

アンボンドPC圧着プレキャストコンクリート造実大2層骨組の施工実験及び水平載荷実験 (その7 モデル建物の試設計と水平載荷実験における損傷限界に関する考察)

三井住友建設(株) 正会員 ○新上 浩
 (株)熊谷組 前川 利雄
 安藤建設(株) 正会員 田畑 卓
 (株)大林組 杉本 訓祥

1. はじめに

本報では、(その6)で報告したアンボンドプレストレス圧着接合架構の復元力特性評価手法を用いた限界耐力計算によるモデル建物の試設計結果、および(その5)で報告した水平載荷実験における、主に梁-柱圧着接合部に着目した架構の損傷限界に関する考察結果について報告する。

2. 試設計概要

2.1 建物概要と解析仮定

モデル建物は、第2種地盤に建つ地上12階建ての事務所ビルを想定した、柱、梁部材を高強度コンクリートによるプレキャスト部材としPC鋼棒を用いたアンボンドプレストレス圧着接合架構である。略伏図、軸組図を図-1、図-2に示す。本報では建物長辺方向の結果についてのみ示す。

試設計は限界耐力計算により行った。梁-柱、柱-柱圧着接合部の非線形復元力特性を考慮した非線形静的漸増載荷解析結果より構造特性曲線(Sa-Sd曲線)を求め、要求スペクトルとの照査により耐震性能を検証した。

解析では、スラブの協力効果は無視し、柱梁接合部は剛とし、フェース位置に後述の非線形特性を有する材端弾塑性バネを設けた。地震荷重は、各階重量を9.8kN/m²とし、外力分布をAi分布として、剛床を仮定した各階に考慮した。

略伏図中のダンパー設置スパンには、文献1に示すような履歴型制震デバイスを設置している。制震デバイスによる地震エネルギー吸収効果は、解析から求めた変形量と建物のポテンシャルエネルギーから導いた等価粘性減衰定数より加速度低減率を求め、安全限界要求スペクトルを算出することによって評価した。ただし損傷限界要求スペクトルには、制震デバイスの効果は考慮しないものとした。

2.2 アンボンド圧着接合部材の復元力特性

部材の曲げ復元力特性は、文献2での検討結果を踏まえ、以下のように設定した。すなわち、圧着端部曲げモーメントM_iは

$$M_i = \frac{(P_e + N) \cdot D}{2} \left(1 - \frac{\eta_o + \eta_e}{\alpha} \right) \quad (1)$$

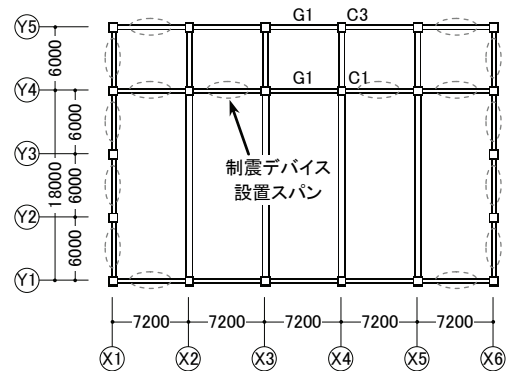


図-1 略伏図

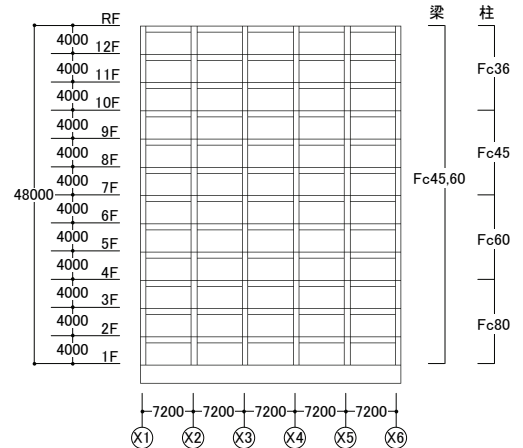


図-2 Y1通り柱梁軸組図

表-1 特性点の定義

部材の状態	コンクリート	圧着接合用PC鋼材
I 軟化開始時	離間開始 または断面の圧縮応力度分布を三角形と仮定した圧縮縁の応力度が弾性限界に達した時	導入緊張力
II 圧縮強度時	断面の圧縮応力度分布を矩形と仮定した圧縮縁コンクリートが終局状態に達した時	導入緊張力
III 鋼材降伏時	断面の圧縮応力度分布を矩形と仮定した圧縮縁コンクリートが終局状態を維持	降伏応力

