V = V_u [1 - 0.80(T/T_y)] \quad (6)$$

ここに、 V はダウエル強度、 T_y は鉄筋の引張降伏強度とする。

この場合、包絡曲線と繰返しのルールには、Bouc-Wen のモデル³⁾を用いる。また、文献1でモデル化したダウエルせん断力と横ずれ変位の関係から、ダウエル強度の75%時の変位を1.2mmとする。

3. PCa 間仕切壁の繰返し載荷試験

ここでは、筆者らが2005年に清水建設技術研究所において実施した実大実験を対象として本解析法の適用を試みる。実験の目的は、コネクタとしてダウエル鉄筋を用いて周辺骨組に接合された完全スリット付プレキャストコンクリー

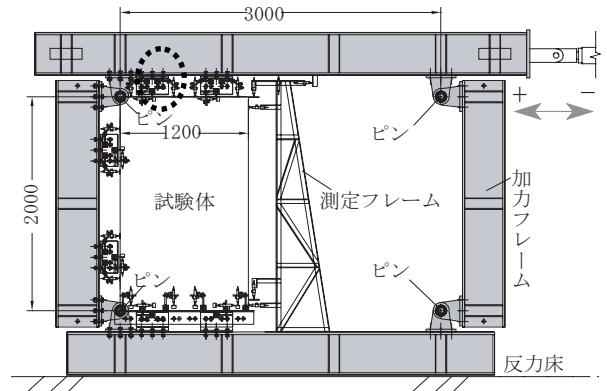


図 - 4 加力装置と試験体 A1 の設置方法

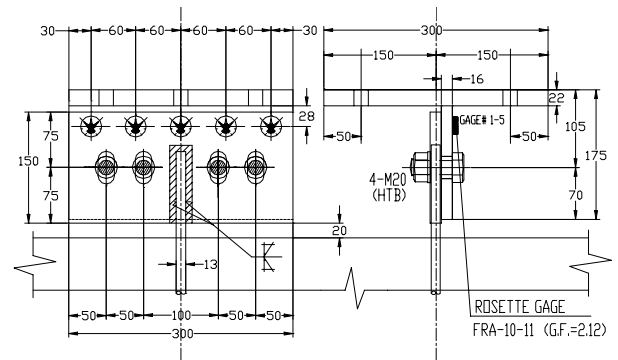


図 - 5 3軸ひずみゲージ詳細

表 - 1 実験の変数

試験体	だば鉄筋種類	設置位置			スリット幅(mm)			鉄筋径
		横	上	下	横	上	下	
A1	異形鉄筋	2	2	2	20	20	0	D13
B1	異形鉄筋	-	2	2	-	20	0	D13
B2	低降伏点鋼	-	2	2	-	20	0	φ14
B3	異形鉄筋 付着なし	-	2	2	-	20	0	D13
B4	異形鉄筋	-	2	2	-	10	0	D13

D13: SD295A ($f_y=354$ MPa), φ14: ELCH2 ($f_y=193$ MPa), PCa ($f_c=35$ MPa)

ト非構造壁の復元力特性に関する資料を得ることである。実験の変数を表-1に示す。パネルの寸法は高さ2000mm、幅1200mm、厚さ120mmで共通である。加力フレームはピンで接合された剛強な鉄骨はりで、層間変形を加えるとスムーズに平行四辺形となる機構としてある(図-4)。スリット幅、コネクタの種類、コネクタの取り付け位置および境界条件などの変数が与える影響を比較検討した計5体の試験体を解析対象とする。

試験体Bシリーズは、パネルの寸法、コネクタ設置位置、数とも共通で、B1は、ダウエル鉄

筋に D13 を用い、スリット幅は 20mm としたものの、試験体 B4 は、B1 のスリット幅を 10mm としたものの、試験体 B3 は、ダウエル鉄筋の付着を除去したもので、B2 は、ダウエル鉄筋に低降伏点鋼を使用したものである。試験体 A1 は、側面にもコネクタを有する。すべての試験体の下端のスリット幅は 0 mm である。

