

(45) プレストレスによる壁体のコンクリートのひび割れ制御

清水建設(株) 技術研究所 正会員 藤井忠義

1. はじめに

コンクリートのひび割れはコンクリートの宿命的な欠点でその防止のため1) 単位水量の低減、2) セメント量の低減、3) 無収縮又は膨張性のセメントや混和材の使用、4) 鉄筋又はメッシュ筋によるひび割れの拘束と分散等各種の方法が試みられている。しかしコンクリートのひび割れを完全に防止することは不可能であり、現在は誘発目地を設けてその位置にひび割れを集中させる方法が多く使用されている。プレストレスによるひび割れの制御は興味深い方法で、昨年度の大会でも「プレストレスによるコンクリート壁のひび割れ制御」と題して発表を行ったが、昨年度の発表とは異なる建物の大壁のコンクリートのひび割れ制御にプレストレスを導入した工事例と、その際のコンクリートのひずみ(応力)挙動、ひび割れ挙動について計測した結果を報告する。

2. 目的

コンクリート壁のひび割れ制御を目的にプレストレスを導入した例は過去に少なく、プレストレスによるコンクリートのひび割れ制御の効果を定量的に実際の構造物で把握した例も少ない。このため緊張前に壁のコンクリートにワイヤーストレインゲージを貼付して緊張時のコンクリートひずみを計測することで、壁に導入されたプレストレスを測定し、また緊張前後のひび割れを測定してプレストレスによる壁のコンクリートのひび割れ制御の効果を明確にした。計測結果は今後、壁のコンクリートのひび割れ防止にプレストレスを適用する際の有効な判断資料となる。

3. 建物概要

- 用途 工場
- 構造 SRC造(長辺壁:PC造)5階建
- 規模 長辺方向 40.5m (12+8.25+8.25+12m)  
短辺方向 23.55m (6.75+6+6.75+4.05m)  
階高 21.45m (屋根頂部まで27.6m)

建物の全景を写真-1に、建物の平面図を図-1に示す。又、プレストレスを導入した長辺方向の壁(Y1通りとY5通りの2面)のうちY1通り軸組図を図-2に示す。

壁は全面にわたって厚さ20cmで、窓開口が28箇所、出入口が5箇所の計33箇所ある。柱は70x70cmでスパン12mを4等分する形で間柱(60x30~40cm)がある。梁は40x70cmである。壁の配筋はダブル配筋で縦、横筋共にD13-20cmピッチである。

4. PC工事概要

壁の壁厚の中心位置にアンボンドストランドを配置した。Y1通りのストランド配置を図-3に示す。使用ケーブル本数は74本(X9通り側で緊張したものの47本、X5通り側で緊張したものの24本、X6~X8間でX6通り側で緊張したものの3本)で壁の全断面に対して計算上の平均圧縮応力約20.0kg/cm<sup>2</sup>を導入した。配置はすべて水平方向でストランド間隔は平均で47.7cmで、プレストレスの均等化を図るため壁だけでなく梁中にも配置した。

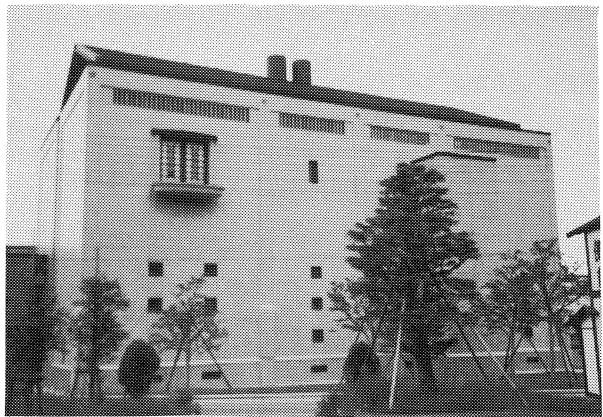


写真-1 建物全景

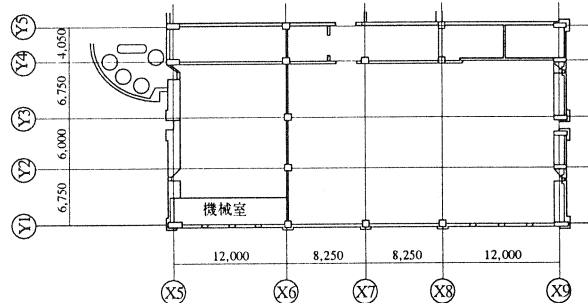


図-1 平面図(2階)

