

(29) プレストレスによるコンクリート壁のひび割れ制御

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あり、その防止のため過去に各種の方法が試みられている。これらは1) コンクリート中の単位水量の低減、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である。しかしながら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。プレストレスの導入によるひび割れの制御は積極的な防止対策として興味深い方法である。ここでは某工場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収縮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皆無に近く、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見られない。このため今回の工事に際して壁のコンクリート中にモールドゲージを埋設してコンクリートひずみの計測を行い、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することを目的とした。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)
- 規模 長辺方向 32.4m(8.1m x 4スパン)
- 短辺方向 16.2m(5.4m x 3スパン)
- 階高 1階、2階共 10.35m

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(Y5通りとY9通りの2面)のうちY9通り軸組図を図-2に示す。

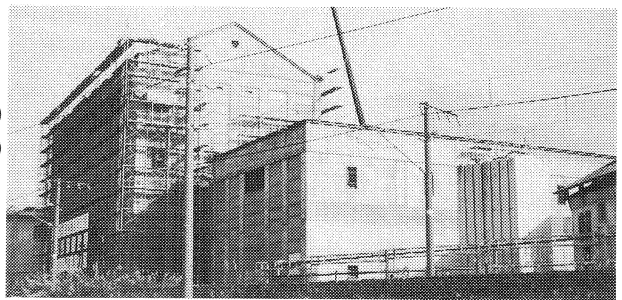


写真-1 建物全景

壁は全面にわたって厚さ18cmで、窓開口が各スパンに4ヶ所の計16ヶ所ある。柱は60 x 60cmでスパン8.1mを3等分する形で間柱(30 x 30cm)がある。梁は40 x 85cmで1階、2階の階高のほぼ中央に横リブ(30 x 30cm)がある。壁の配筋はダブル配筋で縦D10-20cmピッチ、横D10-25cm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。Y5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47本で壁、梁、リブを含む全断面に対して平均圧縮応力 $12.5 \text{ kg/cm}^2$ を導入した。配置はすべて水平方向でストランド間隔は15~45.5cm(平均間隔44.0cm)で、壁だけでなくプレストレスの均等化を図るため梁やリブ中にも配置した。

水平方向に窓開口(開口の高さは51、96、108cmの3種)がある所ではストランドが配置できないので窓開口の上下近傍に2本を間隔15cmと密に配置した。

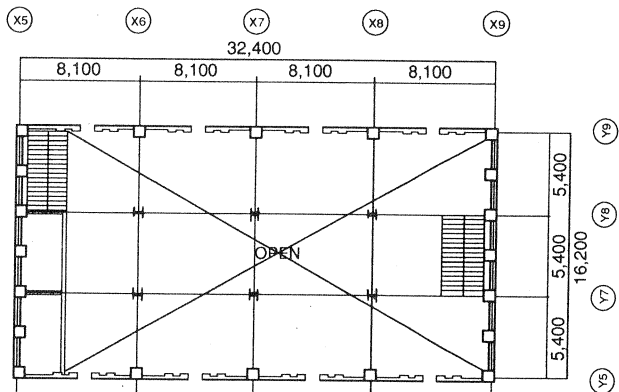


図-1 建物の平面図

1) 使用PC鋼材

- シーストランド SWPR7B
  - $\phi 12.7\text{mm}$  7本より
- シー径  $\phi 16.2\text{mm}$
- PC鋼材 断面積  $98.71\text{mm}^2$
- 引張強度 18.7t
- 降伏強度 15.9t
- 端部緊張力 13.5t
- 固定端緊張力 12.0t ( $\lambda=0.002$ )

2) 緊張工法

- アンボンドモノストランド工法
  - (KCL工法) : 片引き緊張
- 定着具 固定端 アンカプレート
  - (65x125x20)+圧着グリッブ
- 緊張端 キャスティング+楔

3) コンクリート

- 設計基準強度  $210\text{kg}/\text{cm}^2$
- 緊張時  $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上
- 流動コンクリート
- スランプ ベース15cm→21cm