実験中にそれぞれのコネクタに作用する 2 軸応力を計測するため、各コネクタでそれぞれ 5 箇所ずつ 3 軸歪ゲージをダウエル筋と加力フレームを接合するプレートに等間隔に貼り付け(図 - 5)、歪を記録した。図 - 6 には、得られたデータの一例として、コネクタ 2(図中右上の丸印)に作用するせん断力とコネクタにおける変位の関係を示している。

履歴曲線は、コネクタの位置によりすべて異なっているが、これは、コネクタに作用する軸力がコネクタ位置や水平荷重のレベルによりすべて異なるためである。そこで、図 - 6 のように実験結果から得られたコネクタの横ずれ変位とせん断力の関係を、降伏前、降伏後、および耐力低下域での 3 折れ線でモデル化した。

3 折れ線モデルでは、包絡線を基本に、除荷と載荷で表現される履歴特性を用いる。骨格曲線に関する主要変数は、初期剛性 k_0 、2 次または降伏後の剛性 k_1 およびピーク後の剛性 k_2 である。その他の変数は、降伏後の剛性が荷重軸と交差するときの荷重 F_0 、最大耐力時の変形 D_{max} 、最大耐力 F_{max} 、および下降曲線の起点である。表 - 2 に、実験の計測結果から得られたコネクタの