- ここに、
 P_e : 圧着接合PC鋼材の有効プレストレス力 ($=0.7P_y$)
 P_y : PC鋼材の降伏荷重 (0.2%永久伸びに対する荷重)
 N : 部材軸力 (梁-柱圧着接合部の場合, $N=0$)
 η_o : 軸力比 ($=N/BD\sigma_B$)
 η_e : 有効プレストレス力比 ($=P_e/BD\sigma_B$)
 B, D : 部材幅, 部材せい
 α : コンクリートの損傷程度を表す係数
 i : 部材の状態 ($=I_a, I_b, II, III$)

とし、表-1に示す部材の状態によって定まる α の値に対応する復元力中の特性点 M_I, M_{II} を図-3のように規定する。ただし図-3(1)における M_{III} は、梁-柱圧着接合用のPC鋼材の降伏時モーメントであり、(1)式中の P_e を P_y, η_e を η_y と読み替えるものとする。またその時の変形角 R_{III} は、(2)式により算出した。

$$R_{III} = \frac{\Delta \epsilon_{PC}}{0.5D - x_n} \cdot \frac{L_{PC}}{2} + \frac{M_{III}}{3E_C I / a} \quad (2)$$

- ここに、
 $\Delta \epsilon_{PC}$: PC鋼材の伸びによる歪み増分 ($=\epsilon_y - \epsilon_e$)
 L_{PC} : 圧着接合用PC鋼材の定着端間長さ
 x_n : 圧縮縁から中立軸までの距離 ($=P_e/0.85\sigma_B\beta B$)
 E_C, I : コンクリートのヤング係数, 断面2次モーメント
 a : せん断スパン

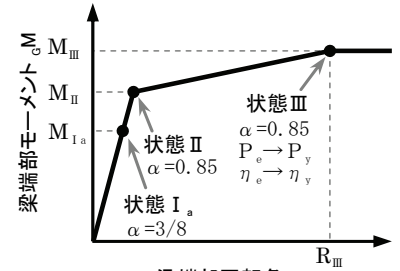
谷, 西山の実験結果³⁾によると、PC圧着柱の曲げ耐力はACIコンクリート応力ブロックを用いて算出される終局耐力とよく対応する結果となっているが、状態IIの柱端部曲げモーメント M_{II} はそれよりも低い値となる。本試設計では、高軸力を受ける柱の設計が安全側となるように配慮し、安全限界検証時に柱端部のモーメントが M_{II} に達していないことを確認するものとした。このときの変形角 R_{II} は、前報(その6)の(7)式に示されるヒンジ領域を仮定する手法³⁾により求めた。

2.3 設計クライテリア

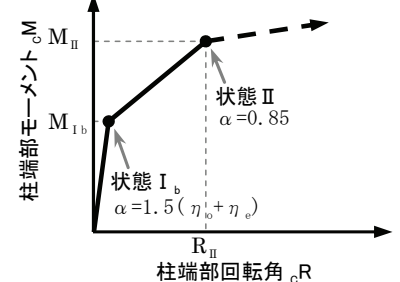
設計クライテリアは表-2に示す2種類を設定した。限界状態設定例-1では、損傷限界検証時の梁-柱圧着接合部の状態をI以下とし、安全限界検証時の最大層間変形角 R_{max} を1/100以下とした。一方、限界状態設定例-2では、前者を状態II以下とし、後者を1/50以下とした。