水平方向に窓開口（開口90x90cm及び90x180cm）がある所ではストランドは窓開口の上下縁から15cmの位置に2本配置した。

1) 使用PC鋼材

- シーストランド SWPR7A
- φ15.2mm 7本より
- シース径 18.7φmm
- PC鋼材 断面積 138.7mm<sup>2</sup>
- 引張強度 24.5t
- 降伏強度 20.8t
- 端部緊張力 18.0t
- 固定端緊張力 16.5t
- (λ=0.002)

2) 緊張工法

- アンボンドモノストランド工法
- 片引き緊張：伸び管理
- 定着具 固定端 アンカープレート+圧着グリッパ
- 緊張端 キャスティング+楔

3) コンクリート

- 設計基準強度 240kg/cm<sup>2</sup>
- 緊張時 200kg/cm<sup>2</sup>以上
- 流動コンクリート
- スランプ 15cm→21cm

5. 計測

5. 1 計測目的

プレストレスの導入により壁のコンクリートのひび割れ制御効果がどの位あるかを把握する目的で以下の項目を測定する。

- 1) 壁体のコンクリートのひずみ
  - (1) プレストレスの有無の比較
  - (2) 壁、梁の比較
  - (3) 開口のコーナー部45°方向
- 2) 壁のコンクリートのひび割れ
  - (1) プレストレス導入前後
  - (2) 竣工直前及び竣工3月後

5. 2 計測位置

計測位置はプレストレスが導入される壁面（長辺方向）のうちY1通りで図-4にゲージ位置を示す。

Y1通りの測定位置は壁の両端部及びその中央の3点を一組として7

箇所、窓開口のコーナーから45度方向に窓の補剛枠から5cm離れた位置6点、及び5階梁と屋上パラベットの中央部各1点の29点で、他にダミーゲージとして1階柱の軸方向に1点の計30点を測定した。

