

論文 施工性と修復性の向上を目指したアンボンドPCaPC架構に用いる履歴型制震デバイスの実験

楠原 文雄*1・塩原 等*2・岡村 喜吉*3・石岡 拓*4

要旨: 地震時に架構のエネルギー吸収が小さいアンボンド PCaPC 架構用に, PCa 壁板のコネクタを低降伏点鋼としパネルのロッキング変形を利用した履歴型制震デバイスを開発し, 実大実験により耐震性能を検討した。実験により, 低降伏点鋼を用いたコネクタダンパーではコネクタと壁板の接合面でのすべりや大変形時の面外変形などは生じるが, 層間変形角 2%以上まで安定した履歴性状を示し十分なエネルギー吸収能力があることが明らかにした。

キーワード: 履歴ダンパー, 低降伏点鋼, コネクタ, PCa 壁板, ロッキング, アンボンド PCaPC

1. はじめに

コンクリート系構造の中でも柱・梁をプレキャスト(以下, PCa)とし, 部材をプレストレスにより圧着したプレストレスコンクリート(以下, PC)構造は, 一般的な鉄筋コンクリート(以下, RC)構造に比べて施工性に優れている。また, 梁に導入されたプレストレスにより架構の大スパン化, 軽量化を図ることも可能である。

現在, PC 構造では PC 鋼材のシーす管内にグラウト等を充填して PC 鋼材の付着を確保した構造が一般的であるが, この一体化により, 建物の解体時や用途変更時には RC 構造と同様に部材の再利用等は困難である。一方, 近年使用可能となったアンボンド PC 構造では, 損傷が部材の圧着面近傍に集中するため修復性に優れるとともに, プレストレス力を取り除くことにより解体とその後の再利用や損傷部分のみの交換などが容易である。

しかし, アンボンド PC 構造では PC 鋼材に付着がないため PC 鋼材の歪が全長にわたって均一に生じて部材の最大耐力時の変形が大きくなることや, 復元力特性は残留変形が小さい原点指向型の履歴形状でエネルギー吸収能力が小さいことも明らかにされている¹⁾など。このため地震時の架構の応答は大きくなることが予想され, 応答の低減には粘性減衰もしくは履歴エネルギー吸収を利用したエネルギー吸収機構を併用が不可欠である。

そこで, 本研究では外壁や間仕切壁の PCa 壁を利用した取り換え可能な制震デバイスを開発し, 実大試験体の水平加力実験によりその構造性能を確認する。

2. 制震デバイスの概要

制震デバイスは PCa 壁の取り付け用接合部(以下, コネクタ)を利用したエネルギー吸収機構(ダンパー)と

し, 低降伏点鋼を用いた履歴エネルギー吸収型とする。

制震デバイスの基本概念を図-1に示す。PCa 壁は上下に架構(梁・床)との間に隙間を設け, 架構の層間変形に対してロッキング変形する方立て壁の使い方を基本とする。PCa 壁のロッキング変形に伴う壁板 4 隅の鉛直方向の変位により, 4 隅に取り付けたコネクタのダンパー部分がせん断変形し, また鉛直リブの一部に回転変形が生じる。この機構において変形が集中するダンパー部(せん断変形部)と鉛直リブ(回転変形部)を低降伏点鋼とすることで吸収できる履歴エネルギーを大きくすることをねらった。

また, コネクタは PCa 壁および梁に設置されるねじつき鋼板もしくは埋め込みアンカーボルトに高力ボルト(以下, HTB)により取り付けるものとした。

3. 実験計画概要

3.1 試験体概要

壁板にコネクタの取り付け状態の試験体を図-2に示す。外装 PCa 版への取り付けを想定し, コネクタはパ

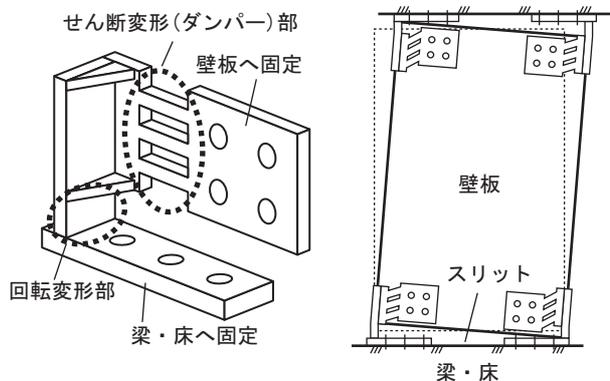


図-1 コネクタダンパーの基本概念

*1 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 助教 修(工) (正会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 准教授 工博 (正会員)