5. 計測

5. 1 計測目的

プレストレスを導入する事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、横リブの比較
  - (3) 開口のコーナー部45° 方向
- 2) コンクリート試験体のひずみ
- 3) 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) 竣工前及び竣工半年後

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Y9通り、及びプレストレスが導入されない妻側壁面(短辺方向)のX5通りで、図-4.1にゲージ位置の平面図を、図-4.2に立面図を示す

他に壁を想定した無筋コンクリート及び鉄筋コン

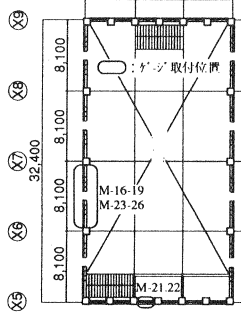


図-4.1 ゲージ位置 (平面図)

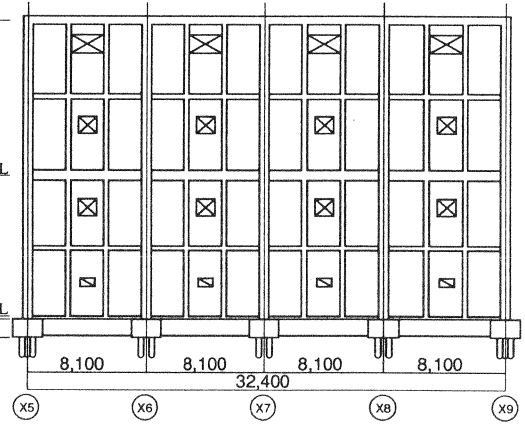


図-2 Y9通り軸組図

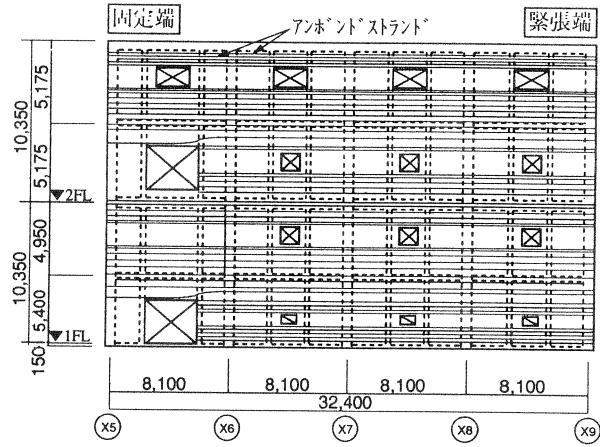


図-3 ストランド配置 (壁は全て18cm厚)

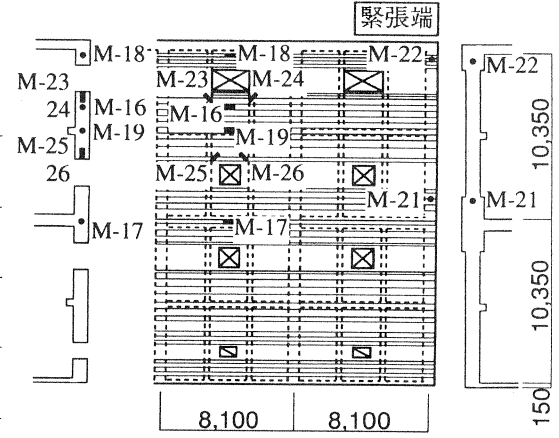


図-4.2 ゲージ位置 (立面図)

リート試験体各2体でも計測を行った。試験体は幅1m、高さ60cm、厚さ19.5cmでプレストレスは導入されていない。

Y9通りの測定位置はX6~X7通り間の2階以上の壁、梁、横リブ、窓開口コーナー部の45度方向で測定した。プレストレスを導入していないX5通りでは2階とR階の梁で測定した。

5. 3 計測方法

コンクリートの収縮ひずみの測定のために埋込み型のモールドゲージPMS-30 (東京測器製) を壁、梁、リブ中に埋設した。埋設位置は全て壁 (厚さ18cm) の中心位置で、梁、リブではそのせいの中央位置とした。モールドゲージはゲージ長さ30mm、ゲージ幅2mmのワイヤーストレインゲージをエポキシ樹脂で固めたもので、寸法は50x13x5mmでコンクリートとの付着性向上のために両端につばが付いたものである。写真-2、3に壁中、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ASW324Bを介し、ストレインメータTDS256 (共に東京測器製) で測定した。