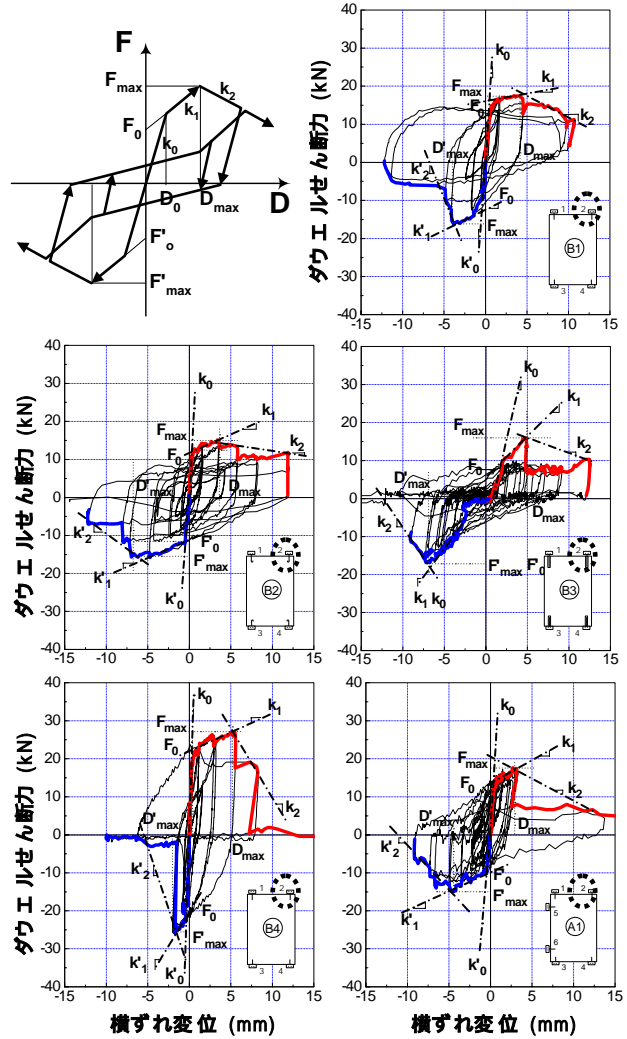


図 - 6 コネクタの履歴曲線とそれらに適合する 3 折れ線の例

復元力特性を 3 折れ線モデルに理想化するための係数を示す。

4. 解析結果と実験結果の比較検討

提案モデル¹⁾の妥当性を検討するため、解析で得た荷重変形関係と実験の測定値を比較する。解析にあたっては、次の 2 つの方法で検討する。

表 - 2 各試験体のコネクタ 2 の特性係数

変数	試験体B1		試験体B2		試験体B3		試験体B4		試験体A1	
k_0, k'_0	37.03	28.87	37.52	25.19	5.24	2.69	43.79	51.63	35.90	22.24
k_1, k'_1	0.41	1.06	0.87	0.84	2.30	2.69	2.44	2.84	1.22	0.99
k_2, k'_2	-1.13	-5.44	-0.29	-1.49	-0.74	-2.53	-3.66	-7.10	-1.15	-2.33
F_0, F'_0	15.90	-12.42	11.90	-11.63	7.58	-17.28	19.85	-20.61	13.58	-9.43
F_{max}, F'_{max}	17.47	-16.16	14.89	-16.20	16.10	-17.28	27.37	-26.03	17.66	-14.96
D_0, D'_0	1.23	-1.29	0.41	-0.60	1.89	-6.55	1.00	-0.50	0.80	-0.71
D_{max}, D'_{max}	4.18	-4.02	3.54	-6.16	4.97	-6.55	5.56	-2.06	2.92	-4.85

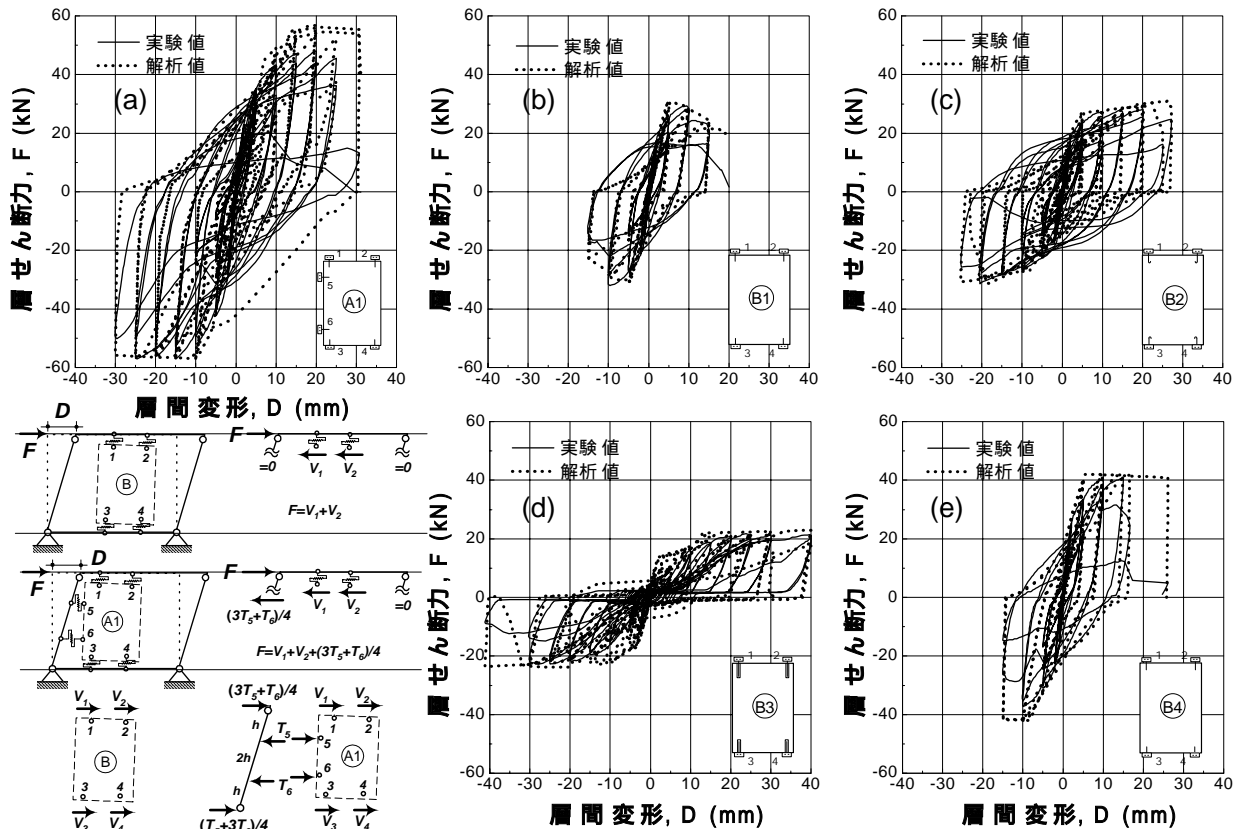


図 - 6 層せん断力に関する測定結果と解析結果の比較 (半実験的手法)

