

外壁のひびわれ制御を目的とした PRC 工法の適用事例

——地中ばりにプレストレスを導入した場合——

中 根 淳 小 柳 光 生 増 田 安 彦
観 音 延 平 松 井 裕 明
(本店 建築設計第五部) (本店 技術部)

Crack Control of Concrete Walls through Introduction of Prestress into Foundation Girders

Sunao Nakane Mitsuo Koyanagi Yasuhiko Masuda
Nobuhei Kannon Hiroaki Matsui

Abstract

Cracks formed in exterior walls of reinforced concrete buildings will not only be causes of leakage, but will also mar the appearance of the building and greatly detract from its image. To reduce cracks in walls, prestress was introduced into foundation girders which restrain shrinkage in walls more than other members. Measurements of stress and strain, and crack investigations by visual inspection were carried out to ascertain the effects of prestress. Elastic stress analysis were performed and the results were compared with measured values. The principal conclusions of this study are as follows. (1) The prestress introduced was 7 to 20 kg/cm² at the foundation girders and 3 to 6 kg/cm² at first-story walls. (2) On investigations of cracks at 6 weeks after prestressing, there were few to be found and those existing had widths less than 0.1 mm. (3) The results of FEM analysis were consistent with those of measurements.

概 要

鉄筋コンクリート造の建物外壁に発生するひびわれは、漏水の原因になるばかりでなく、美観を損ない、建物全体のイメージを大きく低下させる。当報告では、外壁のひびわれを低減させる目的で外壁の収縮変形を拘束する部材のうち、特に拘束力が大きいと思われる地中ばりにプレストレスを導入し、その効果を確認するため、応力・ひずみ計測、目視によるひびわれ調査を実施した。また弾性応力解析を行ない、測定値を比較検討した。得られた主な結果を以下に述べる。(1) 導入された応力は、地中ばりで7~20kg/cm²、1階壁では3~6kg/cm²であった。(2) 導入後6週時のひびわれ調査では、ひびわれ本数は少く、幅も0.1mmを超えていなかった。(3) FEMによる応力解析結果と測定値との一致が確認された。

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の建物外壁に発生するひびわれは、漏水の原因になるばかりでなく、美観を損ない建物全体のイメージを大きく低下させる。

コンクリート部材のひびわれ発生要因の一つに、部材の収縮変形に対する周辺部材の拘束があげられる。すなわち、一般に外壁には周辺に柱および大ばりが一体化さ

れているが、それらの収縮の速度は部材断面が大きいくことにより外壁とは異なる。なかでも、地中ばりは部材断面が特に大きいばかりでなく、地盤面下の比較的湿潤な環境下にあるため、収縮の絶対量も小さく、1階外壁の収縮変形に対する拘束作用は特に大きいと思われる¹⁾。また、この拘束作用により外壁に生ずる引張応力は建物の端部ほど大きく、通常、建物の低層外端部に見られる逆八字形ひびわれの主要な原因の一つになっていると考

えられる。

当報告は、以上の理由から、外壁のひびわれを低減するため、建物の地中ばりにプレストレス（以後 PS と略す）を導入し、その緊張効果を確認するために実施した、壁体および地中ばりの応力・ひずみ挙動の計測結果を示したものである。また同時に、目視によるひびわれ調査、および弾性応力解析による結果と実測値との比較検討も行なっている。

2. 計測概要

2.1. プレストレス導入計画

対象とした建物は RC 造地上 5 階の工場建物で、東西約 40 m、南北約 100 m の比較的大規模な構造物である。図-1 に基礎伏せ図を示す。同図に矢印で示したが、④⑩通りの地中ばりには PC 鋼材をそれぞれ 8 本、①②③④通りの地中ばりにはそれぞれ 9 本を直線配置した。使用した PC 鋼材は、アンボンド PC 鋼より線 ϕ 17.8 B 種で、1 本につき 28.6 ton の緊張力を導入した。導入力を地中ばりの断面積で除した応力の計算値は、①②③④通りの地中ばりでは約 25~34 kg/cm²、④⑩通りでは約 30 kg/cm² である。アンボンドテンドンの緊張は、地中ばりの材令 98 日（東壁および 1 階スラブ 75 日、1 階壁 49 日）で行なった。地中ばりの導入時コンクリート強度は、 $F_c=289$ kg/cm²、弾性係数 $E_c=2.82 \times 10^5$ kg/cm² であった。