5. 4 計測時期

計測時期は図-5に示す様にコンクリート打設の直前にモールドゲージを取付け、コンクリートの硬化後に測定を開始し、プレストレスの導入前後及び竣工直前まで1日1回の割で測定した。計測期間は9月~11月である。

6. 計測結果

6. 1 壁体の乾燥収縮ひずみ

計測データを表-1に示す。計測データは計測の都合上コンクリートの打設、硬化後から9月19日までの測定と9月19日以後11月10日までの部分に分けられ9月19日のひずみを0とした。

9月19日以後11月10日までの計測ステップを表-2に示すが緊張時点はこのステップに含まれる。

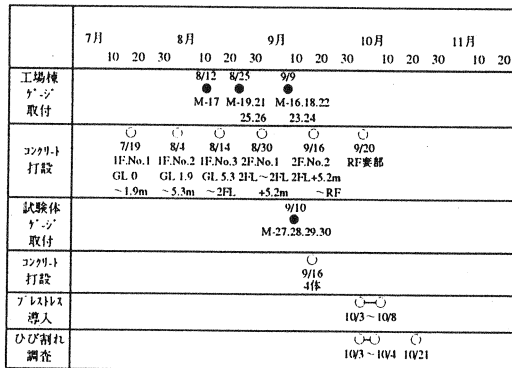


図-5 計測関連の工程

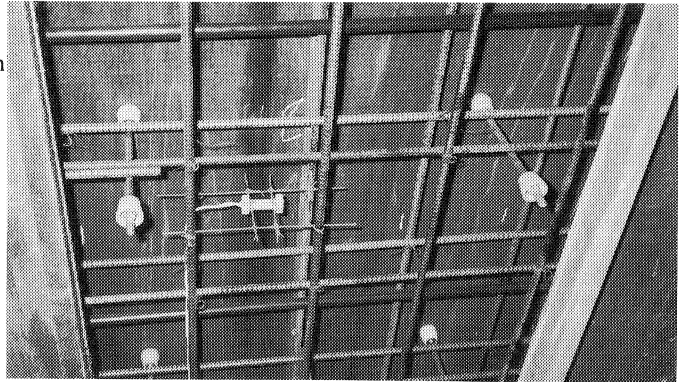


写真-2 モールドゲージの設置状況 (2階壁)

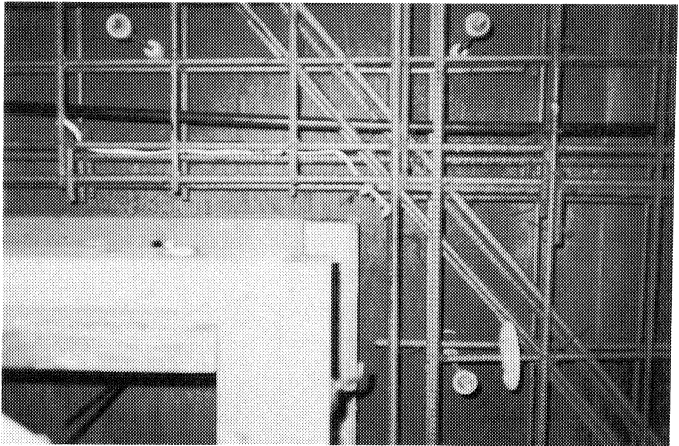


写真-3 モールドゲージの設置状況 (窓コーナー部)