測定位置は各階の梁と壁位置で、窓開口ではコーナー部の45度方向と直行方向で測定した。

ただし窓は周囲を幅20~25cmのコンクリート補剛枠で補強されている。

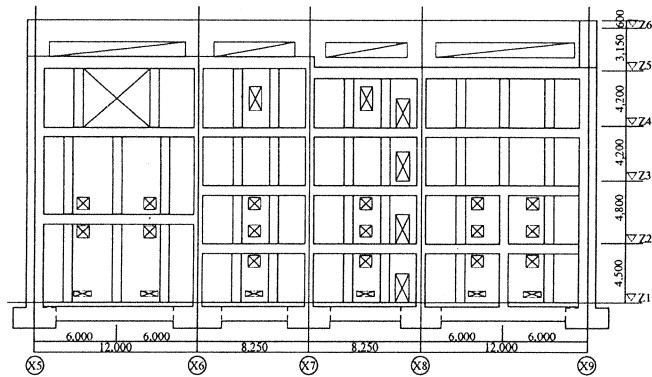


図-2 Y1通り軸組図

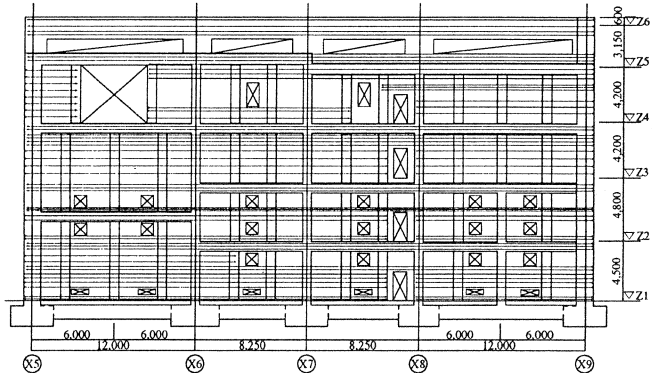


図-3 ストランド配置図

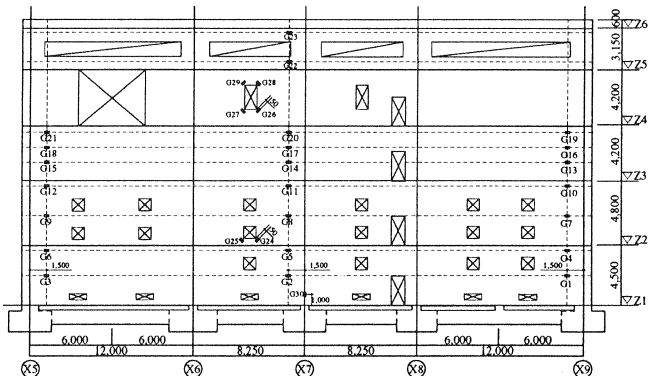


図-4 ゲージ位置図

5. 3 計測方法

コンクリートのひずみの測定のためにワイヤーストレインゲージPL-30を壁、梁位置に貼付した。貼付位置は全て外壁面(壁厚20cm)で梁位置では梁せいの中央位置の外壁とした。写真-2、3に壁、窓コーナー部のゲージ取付け状況を示す。

測定はスイッチボックスASW50Cを介し、ストレインメータTDS601(共に東京測器製)で測定した。

5. 4 計測時期

計測時期は緊張の直前にワイヤーストレインゲージを貼付け、プレストレスの導入前及び74本のストランドを1本ずつ緊張する毎に行い、緊張の翌日まで測定した。測定回数は78回でこれには74本の各ケーブルの緊張後と、

計測ステップ1(全ケーブルの緊張前)

計測ステップ22(1月12日の21ケーブルの緊張開始前)

計測ステップ46(同日の昼休み後で44ケーブル緊張前)

計測ステップ78(1月13日の朝)を含む。

緊張は1月11~12日の2日間で行い、1ケーブルおきに下階から上階に向けて37ケーブルを緊張して行き、次に上階から下階に向けて残りの37ケーブルを緊張する1往復で行った。初日に20ケーブル、二日目に残りの54ケーブルを緊張した。

6. 計測結果

6. 1 壁体のひずみ

計測データを表-1に示すが測定回数が78回と多いため、5本のケーブルを緊張した時点毎に示す。

図-5. 1~5. 5は壁及び梁のひずみゲージのひずみ変動を示すもので横軸には計測ステップを、縦軸はひずみ(単位 $\mu = 10^{-6}$ )を示す。

図5. 1は2階の階高の中央部の壁のG-7~9のゲージのひずみ変動を示し、図中のG-7はX9通り側のゲージ、G-9はX5通り側、G-8は両者の中央(X7通り近傍)のゲージを示す。当然のことながらゲージ位置近傍のケーブル緊張時に圧縮ひずみが増加しており、ゲージから離れたケーブル緊張時にはほとんどひずみが生じない。また中央部のひずみは摩擦による緊張力の減少のため両端部のひずみより小さい。緊張後の導入ひずみはX9通り側が最大で53 $\mu$ 、X5通り側が24 $\mu$ 、中央は21 $\mu$ である。但し、緊張翌日の測定時に圧縮クリープひずみの増加あるいは減少が見られる。

図-5. 2は3階梁のひずみ変動G-10~12を示す。G-10はX9通り側、G-12はX5通り側、G-11は両者の中間位置でこの3者の圧縮ひずみは最大35 $\mu$ とほぼ等しい。

図-5. 3は3階壁の階高の2/3の高さの位置のG-16~18のひずみを示すものでゲージ位置近傍のプレストレス導入による圧縮ひずみの増加が顕著に見られる。導入ひずみはG-16