- (1) ダウエル鉄筋のせん断ばねの復元力特性の骨格曲線に、実験で計測された復元力特性 (図 - 7, 表 - 2) を用い、引張ばねとせん断ばねは相互作用がないと仮定する、実験結果を用いる解析方法。
- (2) ダウエル鉄筋の復元力特性に実験で計測されたものを用いず、式 (5) と (6) で求められる強度と Bouc-Wen の履歴モデルにより復元力特性を仮定する、実験結果を用いない解析方法。

4.1 実験結果を用いる手法による解析

個々のダウエル鉄筋の復元力特性を実験結果から定めた 3 折れ線モデルとした、実験結果を用いる手法による荷重変形関係の解析結果を、図 - 7 に実験結果と併せて示す。

図 - 7 に示すように、最大耐力の対応は良好である。特に側面にコネクタのない試験体 B シリーズで良い対応が得られた。また、最大耐力に達するまでは、解析結果の包絡線と履歴ループの形状は、実験結果とよく一致しており、各サイクルピーク時の層せん断力の解析値の実験値

に対する比は 1.1 程度であった。

これは、この領域では履歴ループが安定し、耐力劣化も小さいためと考えられる。しかし最大耐力後、解析結果と実験結果の差が大きくなる。試験体 B2 では比較的解析結果と実験結果の対応がよい。試験体 B2 の対応が良い理由としては、ダウエル鉄筋に普通鋼の異形鉄筋を用いる代わりに高靱性 (破断伸び 31.0% 程度) の極低降伏点鋼 (丸鋼) を用いているため、耐力低下が少ないことが考えられる。

4.2 実験結果を用いない手法による解析

次に、ダウエル鉄筋の復元力特性の推定にあたって、実験で計測されたものを用いず、式 (5) と (6) で予測される強度および Bouc-Wen のモデルによる復元力特性を仮定する方法で得られる解析結果を、実験結果と比較して図 - 8 に示す。全試験体で強度は解析結果が実験結果を上回った。これは、本研究では単純化のためダウエル鉄筋の繰返し载荷による耐力劣化を無視し、耐力に単調载荷時のものを用いているためと考えられる。一方、解析結果の履歴ループは小変形