*3 前田建設工業(株) 技術本部 技術研究所

*4 戸田建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

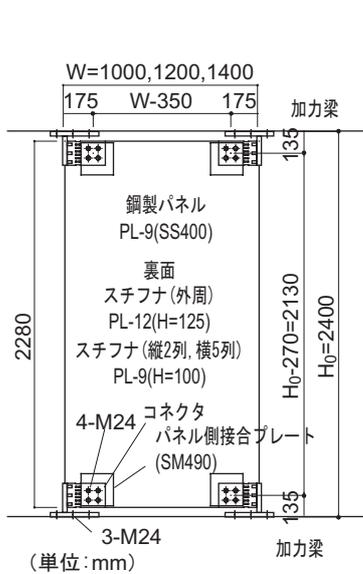


図-2 試験体の形状

ネルの片面のみに取り付けるものとした。また、壁板は実験における再使用を考慮し本実験では鋼製とした。

コネクタの形状を図-3に示す。コネクタのタイプは表-1に示す通りせん断変形部の形状および回転変形部の板厚を変数とした4種類である。試験体変数はこれにパネル幅を加え、表-2に示すパネル幅とコネクタタイプの組み合わせにより8体の試験体の実験を行った。コネクタの材質はすべて低降伏点鋼である。

鋼製パネルへのコネクタの取り付けは1箇所あたりHTB (M24, F10T) ×4本とし、鋼製パネル側のめねじの耐力が小さいためHTBへの導入張力はF10Tの標準張力の約80% (206kN)とした。導入張力はトルクレンチを用いて締め付けトルクにより管理した。また、コネクタとパネルの接合面は、パネル側は発錆剤による発錆処理を施し、試験体1200-Iを除く7体の試験体ではコネクタ側接合面についても発錆剤による発錆処理を行った。

3.2 使用材料

使用した低降伏点鋼の材料試験結果を表-3に、引張試験における応力度-歪度関係を図-4に示す。材料試験は、板厚16mm, 28mmそれぞれについてJIS Z 2201の5号試験片を作成し行った。

使用した低降伏点鋼は明瞭な降伏点および降伏棚を有し、降伏比は0.6程度であった。

3.3 加力方法

試験体への荷重は、図-4に示す加力フレームを用いて行った。鋼製パネルの四隅に取り付けたコネクタをHTBにより加力フレームに接続し、両端ピン接合の柱により支持された上部加力梁端に500kN油圧ジャッキにより水平力を加えた。加力フレームは図-4に示すように面外方向の変形を拘束できる構造となっている。また、

