

PCa 帳壁の変形追従性能に関する既往の研究と追従限界の考察

正会員 ○ 平郡竜志^{※1} 同 吹田啓一郎^{※2}
同 佐々木哲也^{※3} 同 山田健二^{※3} 同 狗飼正敏^{※3}

2. 構造 -10. 鉄骨構

PCa 帳壁 層間変形追従性能 ロッキング 変形追従機構

1. はじめに

現在の帳壁の設計では地震時に層間変形角 1/100 までパネルの落下が生じないように設計されている。これまで構造体との緊結に用いる金物（ファスナー）とパネルの定着強度や、パネルの変形追従性能とファスナーの損傷に関する実験的研究は行われているが、パネルが脱落に至る限界を示す研究はない。そこで、パネルの層間変形追従性能の限界を検討するための基礎研究として、既往の実験的研究の調査と、現在の一般的な取付方法による変形追従の限界に関する考察を行った。

2.PCa 帳壁の取付方法

PCa パネルのファスナーは、変形追従機構をもつ「振れ止め」と、ピン支点の役割をもつ「荷重受け」の 2 種類で構成される。パネルは 4 点で支持し、パネルの上下いずれかに荷重受け 2 点、他方に振れ止め 2 点を配置する（図 1）。振れ止めには追従する変位の向きが異なるスウェイ形式とロッキング形式の 2 種類がある。スウェイ形式はパネルの上端又は下端を固定し、他端をスライドさせることで変形追従を行い、ロッキング形式はパネルの構面内の回転により変形追従を行う。荷重受けには鉛直方向の位置決め方法の異なる 2 種類（台座ピン、特殊ボルト）があり、パネルの自重を支持し、かつ水平方向の変位を拘束すると共に、鉛直上向きには変位可能な支持点として機能する。図 2 にファスナーの一例を示す。

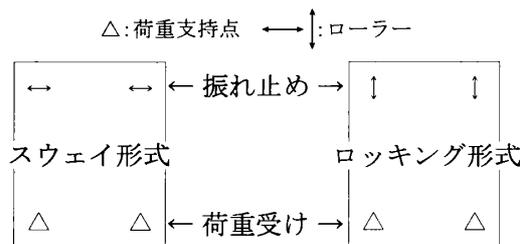


図 1 PCa 帳壁の支持方法と変形追従機構

ファスナーはパネル内部に一部を埋め込んで取り付けられる埋込金物、予め梁などの鉄骨に溶接で取り付けられる鉄骨先付け金物、現場で取り付けられる取付金物の 3 種類で構成される。鉄骨先付け金物には鉄骨梁との間で位置調整を行うためにブラケットと称する金物を用いる場合がある。振れ止めの埋込金物はアンカーボルトとパネル内に埋め込まれた金物からなり、アンカーボルトのねじ部が室内側に突出する状態でパネルに取り付けられる。取付アングルの一辺にはアンカーボルトを接合するためのスロット孔が設けられており、もう一辺には、ブラケットと接合するためのスロット孔が設けられる。

3.PCa 帳壁の層間変形追従に関する既往の実験

PCa 帳壁の変形追従性能を検証した既往の実験を表 1 に示す。いずれも日本建築学会大会学術講演梗

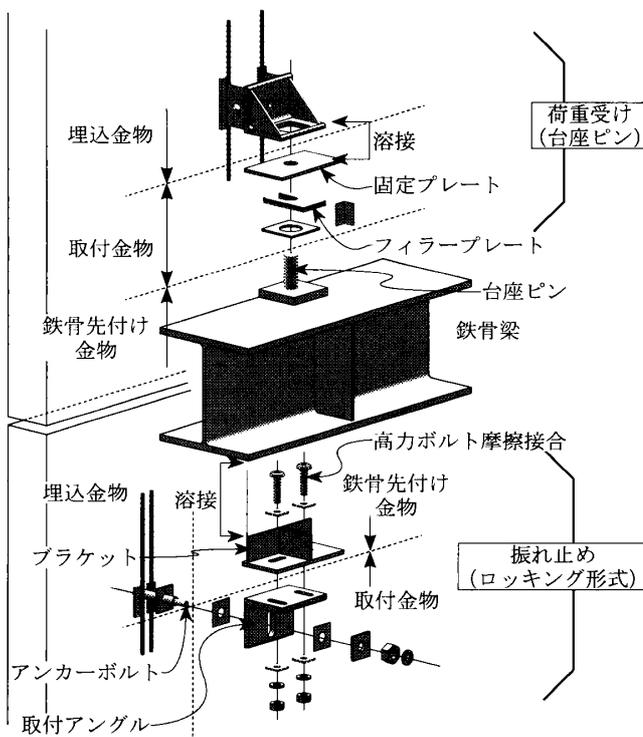


図 2 PCa 帳壁のファスナーの一例

Previous experimental studies and considerations on allowable story drift for PCa curtain-wall