: 43 $\mu$ 、G-17: 28 $\mu$ 、G-18: 36 $\mu$ で、中央部が両端部より小さい。

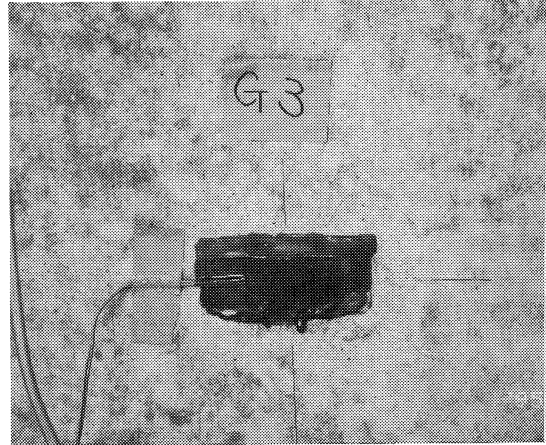


写真-2 壁のひずみゲージ

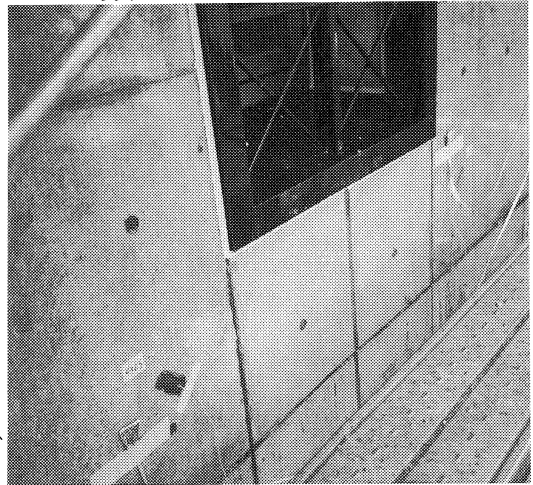


写真-3 4階窓開口とコーナー部ゲージ

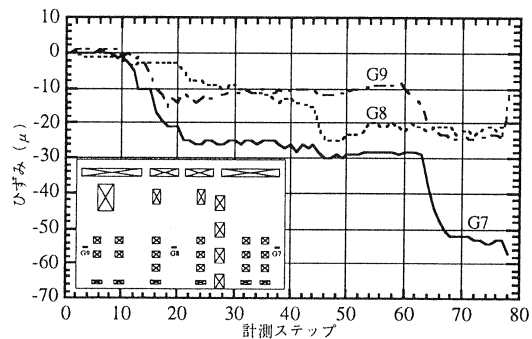


図-5.1 緊張時のひずみ挙動(2階壁)

図-5.4は5階梁および屋上パラベットの中央部のひずみ(G-22、23)を示し、建物の頂部の緊張時に圧縮ひずみが導入されており、G-22は最大19 $\mu$ 、G-23は最大21 $\mu$ のひずみが導入されている。

図-5.5は4階壁の窓開口(幅90cmX高さ180cm)のコーナー部45度方向に直交する位置のゲージのひずみを示す。窓開口隅角部のひずみは14~29 $\mu$ で、壁、梁のひずみより小さくゲージ位置近傍のケーブル緊張により圧縮ひずみが導入されている。

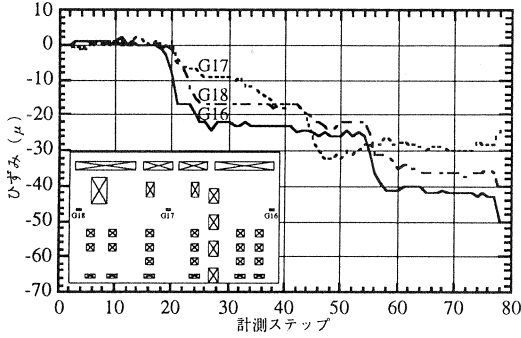


図-5.2 緊張時のひずみ挙動(3階梁)

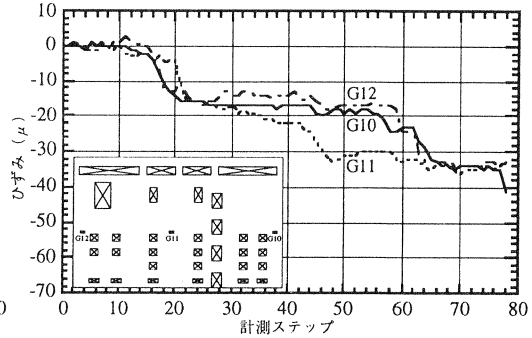


図-5.3 緊張時のひずみ挙動(3階壁2/3)

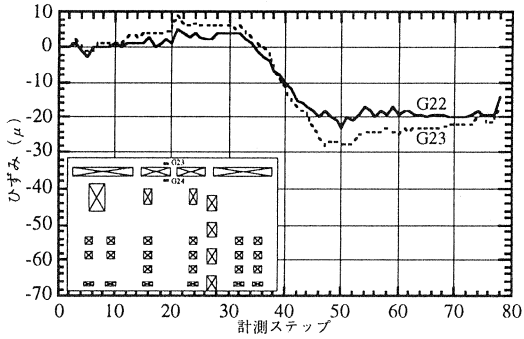


図-5.4 緊張時のひずみ挙動(5階梁・パラベット)