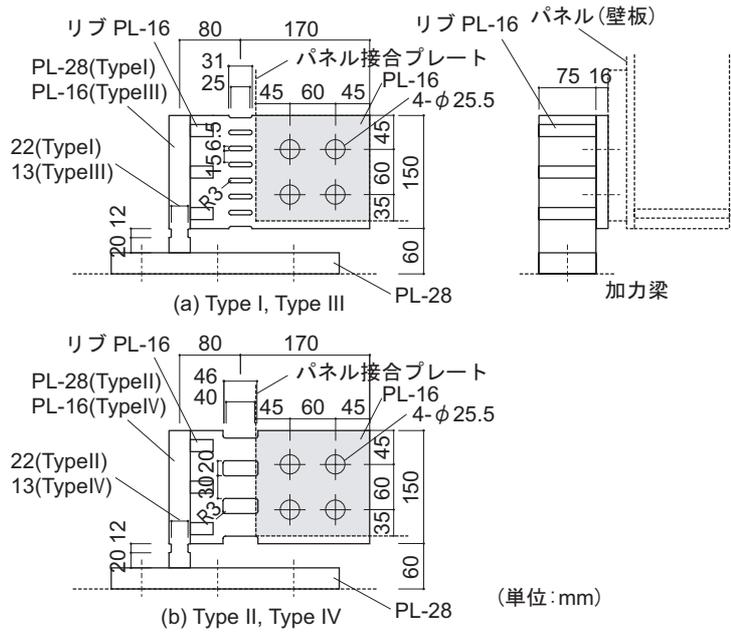


図-3 コネクタの形状

表-1 コネクタのタイプ

	せん断変形部				回転変形部		
	板厚 t_d (mm)	せい D_d (mm)	長さ l_d (mm)	本数 n_d	幅 b_r (mm)	板厚 t_r (mm)	最薄厚 t_0 (mm)
I	16	15	25	7	75	28	22
II		30	40	3		28	22
III		15	25	7		16	13
IV		30	40	3		16	13

表-2 試験体一覧

試験体名	パネル幅 W (mm)	コネクタタイプ
1200-I	1200	I
1200-II		II
1200-III		III
1200-IV		IV
1000-I	1000	I
1000-II		II
1400-I	1400	I
1400-II		II

表-3 低降伏点鋼の材料試験結果

板厚 (mm)	ヤング係数 (10^3 N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)
16	211.7	160.6	266.6	67.9
28	210.0	164.9	268.5	78.1

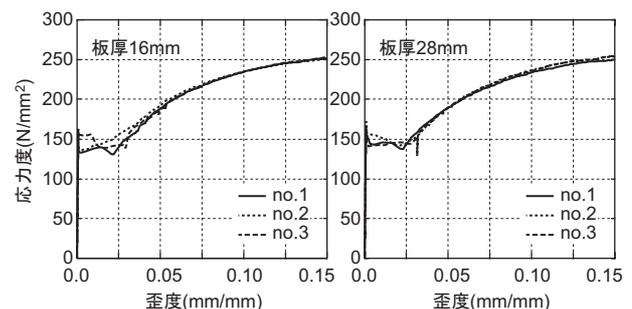


図-4 低降伏点鋼の応力度-歪度関係

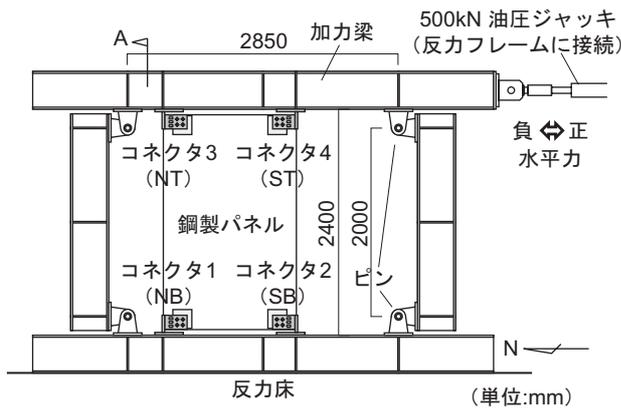


図-4 加力装置

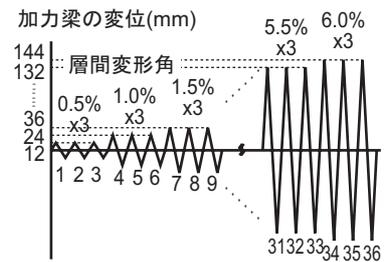
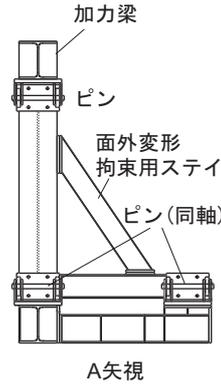