HEGURI Tatsushi, SUITA Keiichiro, SASAKI Tetsuya, YAMADA kenji, INUKAI masatoshi

概集に発表されたもので1970～2006年に7件の研究が報告されている。これらの実験の多くは、高層建物の2次設計に対応する層間変形角1/100までの変形追従性能を確認している。文献1～4, 6は1/100～1/137の範囲でファスナーの層間変形追従性能を確認している。クリアランスの限界を超える実験は文献5), 7)で行われており、文献5)は1/40まで載荷を行い、荷重受け周辺でのパネルにひび割れを確認しているが、ファスナーでの損傷は報告されていない。文献7)では1/50で帳壁のコンクリートの破壊が確認されている。下部ファスナーが部分破壊に至るまで載荷された振動台実験⁴⁾もあるが、パネルの損傷は見られていない。載荷方向の違いによる変形追従性能を比較した実験²⁾では、パネル構面内方向が構面外方向に比べて高い変形追従性能を持つことが示されている。これらの研究から層間変形角1/40までは脱落は生じないものと考えられる。

4. 層間変形追従性能に関する性能基準

パネルの耐震性能はパネルの強度と変形追従性能によって評価される。評価基準にはプレコンシステム協会(PCSA)によるPCa帳壁に関する基準⁸⁾と、カーテンウォール・防火開口部協会(CFWA)による帳壁一般に関する基準⁹⁾の2種類があり、図3にそれらをまとめて示す。PCSAではパネルの脱落が生じない限界の設計条件を層間変形角1/100に設定しているが、CFWAでは最も変形追従性能の高いグレード4に対して層間変形角1/100を設定し、低いグレードにはこれより小さい性能を設定している。

5. 層間変形角と変形追従限界の関係

5.1 ロッキング形式

ロッキング形式で取り付けられたPCa帳壁に層間変位 Δ が生じた状態を図4に示す。点線はパネルの初期の位置を表し、実線は図中の●を中心にパネルが回転して変形追従の限界に達した状態を表してい

表1 既往のPCa帳壁実験

年代 文献	試験体 取付け構法	載荷方法 パネル寸法 (mm) 幅×高さ×厚さ-枚数	最大 層間 変形角	内容・結果
1970 文献1	実大鉄骨骨組(2層) +コンクリートスラブ 上部:スウェイ形式 下部:特殊ボルト形式	漸増振幅繰返し 3000×3500×500-4枚 (上下2段左右2枚 内1枚にガラスを嵌込み)	1/110	層間変位の大部分を上部ファスナーの水平変位と水平目地間のズレで追従。PCaパネルのせん断変形、下部ファスナーの水平変位回転は少ない。
1976 文献2	試験用鉄骨骨組(1層分) 上部:スウェイ形式 下部:特殊ボルト形式	定振幅繰返し 面内:2500×3400×130-4枚 (上下2段左右2枚) 面外:2500×3400×130-1枚 シーリング材の有無,各方向各1体	1/100	(面内) ルーズホール→ゴムパッキン→曲げプレート回転の順で変形吸収が行われる事を確認。最大水平荷重6t。 (面外) 変形吸収は上下ファスナーで行われ、荷重変形関係の線形性を確認。
1977 文献3	試験用フレーム(1層分) 仮想スラブを設置 構面A スウェイ形式 構面B ロッキング形式 下部:ダボ形式	定振幅繰返し 構面A:(構面方向) 2130×3475×650-1枚 構面B:(構面直交方向) 730×3475×650-1枚	1/100	構面方向はスウェイ形式、構面直交方向は面外回転で変位追従。PCaパネル損傷なし。 パネル目地間の隙間の変化による層間変位追従を確認。
1979 文献4	試験用鉄骨骨組(1層分) 上部:スウェイ形式 下部:特殊ボルト形式	漸増振幅繰返し 2480×4900×150-1枚 単調 2480×4900×150-1枚	1/111	(振動実験)1000～1200galの正弦波加振で両下部ファスナーが部分破壊。 (静加力実験)層間変位10mmでファスナーがすべり、それ以降は線形的な挙動を示す。パネルには損傷なし。
1986 文献5	実大6層鉄骨造建物(3層分) 上部:ロッキング形式 下部:特殊ボルト形式	漸増振幅繰返し 2～4階の3層に各層2枚-6枚 3380×2500×150-6枚	1/40	1/90でパネルにひび割れがみられ、ファスナーには損傷なし。
1989 文献6	実大鉄骨骨組(2層) 腰壁:固定形式 柱型:ロッキング形式	単調 構造体全体6200×8100 柱型:1100×3800-2枚 腰壁:4000×1850-6枚	1/137	ガラスの破損なし。ガラスとサッシの間はスウェイ及びロッキングにより層間変形を吸収することを確認。
2006 文献7	試験用フレーム(1層分) 上部:スウェイ形式 下部: Aタイプ 金物埋込形式 Bタイプ ダボ形式	単調 Aタイプ: 2395×4593×120-1枚 Bタイプ: 2245×5095×120-1枚	1/100	1/200:ルーズホールとボルトが接触。 (Aタイプ)1/100で最大耐力となり、コンクリート部の掻き出し破壊。 (Bタイプ)1/50まで最大耐力に至らず、コーン状破壊。