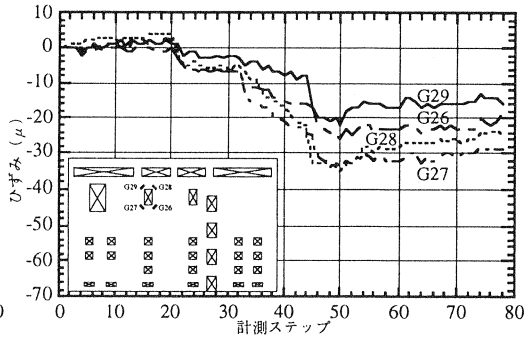


図-5.5 緊張時のひずみ挙動(4階窓開口)

表-1 緊張時の計測データ(Y1通り)

階層No	位置	スタフNo 時点	単位: $\mu$																										
			緊張前	4C後	8C後	12C後	16C後	20C後	24C後	24C後	28C後	32C後	36C後	40C後	44C後	48C後	52C後	56C後	60C後	64C後	68C後	72C後	77C後	78C後	測定				
G.1	1階壁	X9通り側	0	-12	-11	-17	-17	-17	-19	-18	-19	-18	-19	-19	-21	-21	-20	-22	-21	-26	-38	-39	-43						
G.2	2階中央	中央側	0	0	-1	-1	-1	7	6	6	6	5	5	4	5	5	4	3	3	2	2	-7							
G.3	2階梁	X5通り側	0	-2	-15	-17	-17	-17	-18	-18	-18	-19	-20	-19	-28	-24	-22	-21	-22	-24	-28	-40	-42						
G.4	2階梁	X9通り側	0	-4	-3	-15	-14	-15	-17	-12	-13	-11	-12	-13	-17	-17	-17	-19	-28	-33	-34	-43							
G.5	2階梁	中央側	0	-1	-2	-5	-7	-7	-16	-17	-17	-18	-19	-20	-25	-23	-22	-24	-25	-26	-27	-28	-29						
G.6	2階梁	X5通り側	0	-2	-7	-17	-23	-23	-28	-29	-29	-31	-30	-31	-33	-32	-32	-33	-38	-45	-47	-55	-61						
G.7	2階壁	X9通り側	0	0	-1	-10	-19	-21	-26	-26	-25	-26	-26	-29	-29	-28	-28	-37	-52	-53	-57								
G.8	2階壁	中央側	0	-1	-1	-3	-3	-4	-8	-10	-10	-12	-13	-15	-23	-21	-22	-22	-21	-23	-21	-23	-21	-18					
G.9	2階壁	X5通り側	0	1	1	-1	-12	-14	-13	-12	-10	-11	-10	-10	-11	-10	-9	-10	-19	-24	-24	-24	-12						
G.10	3階梁	X9通り側	0	1	0	-1	-8	-15	-16	-17	-17	-17	-17	-17	-18	-19	-19	-23	-29	-34	-34	-35	-41						
G.11	3階梁	中央側	0	-1	-1	-3	-3	-4	-16	-18	-18	-21	-22	-24	-33	-31	-30	-33	-34	-34	-35	-34	-33						
G.12	3階梁	X5通り側	0	0	1	0	-7	-14	-16	-14	-13	-14	-14	-14	-18	-17	-17	-24	-33	-34	-34	-34	-33						
G.13	3階壁	X9通り側	0	1	0	1	-2	-20	-27	-28	-29	-29	-29	-29	-31	-31	-37	-47	-50	-50	-51	-59							
G.14	3階壁1/3	中央側	0	-1	0	-2	-2	-3	-11	-13	-12	-15	-17	-18	-28	-27	-26	-25	-27	-26	-28	-26	-25						
G.15	3階壁	X5通り側	0	1	2	0	-1	-6	-17	-16	-16	-17	-16	-17	-19	-17	-23	-31	-34	-34	-34	-35	-38						
G.16	3階梁	X9通り側	0	1	0	1	0	-14	-20	-22	-23	-23	-24	-26	-26	-36	-41	-40	-41	-42	-43	-50							
G.17	3階壁2/3	中央側	0	-1	1	1	1	-1	-7	-9	-9	-14	-17	-20	-32	-31	-29	-28	-29	-30	-28	-24							
G.18	3階壁	X5通り側	0	1	1	0	1	-5	-15	-17	-17	-18	-19	-24	-22	-31	-35	-36	-36	-37	-36	-41							
G.19	4階梁	X9通り側	0	1	0	2	0	-6	-14	-19	-19	-21	-20	-20	-21	-21	-31	-32	-31	-32	-33	-32	-44						
G.20	4階梁	中央側	0	-1	1	3	0	-1	-6	-7	-7	-12	-14	-17	-22	-21	-21	-23	-24	-24	-24	-25							
G.21	4階梁	X5通り側	0	1	1	1	0	-1	-15	-23	-24	-24	-26	-27	-37	-36	-39	-40	-41	-41	-41	-53							
G.22	5階梁	中央側	0	-3	0	1	0	0	4	4	4	-3	-10	-17	-20	-21	-20	-19	-19	-20	-19	-14							
G.23	6階パラベット	中央側	0	-1	1	4	4	4	7	6	6	0	-12	-18	-27	-27	-24	-25	-23	-23	-22	-21	-17						
G.24	2階窓	2階窓	0	1	5	2	1	2	-2	-2	-2	-3	-5	-6	-16	-10	-9	-8	-7	-7	-7	-3	-3						
G.25	45°下方	45°下方	0	-2	0	-1	3	3	0	0	0	-1	-4	-3	-4	-20	-16	-14	-13	-11	-11	-10	-21						
G.26	4階窓	4階窓	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-6	-6	-6	-12	-15	-16	-24	-25	-24	-23	-24	-23	-21	-18						
G.27	45°下方	45°下方	0	0	1	1	1	2	-6	-6	-6	-17	-21	-24	-33	-32	-32	-33	-30	-30	-29	-29	-29						
G.28	4階窓	4階窓	0	2	3	3	4	4	-4	-5	-5	-13	-17	-22	-34	-33	-30	-28	-27	-27	-26	-23	-25						
G.29	45°上方	45°上方	0	0	1	2	1	0	-1	-2	-3	-6	-8	-8	-21	-17	-16	-17	-16	-15	-14	-14	-16						
G.30	1階柱(ダミー)	1階柱(ダミー)	0	0	2	-1	2	1	-1	-2	-3	-2	-4	-3	-7	-6	-5	-5	-5	-4	-4	-3	-4						