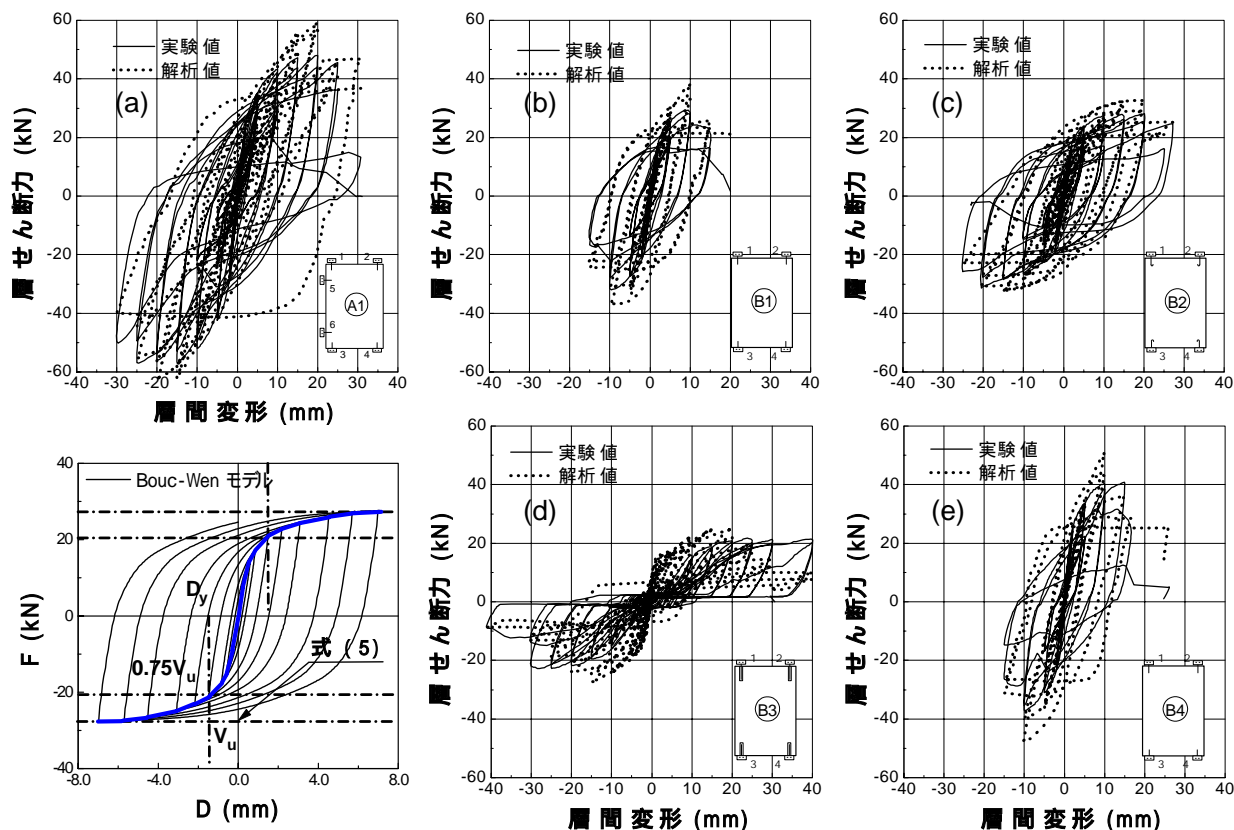


図 - 7 層せん断力に関する測定データと解析結果の比較(実験を用いない手法)

時には実験結果とよく一致したが、最大耐力後の加力サイクルのピーク時荷重は解析値が実験値より大きく、大きな差が生じた。これは、累積損傷指数やエネルギー消費の影響を考慮するモデルとすることで改善されると考えられる。

実験結果を用いる手法の場合と同様に、試験体 B2 では安定した履歴ループ形状となるために解析結果と実験結果が最もよく一致した。試験体 B2 における各加力サイクルピーク時の荷重の解析値と実験値の比の平均は、1.18 となった。解析結果と実験結果の差が生じる他の理由として、鉄筋の破断が生じた場合の解析が困難な点が挙げられる。

5. まとめ

本研究では、非構造壁に用いられるダウエル鉄筋について、せん断・引張ばねの相互作用を含めたモデル化を行い非構造壁の復元力特性の推定への適用を試みて、以下の結論を得た。

(1) DS モデルを用いた解析法は、ダウエル鉄筋のばねの特性に実験結果を用いると良い精

度が得られた。ピーク時の強度の計算値と実験値の比は 1.1 程度の近い値となった。

(2) ダウエル鉄筋の引張 - せん断相互作用をモデルで表現した材料強度や形状、寸法などのみを用いた場合、小変形時および最大耐力時のせん断力は、1.2 から 1.4 倍の精度で推定することができた。

謝辞 実験の実施にあたり、協力をいただいた東京大学卒論生の久保香織君、清水建設(株)技術研究所 寺田岳彦氏、金子美香氏に、ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Darama H. Shiohara H. "Energy dissipation of PCa partition connectors in RC frame structure", JAEE, pp. 432-433, 2005
- 2) Tassios T. et al. "Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions", Magazine of Concrete Research, Vol.38, pp.13-22, 1986
- 3) Wen. Y. K. "Method for random vibration of hysteretic systems", ASCE, J. Eng. Mech., Vol. 102, pp. 249-263, 1976