表-2 計測ステップ

STEP	内容	STEP	内容
1	9/19 AM12:40	29	10/15 PM 7:50
2	9/20 AM12:40	30	10/16 AM 7:50
3	9/21 AM12:40	31	10/17 AM 7:10
4	9/22 AM12:40	32	10/18 AM 7:50
5	9/23 AM12:40	33	10/19 AM 8:10
6	9/24 AM12:40	34	10/20 PM 5:25
7	9/25 AM12:40	35	10/21 AM11:30
8	9/26 PM12:40	36	10/22 PM 7:15
9	9/27 PM 8:20	37	10/23 PM 6:06
10	9/28 PM 8:20	38	10/24 PM 2:13
11	9/29 PM 8:40	39	10/25 PM 7:50
12	9/30 PM 8:40	40	10/26 PM 7:50
13	10/01 PM 8:40	41	10/27 PM 7:50
14	10/02 PM 5:10	42	10/28 PM11:30
15	10/03 AM11:10	43	10/29 PM11:30
16	10/04 AM11:45	44	10/30 PM11:30
17	10/05 PM 7:30	45	10/31 PM11:30
18	10/06 PM10:00	46	11/01 PM 8:00
19	10/07 AM10:00 Y9通り緊張前	47	11/02 PM 8:30
20	10/07 PM 8:00 Y9通り緊張後	48	11/03 PM 8:30
21	10/08 AM10:00 Y5通り緊張前	49	11/04 PM 7:44
22	10/08 PM10:00 Y5通り緊張後	50	11/05 PM 7:44
23	10/09 AM10:00	51	11/06 PM 7:44
24	10/10 AM10:00	52	11/07 PM 7:05
25	10/11 AM10:00	53	11/08 PM 7:05
26	10/12 PM 7:00	54	11/09 PM 7:05
27	10/13 AM10:00	55	11/10 PM 1:10
28	10/14 AM10:00		

表-1 計測データ(9/19~11/10)

位置	コンクリート	9/19	9/20	9/21	9/22	9/23	9/24	9/25	9/26	9/27	9/28	9/29	9/30	10/1	10/2	10/3	10/4	10/5	10/6	10/7	10/8	10/9	10/10	10/11	10/12					
M-16	2F 壁	9/07	9/16	0	11	-7	11	22	31	26	24	31	34	29	30	39	32	42	33	52	45	45	11	29	26	20	35	26	36	
M-17	2F 梁	8/27	8/14	0	15	14	34	62	78	95	113	127	120	-	-	-	-	152	181	184	172	157	165	177	171	182	139	194		
M-18	R階 梁	9/09	9/16	0	6	18	8	8	9	11	8	15	10	22	26	23	38	28	17	31	31	30	6	3	3	14	8	20	19	
M-19	2F リブ	8/25	8/30	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	21	5	14	-41	-25	-13	-33	-5	-31	-21		
M-21	妻側 梁	8/25	8/30	0	7	10	10	7	15	29	36	9	14	42	44	33	46	21	9	8	-16	-21	-11	-12	-1	11	8	28	41	
M-22	妻側 梁	9/09	9/16	0	1	8	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	54	69	62	68	80	91	90	105	123			
M-23	開口 左下	9/09	9/16	0	12	-21	21	17	17	17	17	17	17	-88	-51	-34	-29	-18	-6	1	13	13	15	15	21	27	21	27	40	
M-24	開口 右下	9/09	9/16	0	6	-30	-11	17	-23	-19	-29	-16	-10	-22	-11	6	-4	2	-28	-2	-6	4	-23	-9	-2	-14	3	-37	6	
M-25	開口 左上	8/25	8/30	0	4	-36	7	25	16	24	37	31	42	29	28	49	36	50	52	72	64	70	38	52	110	38	66	48	68	
M-26	開口 右上	8/25	8/30	0	-4	-15	36	40	13	34	61	57	71	57	61	80	62	73	83	92	93	86	50	67	74	42	74	49	54	
M-27	無筋コンクリート	9/10	9/16	0	7	-18	-8	16	18	23	28	17	23	2	-18	-3	-16	-1	-5	2	-6	4	-6	1	9	-4	10	-	-	
M-28	無筋コンクリート	9/10	9/16	0	15	-7	3	14	21	17	21	27	30	20	4	20	13	30	26	40	29	41	31	42	45	35	52	-	-	
M-29	鉄筋コンクリート	9/10	9/16	0	1	-26	-17	3	12	3	9	9	13	13	-4	9	0	11	11	28	20	22	30	22	30	37	30	40	-	-
M-30	鉄筋コンクリート	9/10	9/16	0	7	-21	-13	2	6	4	9	-1	6	6	-9	-25	-9	-7	-4	-10	-11	-25	-4	-19	-12	0	-15	2	-	