図-5 载荷履歴

荷重はジャッキの引き方向（南向きに加力）を正とした。

载荷は変位制御による正負交番繰り返し载荷とし、繰り返し载荷時の振幅は層間変形角（上部加力梁の水平変位の加力フレームの内法高さ（ $H_0=2400$ mm）に対する比）を 0.5%（12 mm）ずつ漸増させ、2つ以上のコネクタの破断により試験体のせん断耐力が失われるか、最大振幅 6.0%（144mm）まで行うものとした。同一振幅における繰り返し数は 3 とした。载荷履歴を図-5 に示す。

なお、後述のように実験中にパネルとコネクタの接合面のすべりが生じたため、試験体 1200-I～IV では層間変形角 1.0% の 1 回目の加力サイクル終了後、再度所定のトルクまで HTB を増し締めした。また、試験体 1200-I は実験中加力フレームの変形が過大になったため層間変形角 2.5% の加力サイクルまでで実験を終了した。

3.4 測定方法

- (1) 層せん断力, (2) 加力梁（上梁）の水平変位, (3)

パネルの加力フレームに対する水平変位および鉛直変位, 回転角および面外変位, (4) コネクタのダンパー部せん断変形, (5) コネクタの回転変形部の回転角, (6) コネクタとパネル接合部のずれについてロードセルおよび高感度変位計により測定を行った。

4. 実験結果

4.1 破壊状況

最終的な破壊形式は、試験体 1200-I, 1200-II, 1000-I, 1000-II はせん断変形部の破断, 回転変形部の板厚が小さい試験体 1200-III, 1200-IV とパネル幅が大きい試験体 1400-I, 1400-II は回転変形部の破断となった。せん断変形部および回転変形部（鉛直リブ）の破断の様子を写真-1 に示す。

パネルの 4 隅の 4 つのコネクタには対称な変形は生じず、全体としてはパネルが下がる方向に変形の偏りが進



(a) 破断直前のせん断変形部 (試験体 1000-I)



(b) せん断変形部の破断 (試験体 1000-I)



(c) せん断変形部の破断面 (試験体 1000-I)



(d) 回転変形部の亀裂 (試験体 1200-IV)



(d) 回転変形部のねじれ (試験体 1200-IV)



(f) 回転変形部の破断 (試験体 1200-IV)

写真-1 コネクタの破壊状況

み、せん断変形部か回転変形部かといった破断部の違いによらずいずれの試験体においても下側のコネクタにおいて最初の破断が生じた。

せん断変形部で破断が生じる場合、断面に引張力が生じる向きの加力（コネクタ 1 (NB) では正加力時、コネクタ 2 (SB) では負加力時）で引張力とリブ端部の曲げによる破断が生じた。最初のコネクタの破断以降は破断したコネクタの上部に位置するコネクタに変形が集中し、そのコネクタの破断に到って復元力を失った（図-6(a)）。また、せん断変形部が破断した試験体においても、層間変形角 2.0%~3.0%の加力サイクルで回転変形部に亀裂が生じていることが確認された。

回転変形部で破断が生じる場合も同様に断面に引張力が生じる向きの加力で水平せん断力、面外方向の曲げ、水辺面内のねじれモーメントによる変形により破断が生じた。回転変形部が破断した場合は下側のもう 1 つのコネクタに変形が集中し、そのコネクタの破断に到って復元力を失った（図-6(b)）。

また、大変形時には鉛直リブに圧縮力が生じる向きの加力でせん断変形部および回転変形部に面外方向の曲げ変形が生じ、パネルは東側（コネクタがついていない側）に移動が生じていた。