注: 4C後は4ケーブル緊張後を示す。20階-76までは11月11日緊張。

6. 2壁体のコンクリートのひび割れ状況

図-6.1、6.2はY1通り、Y5通りのプレストレスを導入した壁体のひび割れ状況を示す。

水平、垂直に目地があるが、縦方向の誘発目地はスパン中央の窓開口の中央線上および窓の両側にある。

ひび割れは図に示す様に1階壁部分に多く、2階以上では開口コーナーからのひび割れが見られる程度である。また縦目地に沿ったひび割れも1階壁に数本見られる。ひび割れの発生時期は大部分が緊張前である。発生したひび割れはその長さは2m以下と短く、またひび割れ幅も最大0.2mmで大部分は0.1mm以下と小さい。

壁のコンクリート打設は7~12月に行われており、最終打設が12月14日でプレストレスの導入が材令約1箇月の1月11~12日で竣工は3月末である。ひび割れの調査は緊張の前後、竣工直前、竣工3月後の6月と3回行った。緊張前にひび割れを調べそのひび割れが緊張により閉じるかどうかを調べたが、ひび割れ幅の低減傾向は見られるものの完全な閉塞は見られなかった。竣工3月後の調査では窓開口部から45度方向のひび割れが数本新たに発生しているのが見られるが、すでに発生していたひび割れは幅、長さともそれ以上進展しておらず、ひび割れの状況から判断するとプレストレスによるひび割れ制御の効果が見られる。