2.4 試設計結果

静的増分解析の結果を図-4に、断面算定結果を表-3に示す。図中には代表的なイベントも併せて示す。損傷限界時に梁-柱圧着接合部に状態Iを許容しないクライテリアを採用した設定例-1では、鋼材量、断面寸法が増加し、それに伴い建物剛性が大きくなり設計用地震外力が大きくなるという傾向があるのに対して、設定例-2では、比較的しなやかな架構により地震外力が低く抑えられている。ただし安全限界検証時の最大層間変形角 R_{max} は、概ね $R_{max}=1/50$ 程度となり、既往の一般的な地震時変形クライテリアは満足してないため、非構造部材



(1) 梁-柱圧着接合部



(2) 柱-柱圧着接合部

図-3 部材の復元力特性

表-2 各設計例の設計クライテリア

		限界状態設定例-1	限界状態設定例-2
損傷限界	梁-柱圧着接合部	状態I以下	状態II以下
	柱-柱圧着接合部	状態I以下	状態I以下
	最大層間変形角	1/200以下	1/200以下
	その他部材応力	短期許容応力以下	短期許容応力以下
安全限界	梁-柱圧着接合部	PC鋼材が破断しない(降伏は許容)	PC鋼材が破断しない(降伏は許容)
	柱-柱圧着接合部	状態II以下	状態II以下
	最大層間変形角	1/100以下	1/50以下
	その他部材応力	終局強度以下	終局強度以下

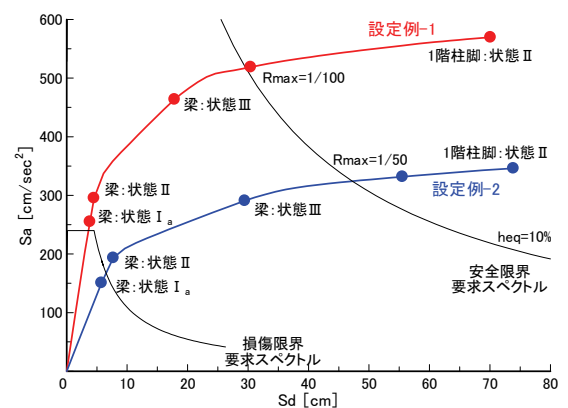


図-4 構造特性曲線

の変形追従性などの問題を考えておく必要があると思われる。なお、梁-柱圧着接合用 PC 鋼材の破断する層間変形角は、鋼材の歪み増分を 3% と安全側に仮定しても、 $R=1/20$ 以上となる。

以上の結果より、部材断面や鋼材量は設計クライテリア、とりわけ梁-柱圧着接合部の損傷限界の設定に大きく依存し、損傷限界を適切に評価することが、本工法の実用化、普及にとって重要であることがわかった。よって以降において、今回実施した水平載荷実験をもとに損傷限界の評価について検討を行う。

3. 水平載荷実験における架構の損傷限界

一般に損傷限界とは、外乱の作用後も構造物の安全性や使用性および耐久性が低下せず、そのため補修を必要としない限界⁴⁾である。本実験での損傷限界は、安全性の観点からは載荷後に部材の耐力が低下しない限界、使用性や耐久性の観点からは過大な残留ひび割れや残留変形が生じない限界であると考えられる。

そこで本章では、2階梁-柱圧着接合部のコンクリートの損傷、PC鋼材の残存張力および架構の残留変形の観点から損傷限界について検討する。

3. 1 コンクリートの損傷

本実験では、コンクリートの損傷度を確認するために、図-5に示す材料試験結果を考慮した予備解析により梁-柱圧着接合部がそれぞれの状態に達する荷重・変形角を求め、載荷時にこれらの荷重・変形角近傍において、入念に目視観察を行った。その結果、梁-柱圧着接合部が状態 I や状態 II に到達していると予測される荷重・変形角近傍 (実験 VI-2 : $R=1/800\text{rad}$, 実験 VI-3 : $R=1/400\text{rad}$) においては、圧着接合用の目地モルタル部の微細な目開きを除き、構造部材には損傷が全く見られなかった。また目地モルタル部の微細な目開きも、除荷時には完全に閉じていた。なお写真-1に示すように、状態 III を超える荷重・変形角 ($R=1/67\text{rad}$) では、全ての 2 階梁、1 階柱脚に軽微な圧壊が確認された。