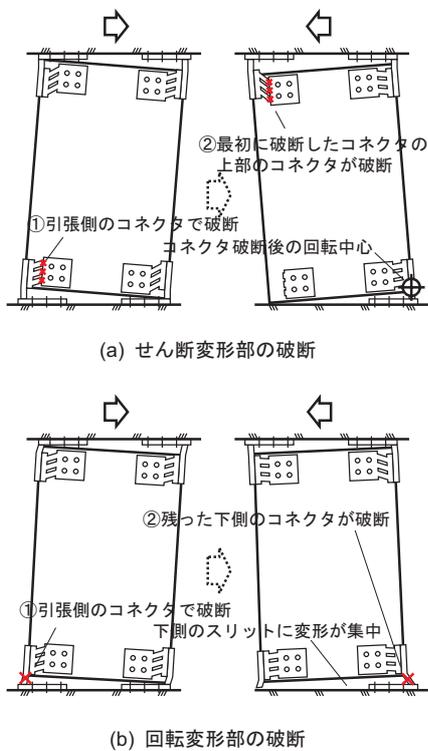


図-6 コネクタの破壊過程

4.2 層間変形角一層せん断力関係

図-7 に各試験体の層間変形角一層せん断力関係を、表-4 に実験結果一覧を示す。層間変形角は加力梁の水平変位を加力フレームの内法高さ ($H_0=2400$ mm) で除したものとし、層せん断力は油圧ジャッキにより加えた水平力とした。図中の×印はコネクタの破断を示している。

いずれの試験体においても、第 1 サイクル（層間変形角 0.5% 1 回目）でせん断変形部が降伏し、層せん断力一層間変形角関係においても剛性の低下が生じた。また、いずれの試験体においてもパネルとコネクタの接合面にすべりが生じ、層せん断力一層間変形角関係はスリップ状となった。

初期剛性はコネクタとパネルの接合面を発錆処理していない試験体 1200-I が小さいことを除くと、せん断変形部の形状の差 (Type I と Type II, Type III と Type IV) および回転変形部の板厚による差は小さく、また、パネル幅が大きいほど初期剛性も大きくなった。

降伏強度を層間変形角一層せん断力関係における原点および第 1 サイクルピークにおける接線の交点の層せん断力とすると、初期剛性と同様にせん断変形部の形状および回転変形部の板厚による差は小さく、パネル幅が大きいほど降伏強度も大きくなった。層間変形角 0.5%、