位置	10/13	10/15	10/16	10/17	10/18	10/19	10/20	10/21	10/22	10/23	10/24	10/25	10/26	10/27	10/28	10/29	10/30	10/31	11/1	11/2	11/3	11/4	11/5	11/6	11/7	11/8	11/9	11/10	
M-16	27	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	
M-17	193	208	205	209	213	210	208	211	220	230	240	250	260	260	279	277	283	303	297	325	298	308	332	279	287	283	301	291	
M-18	23	23	17	15	13	6	3	15	23	32	40	49	58	51	55	62	62	55	73	83	77	75	74	77	90	85	92	94	
M-19	-9	-14	1	6	10	4	-1	1	3	4	6	8	11	30	23	36	43	44	29	18	25	33	56	49	44	44	28		
M-21	51	66	60	50	40	35	10	8	24	39	55	70	86	68	81	102	97	100	124	139	134	134	140	160	163	159	161	177	
M-22	118	130	136	131	125	120	121	125	136	148	160	172	184	172	188	204	195	193	214	209	200	208	213	231	234	232	244	235	
M-23	42	38	39	30	21	15	2	8	21	35	48	62	77	81	82	90	92	79	94	101	104	106	103	100	105	106	108		
M-24	17	-14	-7	-17	-26	-31	-40	-26	-15	-5	6	16	30	33	38	43	31	41	41	34	49	53	43	54	58	59	62	66	
M-25	76	79	87	86	84	67	66	78	86	94	102	110	119	123	131	128	138	125	131	132	131	139	138	143	137	139	139	135	
M-26	59	53	68	61	55	39	39	44	53	62	71	80	90	100	109	103	115	101	102	105	98	113	110	115	104	108	104	99	
M-27	-	-	-	-	-	-	-	-41	-34	-26	-18	-10	-2	6	2	8	10	11	13	22	20	5	18	25	31	33	28	29	
M-28	-	-	-	-	-	-	-	-41	53	65	76	88	100	97	105	108	103	98	113	117	106	117	125	122	131	131	130	126	
M-29	-	-	-	-	-	-	-	-41	-38	-27	-16	-5	6	17	16	23	24	21	19	28	38	33	41	47	44	54	51	53	48
M-30	-	-	-	-	-	-	-	-45	-42	-33	-24	-14	-5	4	1	9	14	13	12	24	20	13	29	36	41	44	42	44	37

図-6. 1~6. 4は壁体中及び試験体中に埋設したモールドゲージのひずみ変動を示したものである。

横軸には表-2に示す緊張ステップを示し、縦軸はひずみ(単位 $\mu = 10^{-6}$ )を示し、+は引張りひずみを示す。

図6. 1はY9通りのM-16~19のゲージのひずみ変動を示したもので、全てのゲージに引張りひずみが漸増している様子が見られる。

プレストレス導入時には逆方向の圧縮ひずみが作用し、引張りひずみが減少している様子がうかがえるがプレストレス導入による圧縮ひずみは全体の引張りひずみに比べ、極めて小さい。

又、プレストレス導入後も引張りひずみは漸増する。

図中のM-16は壁のゲージを、M-17は2階梁のゲージを、M-18はR階梁のゲージを、M-19は2階横リブのひずみ変動を示すもので、M-17の値が他より大きく、他の3者はほぼ同様な傾向を示している。M-17のひずみが大きい理由は不明である。