(1) 2階梁端部 (2) 1階柱脚部
写真-1 $R=1/67\text{rad}$ 時における圧着接合部の状況

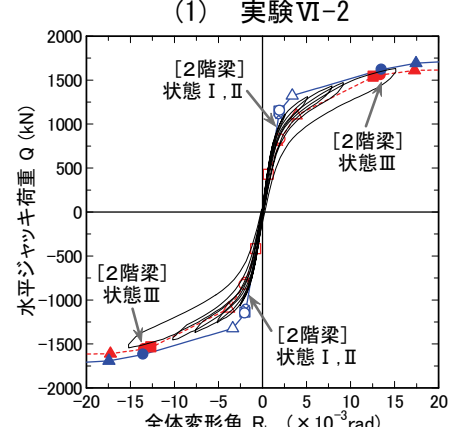
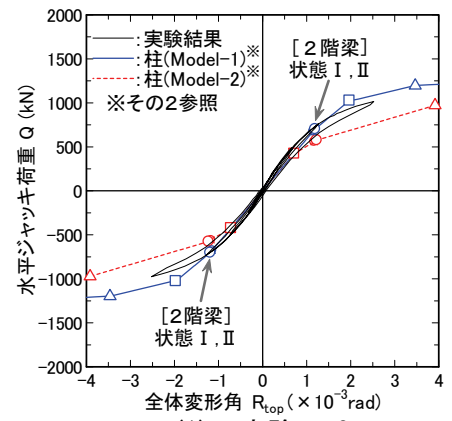
表-3 断面算定結果

(1) 限界状態設定例-1

梁部材断面				柱部材断面			
階	Fc [N/mm ²]	B×D [mm]	圧着接合用 PC鋼材	階	Fc [N/mm ²]	B×D [mm]	圧着接合用 PC鋼材
							C1 C2 C3
R		900×900 (端部)	4-32φ	12			
12		450×900 (中央部)	6-32φ	11	36	1000×1000	8-36φ 8-36φ
11			6-36φ	10			
10			6-36φ	9			
9				8	45		
8	60	1000×1000 (端部)	6-40φ	7			10-40φ
7				6			10-36φ
6		500×1000 (中央部)	8-40φ	5	60		
5				4			
4				3			12-40φ
3				2	80		
2				1		1200×1200	12-40φ 16-40φ 16-40φ

(2) 限界状態設定例-2

梁部材断面				柱部材断面			
階	Fc [N/mm ²]	B×D [mm]	圧着接合用 PC鋼材	階	Fc [N/mm ²]	B×D [mm]	圧着接合用 PC鋼材
							C1 C2 C3
R		600×800 (端部)	4-32φ	12			
12		400×800 (中央部)	4-36φ	11	36	800×800	4-36φ 6-36φ
11				10			8-36φ
10			6-36φ	9			
9				8	45		10-36φ
8	45	800×800 (端部)	8-36φ	7			8-36φ
7				6			
6		400×800 (中央部)	8-36φ	5	60		12-36φ
5				4			
4				3			
3				2	80		
2				1		1000×1000	8-40φ 16-40φ 16-40φ



	凡例	第1折点		第2折点	
		凡例	状態	凡例	状態
1階柱脚	Model I-1	□	I _b	■	II
	Model I-2		II		III
2階梁端		○	II	●	III
		(⊗)	I _a		
R階梁端		△	II	▲	III

図-5 予備解析結果と実験結果

3. 2 PC鋼材の張力

2階梁-柱圧着接合部のPC鋼材の張力の推移を図-6に示す。図は、横軸に経験した最大変形角 eR_{max} 、縦軸にピーク時および除荷時における4本のPC鋼材の張力の平均値 P_{ave} をとって示した。ピーク時の張力は、変形角の増大とともに徐々に増加し、 $R=1/67rad$ までに鋼材が降伏した。除荷時の残存張力は、状態Ⅱを超える $R=1/200rad$ までは荷重開始時張力を保持し、それ以降の変形で徐々に低下し、PC鋼材の降伏後には急激に低下した。