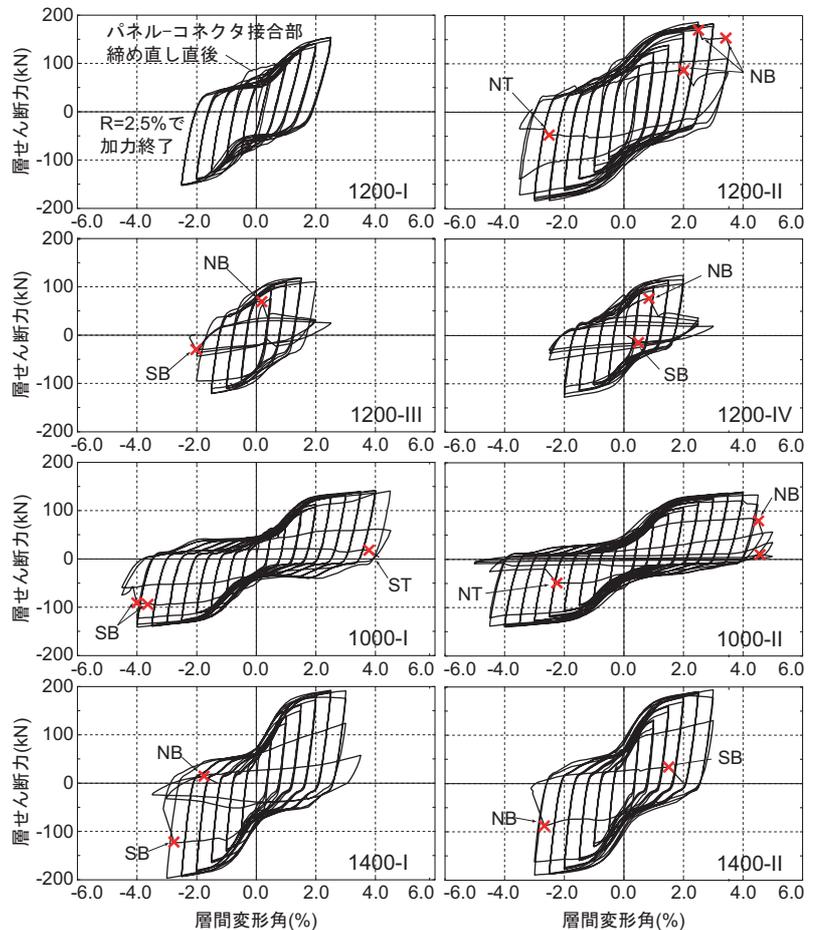


図-7 層間変形角一層せん断力関係

1.0%といった同一振幅における層せん断力についても同様の傾向である。また、同一振幅における層せん断力は負側のほうがバウシinger効果により大きくなった。

せん断変形部に亀裂が確認された変形はパネル幅が小さいほうが大きく、層間変形角で2.0~4.0%であった。また、せん断変形部の形状により、リブのせいが大きいTypeIIの試験体では同じパネル幅のTypeIの試験体に比べて0.5~1.0%小さい変形で亀裂が生じた。

コネクタに破断が生じる前に経験した最大層間変形角は、回転変形部に破断が生じた試験体のほうが小さい傾向を示し、せん断変形部の破断ではパネル幅が小さいほど大きかった。また、せん断変形部で破断が生じた試験体も含め、変形性能にはせん断変形部の形状による大きな差はなかった。

本実験結果の範囲ではパネル幅が小さいほうが変形性能は大きいといえ、設計時に2.0%を超える層間変形角を想定する場合や、想定以上の大地震時等にも破断を許容しない場合などはパネル幅を小さくするなどより大変形まで変形できるような設計とすることがある。

4.3 パネル脚部の水平変位

パネル脚部の加力フレームに対する相対水平変位を図-8に示す。せん断変形部の形状による差は小さかったため、TypeIIおよびTypeIVの試験体についてのみ示す。

最終的に回転変形部が破断した回転変形部の板厚が小さい試験体1200-IVとパネル幅が大きい試験体1400-IIでは、破断前に耐力低下が生じ始める加力サイクルから急激にパネル脚部の相対水平変位が増大している。これはこれらの試験体では回転変形部の鋼材に生じる応力度が相対的に大きいため、せん断降伏あるいはクリアスパン両端でのヒンジ形成によりこの部分に変形が集中したためである。

この点を除けばパネル上下の水平スリット部の水平変形は小さく、層間変形のほとんどがパネルのロックンク変形によるものであり、制震デバイスが有効に作用する変形モードであった。

4.4 降伏時層せん断力の計算値

コネクタのせん断変形部の各リブおよび回転変形部の両端が降伏しヒンジが形成されると仮定して計算したダンパー降伏時の層せん断力計算値を表-5に示す。

計算は、式(4)以降に示すように断面の曲げ強度 M_d , M_r を算定し、それぞれ変形するクリアスパンの中央に反曲点があるものとして、式(1), (2)により算定したモーメントを層せん断力に換算した。

$$\sum Q_d = \sum \frac{2M_d}{l_d} = \frac{Q_s}{2} \frac{h_d}{W_d} \quad (1)$$

$$Q_r = \frac{2M_r}{h_0} = \frac{Q_s}{2} \quad (2)$$

表-4 実験結果一覧

	K_e (kN/mm)	Q_y (kN)	$Q_{0.5}$ (kN)	$Q_{1.0}$ (kN)	Q_{max} (kN)	R_{cr}	R_{max} (%)
1200-I	12.6	62	73 -89	99 -100	-	2.5	-
1200-II	26.9	61	75 -92	105 -111	187	2.0	3.0
1200-III	27.7	63	75 -87	104 -106	121	1.5 鉛直リブ	2.0
1200-IV	26.8	59	72 -82	93 -99	128	1.0 鉛直リブ	2.0
1000-I	16.8	50	60 -63	73 -76	142	4.0	4.5
1000-II	16.9	52	58 -67	74 -79	140	3.0	4.5
1400-I	31.0	78	88 -107	124 -137	197	2.0	3.0
1400-II	40.0	75	89 -99	115 -124	194	2.0	3.0