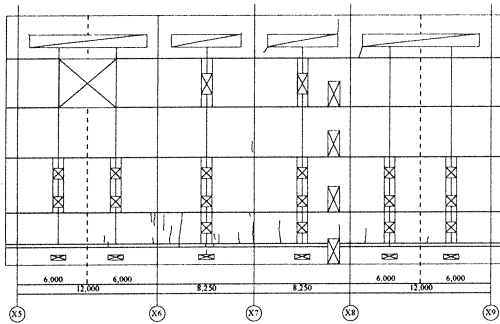


図-6.1 Y1通りひび割れ図

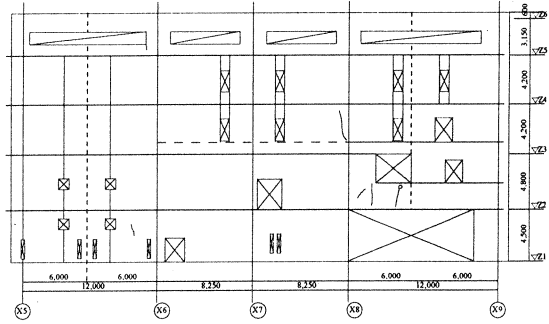


図-6.2 Y5通りひび割れ図

7. 考察

7. 1壁体のコンクリートの導入ひずみ

表-2には今回の計測で得られた全体のひずみ(応力)を示す。プレストレス導入で壁、梁に生じた圧縮ひずみ(応力)は大略10~55μ(3.4~18.9kg/cm<sup>2</sup>)である。導入される圧縮ひずみは全体として壁の場合に26~53μ(8.9~18.2kg/cm<sup>2</sup>)と大きく、梁は19~41μ(6.5~14.1kg/cm<sup>2</sup>)と次に大きく、窓開口部の45度の直交方向の圧縮ひずみは10~29μ(3.4~9.9kg/cm<sup>2</sup>)と最も小さい。

7. 2壁体のコンクリートの導入プレストレス

プレストレス導入によりコンクリートに生じた圧縮ひずみから導入されたプレストレスを計算する。

コンクリートは材令44日で2本のテストピースで圧縮試験を行った。平均で

圧縮強度 421kg/cm<sup>2</sup>、(各393、449kg/cm<sup>2</sup>)

ヤング係数 E 3.43x10<sup>5</sup>kg/cm<sup>2</sup>(各3.56、3.30)

である。測定した最大ひずみεは55μであり応力は

$\sigma = \epsilon \times E = 18.9\text{kg/cm}^2\text{kg/cm}^2$ となり、計算上の

壁全断面の平均プレストレス  $\sigma = 20\text{kg/cm}^2$  とほぼ

等しい。しかし実際には壁8.9~18.2、梁6.5~14.1、

窓開口45度直交方向3.4~9.9kg/cm<sup>2</sup>と計算値より

小さい。これは計算値が梁を除く壁断面で考慮して

おり実際にはプレストレスが梁やスラブに逃げており、

また緊張力が端部緊張力を採用しているためである。

表-2 プレストレスによる導入ひずみ(応力) 応力kg/cm<sup>2</sup>

ゲージ 記号	位 置	半分のケーブル緊張時		全部のケーブル緊張時	
		ひずみμ	応力	ひずみμ	応力
G-1	1階壁 X9側	-19	-6.5	-39	-13.4
G-2	階高中央 中央	5	1.7	2	6.9
G-3	X5側	-19	-6.5	-4	-13.7
G-4	2階梁 X9側	-13	-4.5	-34	-11.7
G-5	中央	-19	-6.5	-28	-9.6
G-6	X5側	-31	-10.6	-55	-18.9
G-7	2階壁 X9側	-27	-9.3	-53	-18.2
G-8	階高中央 中央	-13	-4.5	-21	-7.2
G-9	X5側	-11	-3.8	-2	-8.2
G-10	3階梁 X9側	-17	-5.8	-35	-12.0
G-11	中央	-22	-7.5	-3	-11.7
G-12	X5側	-14	-4.8	-34	-11.7
G-13	3階壁 X9側	-29	-9.9	-51	-17.5
G-14	階高1/3 中央	-17	-5.8	-26	-8.9
G-15	X5側	-17	-5.8	-35	-12.0
G-16	3階壁 X9側	-23	-7.9	-43	-14.7
G-17	階高2/3 中央	-17	-5.8	-28	-9.6
G-18	X5側	-17	-5.8	-36	-12.3
G-19	4階梁 X9側	-20	-6.9	-32	-11.0
G-20	中央	-14	-4.8	-23	-7.9
G-21	X5側	-25	-8.6	-41	-14.1
G-22	5階梁 中央	-8	-2.7	-19	-6.5
G-23	バルコニー 中央	-9	-3.1	-21	-7.2
G-24	2階窓 45度下方	-4	-1.2	-3	-1.0
G-25		-3	-1.0	-10	-3.4
G-26	4階窓 45度下方	-14	-4.8	-21	-7.2
G-27		-20	-6.9	-29	-9.9
G-28	4階窓 45度上方	-16	-5.5	-23	-7.9
G-29		-7	-2.4	-14	-4.8
G-30	1階柱 ダミー	-4	-1.2	-3	-1.0