3. 3 架構の残留変形

実験VI-2, VI-3での経験した最大変形角 eR_{max} に対する除荷時の残留変形角 R_r を図-7に示す。両実験シリーズともにほとんど残留変形は生じず、実験VI-3における状態Ⅲを超える変形角 ($R=1/67rad$) においても、残留変形角は最大 $R_r=1/4000rad$ 程度である。

4. まとめ

モデル建物の試設計および水平荷重実験における損傷限界の評価を通して以下のことがわかった。

- (1) 部材断面や鋼材量は設計クライテリア、とりわけ梁-柱圧着接合部の損傷限界の設定に大きく依存し、損傷限界を適切に評価することが重要である。
- (2) 本実験において、コンクリートの損傷に着目した場合、状態Ⅱを超える状態を損傷限界とすることは危険側となる可能性があるものの、状態Ⅱは損傷限界としてほぼ許容できる。
- (3) PC鋼材の残存張力に着目した場合、状態Ⅱを超える $R=1/133rad$ 以降に張力の減退が生じ、使用性に支障をきたす可能性がある。
- (4) 原点への復帰性に着目した場合、損傷限界として状態Ⅲ程度まで許容できる。
- (5) ただし今回の実験は、圧着接合部軸力比 η_e が比較的小さいため状態Ⅰと状態Ⅱにあまり差異がなく、また繰り返し荷重を行わなかった等の条件の下での結果である。今後は高緊張力、高軸力および繰り返し荷重等のコンクリートの損傷に影響を与える要因の大きい条件下での実験データの蓄積が必要である。

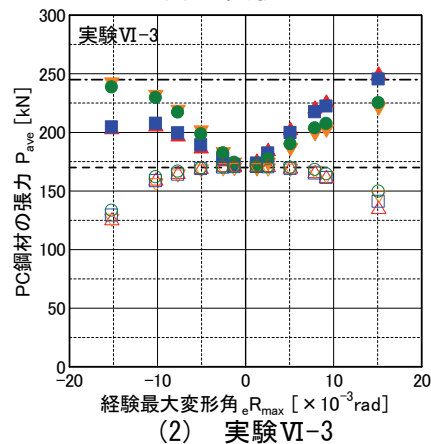
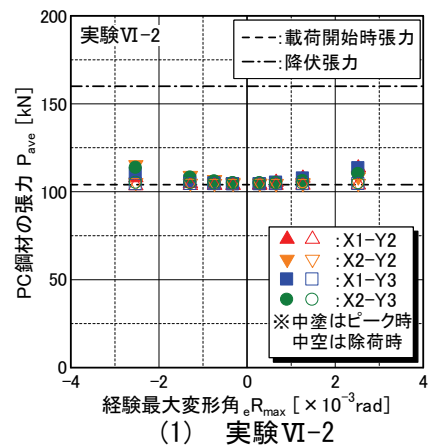


図-6 PC鋼材の張力の推移

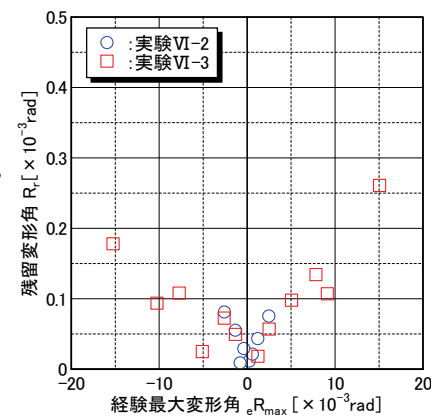


図-7 架構の残留変形角

参考文献

- 1) 楠原文雄, 塩原等, 岡村喜吉, 石岡拓: 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に関する研究 (その6 履歴型制震デバイスの開発), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 661-662, 2008. 09
- 2) 杉本訓祥, 西山峰広, 永井寛, 高津比呂人: 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に関する研究 (その8 アンボンドプレストレストコンクリート部材の復元力特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 665-666, 2008. 09
- 3) 谷昌典, 西山峰広: プレキャストプレストレストコンクリート圧着柱の曲げせん断性状と変形性能, 日本建築学会構造系論文集, No. 623, pp. 103-110, 2008. 01
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課ほか: 2001年版限界耐力計算法の計算例とその解説, 2001. 03