K_e : 初期剛性, Q_y : 降伏強度 (原点および第1サイクルピークにおける接線の交点の層せん断力), $Q_{0.5}$, $Q_{1.0}$: 層間変形角 0.5%および 1.0%の1回目のサイクルのピーク時の層せん断力, Q_{max} : 最大層せん断力, R_{cr} : コネクタに亀裂が生じた層間変形角, R_{max} : コネクタの破断前に経験した最大層間変形角

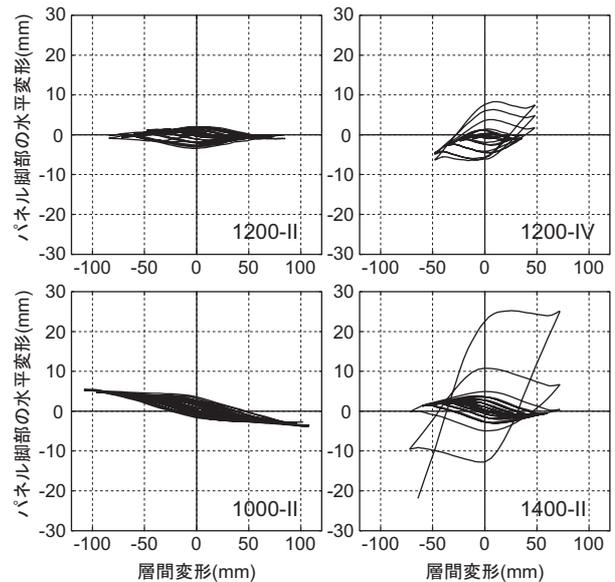


図-8 パネル脚部の水平変形

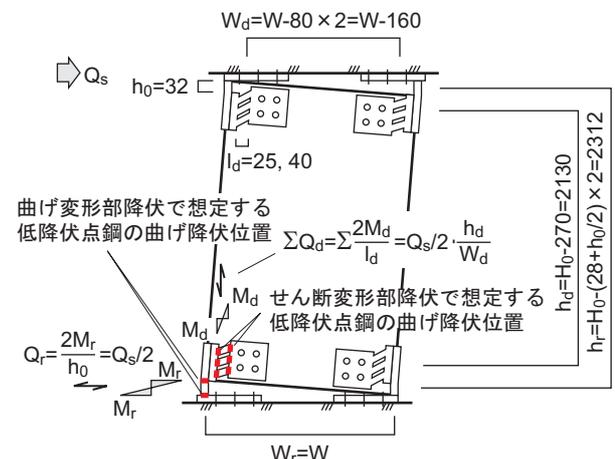


図-9 層せん断力とコネクタの応力

ここに、 Q_s ：層せん断力、 Q_d ：せん断変形部のリブに生じるせん断力、 M_d ：せん断変形部のリブ端部のモーメント、 Q_r ：回転変形部に生じるせん断力、 M_r ：回転変形部端部のモーメント、 W_d 、 W_r 、 h_d 、 h_r ：仮定した反曲点位置間の距離

断面の曲げ強度の計算にあたっては断面に生じるせん断応力の影響も考慮し、降伏条件は次式による。

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (3)$$

ここに、 σ_y ：低降伏鋼の降伏強度、 σ ：断面の軸応力度、 τ ：断面のせん断応力度

降伏モーメントは次の式(4)、(5)を解くことにより求められる。この際、断面に生じる軸力とせん断力の比は上述の反曲点位置の仮定により式(6)、(7)で一定であることを利用する。

$$M_y = \frac{\sigma_e \cdot Z}{1 + (N/M)(Z/A)} \quad (4)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_y^2 - 3(Q/A)^2} \quad (5)$$