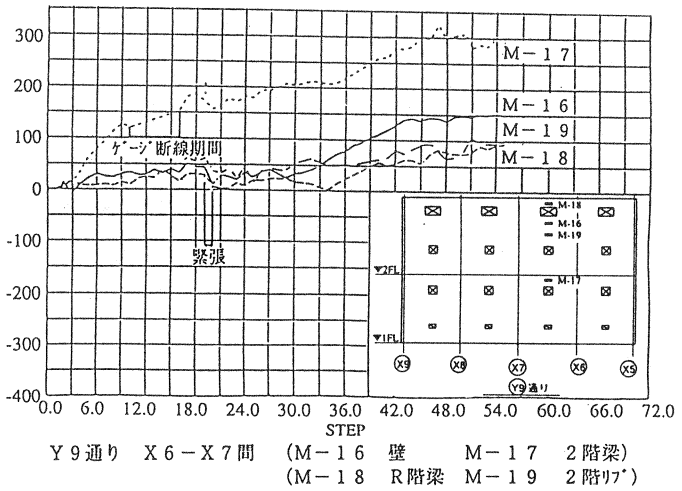


図-6.1 計測データ(Y9通り)

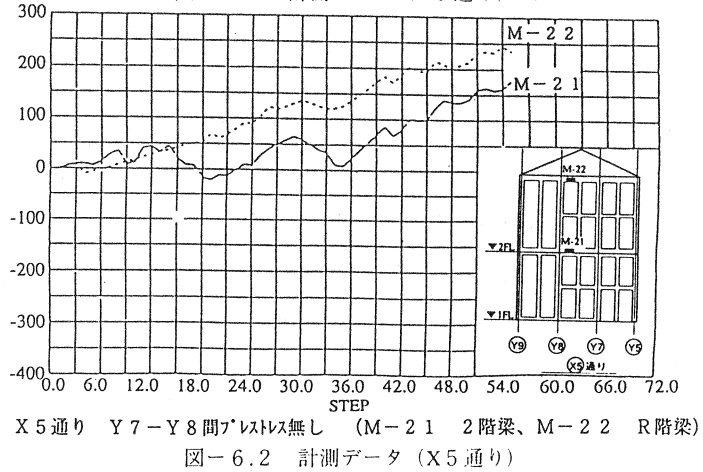


図-6.2 計測データ(X5通り)

図-6. 2はプレストレスが導入されない妻壁のひずみ変動を示す。M-21は2階梁のゲージを、M-22はR階梁のゲージを示す。プレストレスが導入されたY9通りのひずみに比べ値が大きい。

図6. 3はプレストレスが導入された壁の窓開口のコーナー部45°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図-6. 1のひずみとほぼ等しい性状を示している。

図-6. 4はコンクリート試験体のひずみを示す。無筋コンクリート試験体のゲージ (M-27、M-28) も鉄筋コンクリート試験体のゲージ (M-29、M-30) もほぼ同様なひずみ値を示し最大で約100μである。6. 2壁体のコンクリートのひび割れ状況

図-7. 1, 7. 2はY5通り、Y9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。縦方向の誘発目地がスパン中央の窓開口の中央を結ぶ形で取っており、その縦目地に沿ったひび割れが見られるものの、その長さは短く、又、ひび割れ幅も0.1mm以下と小さい。

プレストレスの導入が10月7日～8日であり、ひび割れの調査をしたのが11月11日でひび割れの発生状況から判断すると縦目地に沿う小さなひび割れがあるもののプレストレスによるひび割れ制御の効果が見られる。同図には竣工後約半年後の4月9日に再度ひび割れ調査を行った結果も示しており、半年後の時点では窓開口部から45°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。

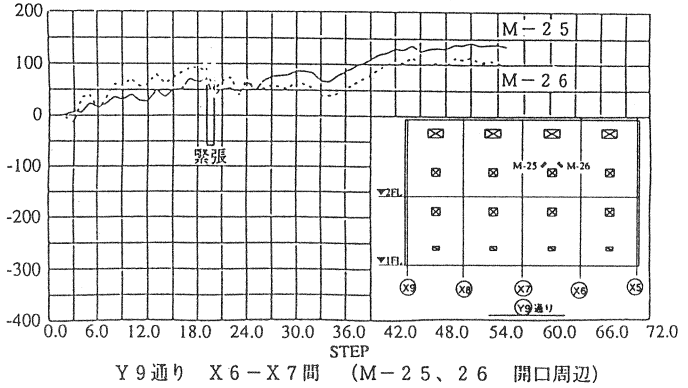


図-6.3 計測データ (M-25、26)