る。層間変形角 R は Δ , h とパネル回転角 θ を用いて次式で表される。

$$R = \frac{\Delta}{H} = \frac{h}{H} \theta \quad \left(\theta = \frac{\delta}{w} = \frac{\Delta}{h} \right) \quad (1)$$

$\delta = \delta_1$ のときに変形追従限界に達し、そのときの層間変位 Δ_{limit} は次式となる。

$$\Delta_{limit} = \frac{\delta_1}{w} h \quad (2)$$

また、このとき層間変形角 R_{limit} は次式となる。

$$R_{limit} = \frac{h}{H} \cdot \frac{\delta_1}{w} \quad (3)$$

施工誤差が 0 の場合、施工誤差吸収のためのクリアランス δ_2 も変形追従機能を持つので δ_1 に加えられる。

$$R_{limit} = \frac{h}{H} \cdot \frac{\delta_1 + \delta_2}{w} \quad (4)$$

5.2 スウェイ形式

図 5 にスウェイ形式で取り付けられた PCa 帳壁に層間変位 Δ が生じた状態を示す。点線はパネルの初期のパネル位置を表し、実線はスウェイによる限界を超えて施工誤差吸収用のクリアランスの範囲内でロックした状態を示す。 Δ の大きさが δ_{h1} 以下では取付アングルのスロット孔で変形追従するため、パネルは移動しない。スウェイによる追従限界 R_{limit} は δ_{h1} と H を用いて (5) 式で表される。

$$R_{limit} = \frac{\delta_{h1}}{H} \quad (5)$$

さらに $\Delta > \delta_{h1}$ では、図 5 に点線で示すように右側の荷重受けの ● の位置を中心としてパネルが回転する。施工誤差が 0 の場合、 δ_{h2} も変形追従として機能し、さらに δ_{v2} だけロックを伴うことから限界の層間変形角は (6) 式となる。

$$R_{limit} = \frac{\delta_{h1} + \delta_{h2}}{H} + \frac{h}{H} \cdot \frac{\delta_{v2}}{w} \quad (6)$$

5.3 パネルの回転による目地幅の縮み

ロックによりパネルが回転すると、パネル間の目地幅が縮まりパネル同士の接触が生じる。図 6 に示すように各パネルが右側の荷重受けの ● の位置を中心に回転した状態を考える。点線はパネルの初期位置、実線はパネルが回転した状態を示している。パネル回転角 θ と目地幅の縮み Δw_j , Δh_j の関係は次式で表される。

$$\cos_w \theta = \frac{w_1 + (w_j - \Delta w_j) + w_2}{w_1 + w_j + w_2} = \frac{w_p + w_j - \Delta w_j}{w_p + w_j} \quad (7)$$

$$\cos_h \theta = \frac{h_1 + (h_j - \Delta h_j) + h_2}{h_1 + h_j + h_2} = \frac{H - \Delta h_j}{H} \quad (8)$$

目地に取り付けられるガスケットやシーリングの影響を無視すると、 $\Delta w_j = w_j$ または $\Delta h_j = h_j$ のときにパネルが衝突するので、目地の衝突で決まる限界の

- 記号 H : 階高 R : 層間変形角 θ : パネル回転角
 w : 左右ファスナー間距離 h : 上下ファスナー間距離
 【ロック形式】
 δ_1 : 変位追従のためのクリアランス
 δ_2 : 施工誤差吸収のためのクリアランス
 【スウェイ形式】
 δ_{h1} : 水平方向の変位追従のためのクリアランス
 δ_{h2} : 水平方向の施工誤差吸収のためのクリアランス
 δ_{v2} : 鉛直方向の施工誤差吸収のためのクリアランス