ここに、 M_y ：断面の降伏モーメント、 Z ：当該箇所の断面係数、 A ：断面積、 N ：断面に生じる軸力、 Q ：断面に生じるせん断力

$$Q_d/N_d = \frac{h_d/2}{W_d} \quad (6)$$

$$Q_r/N_r = \frac{W_r}{h_r/2} \quad (7)$$

ここに、 Q_d ：せん断変形部のリブに生じるせん断力、 N_d ：せん断変形部のリブに生じる軸力、 Q_r ：回転変形部に生じるせん断力、 N_r ：回転変形部に生じる軸力、 W_d 、 W_r 、 h_d 、 h_r ：仮定した反曲点位置間の距離

断面の全塑性モーメントの場合は式(4)に代えて式(8)を用いて同様に求める。

$$M_u = \sigma_e b x (D - x) \quad (8)$$

$$x = \frac{D + \frac{2}{N/M} - \sqrt{D^2 + \left(\frac{2}{N/M}\right)^2}}{2}$$

ここに、 D ：当該箇所の断面のせい、 b ：断面の幅

降伏時、最大強度とも計算値は実験値よりかなり小さくなった。これは強度計算時に歪硬化による低降伏点鋼の強度上昇を考慮していないためと考えられる。

一方、本実験ではコネクタとパネルの接合面ですべりによる回転が生じており、必ずしも強度算定において仮定した反曲点の位置は正しくない。さらに、せん断変形部や回転変形部に生じる面外曲げや回転変形部に生じる水平面内のねじりモーメントの影響は考慮されておらず、今後さらに検討が必要である。

表-5 強度計算値

	Q_{dy} (kN)	Q_{du} (kN)	Q_y (kN)	Q_{ry} (kN)	Q_{ru} (kN)	Q_{max} (kN)
1200-I	48.7	73.3	62	123.1	182.2	-
1200-II	49.9	73.8	61	123.1	182.2	187
1200-III	48.7	73.3	63	47.5	75.9	121
1200-IV	49.9	73.8	59	47.5	75.9	128
1000-I	41.2	61.5	50	115.5	168.7	142
1000-II	42.4	62.0	52	115.5	168.7	140
1400-I	55.9	85.0	78	129.0	192.6	197
1400-II	57.2	85.3	75	129.0	192.6	194

Q_{dy} ：せん断変形部降伏時層せん断力、 Q_{du} ：せん断変形部全塑性モーメント時層せん断力、 Q_{ry} ：回転変形部降伏時層せん断力、 Q_{ru} ：回転変形部全塑性モーメント時層せん断力、 Q_y ：降伏荷重（実験値：前掲）、 Q_{max} ：最大荷重（実験値：前掲）

5 まとめ

PCa 壁板の接合部を利用した履歴型ダンパーの実大水平加力実験により次の結果を得た。

- (1) コネクタとパネルの接合面での滑りは生じたものの層間変形角 2%以上まで安定した履歴性状を示した。
- (2) パネルの変形はほとんどがロッキングによるものであり、コネクタのせん断変形部に変形が集中する変形モードであった。

せん断変形部に生じる変形はコネクタとパネルの接合部の固定度によっても異なると考えられ、この点や載荷履歴の影響など、破断にいたる条件についての検討は今後さらに必要である。また、実用に向けては壁に偏心してコネクタをとりつけていることから生じる面外曲げやねじれの影響も考慮した簡易な強度および変形の推定方法の確立が必要である。

謝辞：

本研究は、国土交通省先導技術開発助成事業により、平成 18～19 年度の研究課題「構造安全性と生産合理性の融合を目指した鉄筋コンクリート造事務所ビル建築の開発（技術開発責任者：塩原等、千葉脩）」として助成を受け、(社) 建築業協会において実施された共同研究「RC 造事務所ビル研究実施委員会（委員長：塩原等）」の一環として実施された。また、低降伏点鋼の素材を(株) 神戸製鋼より提供いただいた。関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Stone, W. C. Cheok, G. S. and Stanton, J. F. : Performance of Hybrid Mment-Resisting Precast Beam-Column Conections Subjectid to Cyclic Loading, ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 2, pp.229-249, March-April 1995.