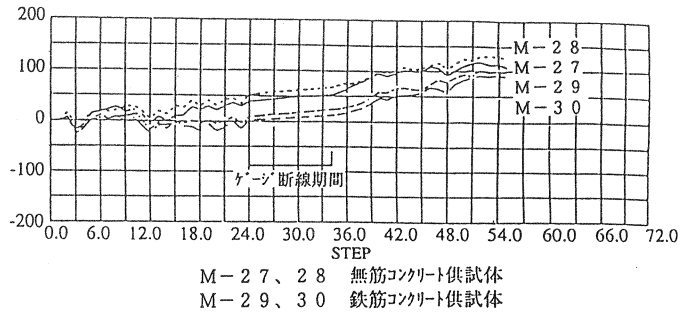


図-6.4 供試体のひずみ

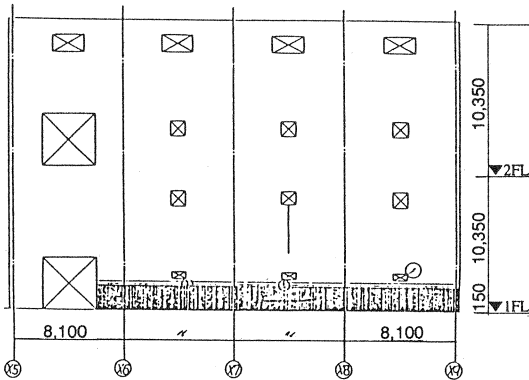


図-7.1 ひび割れ図 (Y5通り)  
○: 半年後の発生ひび割れ

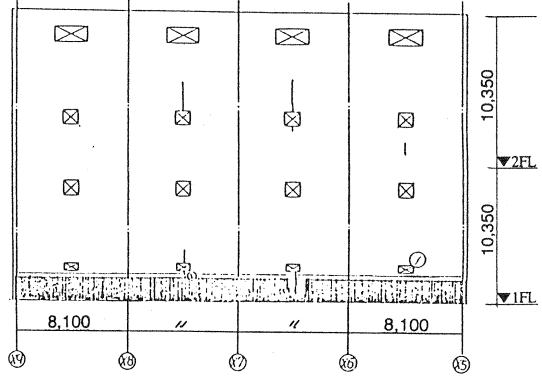


図-7.2 ひび割れ図 (Y9通り)  
○: 半年後の発生ひび割れ

7. 考察

7. 1 壁体のコンクリートの収縮ひずみ

表-3には今回の計測で得られた全体のひずみを示す。壁体のコンクリートはコンクリートの硬化直後から乾燥収縮による縮みを開始する。しかしこの縮みは壁の場合周辺の柱、梁（及び間柱、横リブ等）により縮みを拘束されているため、引張りひずみを生じ時間の経過と共に漸増する。全乾燥ひずみは130~349 $\mu$ であるが、大略200 $\mu$ である。但しこの値にはプレストレス導入による圧縮ひずみも含む。

7. 2 プレストレスが収縮ひずみに与える影響

表-3にはプレストレス導入で生じた圧縮ひずみを示し、その値は14~34 $\mu$ と小さい。導入される圧縮ひずみは壁の場合に大きく梁、リブは小さい。窓開口部の圧縮ひずみも23~34 $\mu$ と大きい。

図-8はプレストレスを与えた場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化の概要を示す。

コンクリートは硬化後から縮み拘束を受けて引張りひずみを生じる。プレストレスによりコンクリートに圧縮ひずみが与えられこれがプレストレス導入の効果である。今回与えたプレストレスを計算してみると平均プレストレス $\sigma = 12.5\text{kg/cm}^2$ であり、Eはコンクリートの圧縮強度が約300 $\text{kg/cm}^2$ より $2.5 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ と考えると  $\epsilon = \sigma / E = 12.5 / 2.5 \times 10^5 = 50 \times 10^{-6} = 50\mu$ となる。