### 7. 3 壁のひび割れ

壁のひび割れはY5通りよりY1通りに多く特にY1通りの1階の壁に多い。これは1階の壁が腰壁(高さ1.5m、厚さ25cm)から一般の壁(厚さ30cm)に移行し、壁厚が急変すると、腰壁の導入プレストレスが小さく、また基礎梁にプレストレスが導入されていないためである。Y1通り1階壁でも特にX6~X7通り間に多く見られ、この位置のひずみゲージ(G-2)による測定でも圧縮ひずみはほとんど見られずプレストレスの効果がほとんど無いと思われるが、その理由は不明である。2階以上では窓開口を除きひび割れはほとんど見られない。

### 7. 4 開口部周辺のひび割れ

窓開口隅角部からは45度方向にひび割れが一般に発生する。ゲージは開口隅角部の45度の直交方向に配置されており、この方向には水平方向の緊張力の7割の分力が作用する事となる。そのためこの方向のひずみ値は水平方向のゲージの値より小さいと思われる。また本建物の窓開口の周辺は幅20~25cm、厚さ約20cmのRCの補剛枠があるため開口からの斜めひび割れは拘束されており、これらのことから導入圧縮ひずみが小さくなったものと判断される。

## 8. 結論

今回の計測及びひび割れ調査を通して以下の事が解った。

- 1) 壁のコンクリートはプレストレス導入により圧縮ひずみを生じる。導入される圧縮ひずみは壁が最大で $26\sim 53\mu$ 、梁が $19\sim 41\mu$ 、開口隅角部の45度の直交方向が $10\sim 29\mu$ である。
- 2) プレストレスにより壁に導入される最大圧縮ひずみは $55\mu$ であり、コンクリートのヤング係数 $E = 3.43 \times 10^5$ より求めた圧縮応力は $18.9\text{kg}/\text{cm}^2$ となり、設計値の $20.0\text{kg}/\text{cm}^2$ に近い。しかし平均的な応力は $10\sim 15\text{kg}/\text{cm}^2$ でこれは導入力が梁、スラブに流れたためと思われる。
- 3) 窓開口45度の直交方向の導入圧縮力は $3\sim 10\text{kg}/\text{cm}^2$ と壁、梁より小さく、これには開口周囲の補剛枠の影響もあると思われる。
- 4) コンクリート壁のひび割れはY1通りの1階の腰壁から上の壁に発生した。これは腰壁(壁厚が約25cm)が一般壁(厚さ20cm)へと厚さが急変し、また腰壁部分のプレストレスが小さく、基礎梁にはプレストレスがないためと思われる。
- 5) ひび割れはその大部分が緊張前に生じていたがその長さは短く、幅も大部分が0.1mm以下と小さい。緊張によりひび割れの幅が多少減少するがひび割れを閉塞することはできなかった。
- 6) コンクリート壁のひび割れは窓開口の中央部分や隅角部にも生じ、この位置には縦目地があり、当初予定したコンクリートのひび割れが制御できた。また、竣工直前及び3月後の調査では新しく発生したひび割れは見られず、すでに発生していたひび割れの長さ、幅の進展は見られず、プレストレスの効果があることが解った。

結論として今回のプレストレス導入により壁のひび割れ制御ができたが、ひび割れを皆無にはできなかった。プレストレスによる壁のコンクリートの完全なひび割れ制御のためには基礎梁や腰壁にも相応のプレストレスを与え、低層部の拘束を減少するなどの配慮が必要であると思われる。

## 謝辞

今回の計測に際しては現場の武者春雄工事長および児玉正弘主任の協力を得た。また計測およびデータ整理に当たっては当社技研の菅原勝氏の助力を得た。紙上をかりて深く感謝の意を表わす。

## 参考文献

藤井忠義、プレストレスによるコンクリート壁のひび割れ制御、PC技術大会論文集、第4回、1994