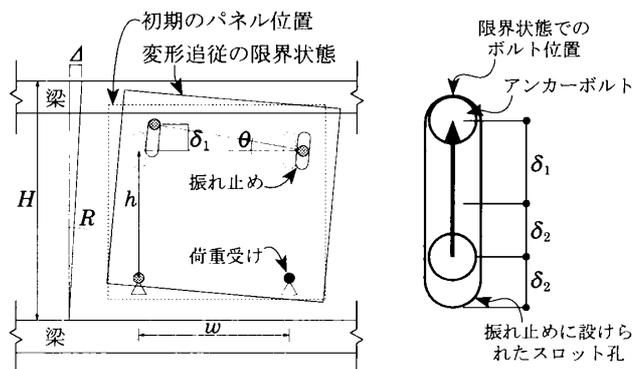


図 4 ロック形式の限界状態

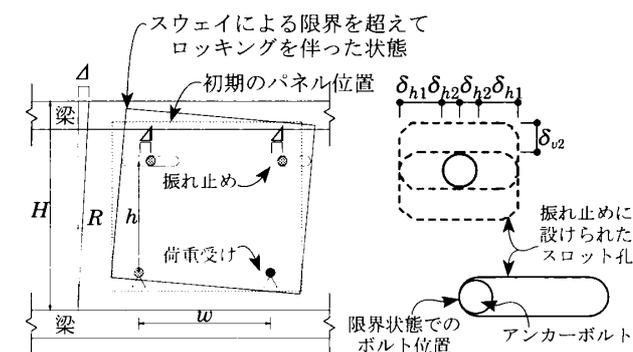


図 5 スウェイ形式の限界状態

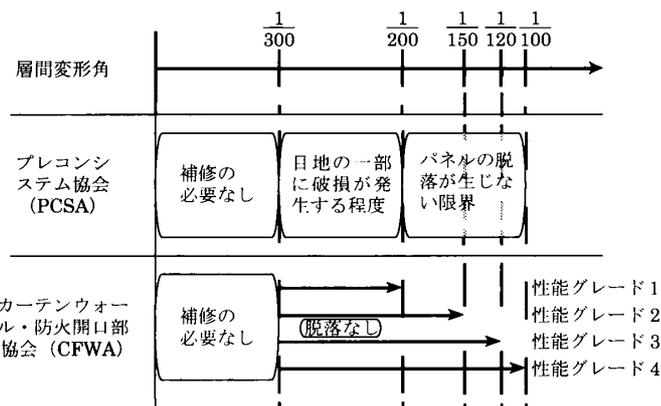


図 3 帳壁の層間変形角に関する性能基準

パネル回転角 $w\theta_{limit}$, $h\theta_{limit}$ は次式で表される.

$$\cos w\theta_{limit} = \frac{w_p}{w_p + w_j} \quad (9)$$

$$\cos h\theta_{limit} = \frac{H - h_j}{H} \quad (10)$$

幅方向と高さ方向の目地幅は一般的に同じ寸法を採るが, パネル衝突の回転角は同一とはならない. いずれかの目地で先に衝突が生じたときのパネル回転角を $j\theta_{limit}$ とすると, その大きさは次式で得られる.

$$\frac{w_p}{w_p + w_j} \geq \frac{H - h_j}{H} \quad \text{のとき} \quad j\theta_{limit} = w\theta_{limit} \quad (11)$$

$$\frac{w_p}{w_p + w_j} \leq \frac{H - h_j}{H} \quad \text{のとき} \quad j\theta_{limit} = h\theta_{limit} \quad (12)$$

また $j\theta_{limit}$ に対応する層間変形角 jR_{limit} は次式となる.

$$jR_{limit} = \frac{h}{H} j\theta_{limit} \quad (13)$$

6. 変形追従限界の計算例

5章の層間変形角と追従限界の関係と, 表2の数値を用いて変形追従の限界の例を示す.