7. 3 開口部周辺のひび割れ

開口部隅角部からは45°方向にひび割れが発生する。ゲージは開口45°方向の直交方向に配置されていることから水平方向の緊張力Pの $P/\sqrt{2} = 0.7P$ が作用する事となる。しかし、開口があるためコンクリート断面積は小さくなり開口部周辺には無開口部より大きい圧縮応力が作用しているとも考えられる。表-3の開口部のプレストレス導入によるひずみは2階壁の値とほぼ等しい事からもこの事は予想される。

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コンクリート打設後乾燥収縮を続け、周辺の柱、梁、リブの拘束のため引張りひずみを生じ、その最大値は約300 $\mu$ である。
- 2) プレストレス導入によりコンクリートが圧縮されコンクリートの引張りひずみは減少する。壁、梁、リブに導入される圧縮ひずみは壁が最大(33 $\mu$ )で梁が最小(14 $\mu$ )である。
- 3) プレストレスにより壁に導入された圧縮ひずみは33 $\mu$ であり、コンクリートの弾性係数を $E = 2.5 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ と仮定すると圧縮応力は8.3 $\text{kg/cm}^2$ となり、設計値の12.5 $\text{kg/cm}^2$ より小さい。これは導入力が梁、スラブに流れたためと思われる。
- 4) 無筋及び鉄筋コンクリートの試験体に埋設したモールドゲージは柱、梁の拘束がないが、壁に埋設したモールドゲージと同様に引張りひずみが生じ、その最大値は200 $\mu$ である。
- 5) コンクリート壁のひび割れは窓開口の中央部分に生じたが、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。しかし、半年後の調査では窓開口45°方向のひび割れが数本見られ、開口の斜めひび割れの完全な防止は難しいと思われ、完全なひび割れ制御にはプレストレスレベルを上げるなどの配慮が必要であると思われる。

謝辞： 本工事の計測に当たっては現場の武者春雄工事長、前原英彦主任、兎玉正弘氏に御世話になった。又、設計の長建設計事務所には壁のプレストレス導入の設計で協力頂いた。又、データの整理や論文作成に関根守氏、菅原勝氏の助力を得た。紙上を借りて深く感謝の意を表す。

表-3 プレストレスによる導入ひずみ (9/19~11/10分)

ゲージ 記号	位置	コンクリート 打設日	①	②	③(=①+②)	④	⑤	コンクリート打設~ プレストレス導入 の期間
			計測開始 ~9/19間の ひずみ	9/19~11/10 間の乾燥 収縮ひずみ	全乾燥 収縮ひずみ	計測の 全期間 (日)	プレストレス 導入時の 収縮ひずみ	
M-16	2F 壁	9月16日	87	148	235	55	130	22
M-17	2F 梁	8月14日	59	290	349	88	227	55
M-18	RF 梁	9月16日	113	92	205	55	142	22
M-19	2F リブ	8月30日	-	102	-	72	-	39
M-21	2F 梁	8月30日	17	178	195	72	-	-
M-22	2F 梁	9月16日	72	235	307	55	-	-
M-23	開口 左下	9月16日	125	107	232	55	159	22
M-24	開口 右下	9月16日	100	64	164	55	103	22
M-25	開口 左上	8月30日	41	133	174	72	129	39
M-26	開口 右上	8月30日	30	100	130	72	114	39
M-27	無筋コンクリート	9月16日	93	107	200	-	-	-
M-28	無筋コンクリート	9月16日	68	125	193	-	-	-
M-29	鉄筋コンクリート	9月16日	68	98	166	-	-	-
M-30	鉄筋コンクリート	9月16日	68	88	156	-	-	-

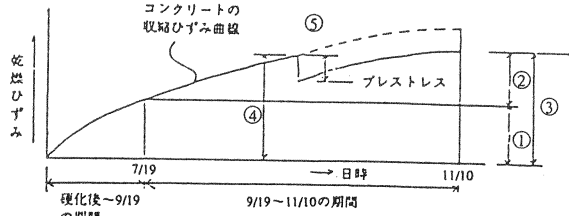


図-8 プレストレスによる収縮ひずみ曲線