H : 階高
 h_p : パネル高さ
 w_p : パネル幅
 h_j : 鉛直方向目地幅
 w_j : 水平方向目地幅
 Δw_j : 水平方向方向の目地の縮み
 Δh_j : 鉛直方向の目地の縮み

パネルの回転中心となる右側の荷重受けからの距離
 h_1 : パネル下端からの距離
 h_2 : パネル上端からの距離
 w_1 : パネル右端からの距離
 w_2 : パネル左端からの距離

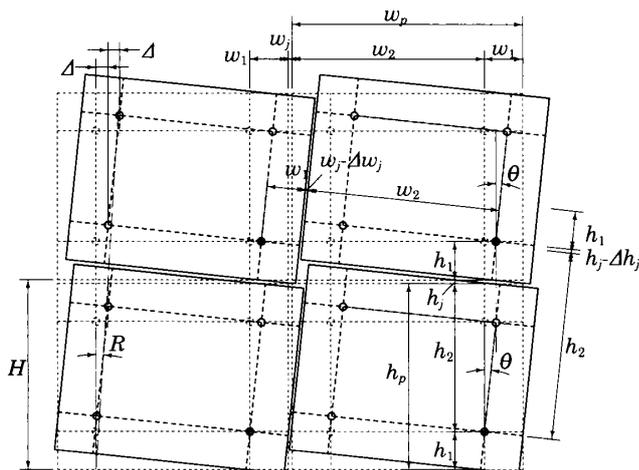


図6 パネル回転と目地幅の関係

表2 計算例のパネル諸寸法 (mm)

H	3725	h	2500	δ_1, δ_{h1}	15
h_p	3700	w	2000	δ_2, δ_{v2}	20
w_p	3000	h_j, w_j	25	δ_{h2}	20

※1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程
 ※2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工)
 ※3 プレコンシステム協会

Graduated Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ.
 Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.
 Member of Precast Concrete System Association.

(1) ロッキング形式

(3) 式より正味の追従限界, (4) 式より施工誤差を0としたときの rR_{limit} は次の値となる.

$$\text{(正味)} \quad rR_{limit} = 0.00503 \text{ rad}$$

$$\text{(施工誤差 0)} \quad rR_{limit} = 0.0117 \text{ rad}$$

(2) スウェイ形式

(5) 式より正味の追従限界, (6) 式より施工誤差を0としたときの sR_{limit} は次の値となる.

$$\text{(正味)} \quad sR_{limit} = 0.00403 \text{ rad}$$

$$\text{(施工誤差 0)} \quad sR_{limit} = 0.0161 \text{ rad}$$

(3) 目地の衝突

(9) ~ (12) 式より $j\theta_{limit}$ は次のようになり, 高さ方向の目地の衝突で限界が決まる.

$$j\theta_{limit} = \min \{ w\theta_{limit}, h\theta_{limit} \} = h\theta_{limit} = 0.116 \text{ rad}$$

またそのときの jR_{limit} は次の値となる.

$$jR_{limit} = 0.0779 \text{ rad}$$

7. まとめ

- (1) PCa 帳壁の層間変形追従性能に関する既往の実験的研究と各種ファスナーの特性をまとめた.
- (2) 幾何学的関係から変形追従の限界となる層間変形角の算定法を示した.

参考文献

- 1) 相川新一, 仁平久信, 木村敬三, 遠山幸三, 寺内伸, 小林美雄: 世界貿易センタービルで計画されたPCカーテンウォールの実大実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造系, pp.125~126, 1970.9
- 2) 二階盛, 亀田泰弘, 安部一郎, 小林美雄, 畑野肇, 大川潤: PCカーテンウォール取付け金具の実験的研究(その1) スライドファスナーの性能実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 構造系, pp.317~318, 1976.10
- 3) 松本洋一, 松本信二, 千葉春海: PCカーテンウォールの耐震性に関する検討(その2) 実大PCパネルを用いた振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 材料・施工・防火, pp.489~490, 1977.10
- 4) 松崎育弘, 阿部保彦, 宇佐見滋: PCカーテンウォールの耐振性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造系, pp.1453~1454, 1979.9
- 5) 諸橋滋巳, 木下日出男, 伊藤弘, 西田和生, 坂本功: 日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造) 57- 鉄骨造実大6層建物による非構造部材の耐震実験(その8, PCパネル), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), A, 材料・施工, pp.313~314, 1986.8
- 6) 嶋田聖二, 松谷輝雄, 松村耕四郎, 岩崎昭男: PCカーテンウォールのオープンジョイントに関する開発実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), A, 材料・施工, pp.101~102, 1989.10
- 7) 岩田弦, 加藤泰夫, 内田和弘, 元宗照良, 佐々木仁, 奥泉輝夫: PCカーテンウォールの薄型化に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), C-2, 構造IV, pp.879~880, 2000.9
- 8) PCSA プレコンシステム協会技術部会: プレキャストカーテンウォール計算例暫定版, p.1, 2009.6
- 9) カーテンウォール・防火開口部協会: カーテンウォール性能基準 2003, pp.9~14, 2003.12