2.2. 計測計画

以下に示す各項目について計測を行なった。

- (1) ひびわれ目視調査 全外壁について、コンクリート打込み後約 4 週と、外壁仕上げ直前にクラックスケールを用いて目視調査を行なった。
- (2) 埋め込み型ひずみゲージによるコンクリート内部のひずみ挙動の測定 PS の導入、乾燥収縮などによるコンクリート内部のひずみ変化を、埋め込み型ひずみ計を用いて測定した。
- (3) 熱電対によるコンクリート内部の温度変化の測定 埋め込み型ひずみゲージと同位置で、コンクリート内部の温度変化を測定し、コンクリート温度がひずみに及ぼす影響を調べた。
- (4) 有効応力計によるコンクリート内部の応力変化の測定 コンクリート内部の応力を有効応力計を用いて直接測定した。

図-2 に④通りの測定箇所を示す。コンクリートひずみ測定は地中ばりで 3 箇所、東壁 1 箇所、1 階外壁 2 箇所の計 6 箇所、温度測点は地中ばり 3 箇所、東壁 2 箇

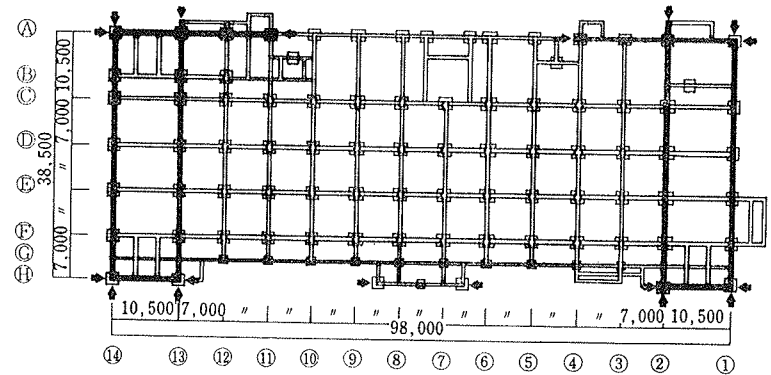


図-1 基礎伏せ図

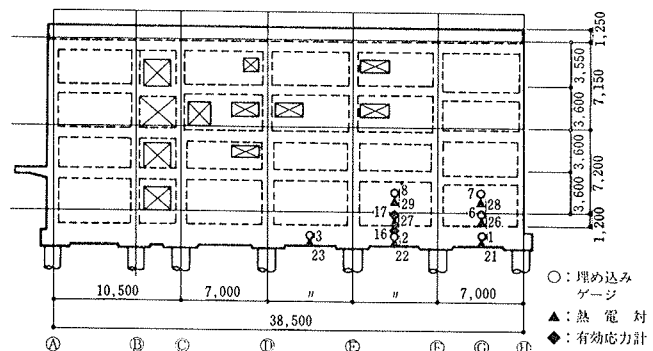


図-2 ④通り計測点

所、1 階外壁 2 箇所の計 7 箇所、有効応力計は地中ばり、東壁各 1 箇所の計 2 箇所である。

(5) ダミー試験体 図-3 に示すダミー試験体を

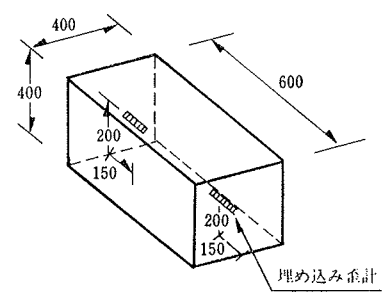


図-3 ダミー試験体

1 階壁の打ち込み日を合わせ 1 体製作し、埋め込みゲージを 2 箇所に設置し、コンクリートの自由収縮ひずみを測定した。

3. 計測結果

3.1. コンクリートのひずみ挙動

3.1.1. 地中ばりコンクリートのひずみ挙動 打ち込み後、約 6 時間経った時点でのひずみ値を原点とし、その後のコンクリートひずみの動きを整理し、図-4 に④通り④-⑥間のひずみ挙動を、図-5 に④通り④-⑥間のひずみ挙動を示す。同図より、地中ばりコンクリートについて以下のことが分かる。

- (1) 材令 2 日以降のコンクリートひずみは圧縮ひずみから反転して引張ひずみを生じており、この引張ひずみは最大 100×10^{-6} 程度である。また、④-⑥間では有効

応力計を用いて直接コンクリート応力を求めているが、材令3日で7~10 kg/cm²という大きい引張応力が得られており、この時期に熱収縮ひびわれ発生の可能性が高いことを表している。

(2) 地中ばりの材令27日において、東壁・床スラブのコンクリートの打ち込みを行なっているが、地中ばりコンクリートはこの影響をかなり受けている。

(3) PS 導入前における地中ばりには、図-4では引張ひずみが生じ、図-5でも圧縮ひずみとは言うもののごくわずかしか生じていない。これは地面に接していることもあって、あまり収縮変形が進行していないことを示している。

(4) 緊張完了直後のひずみについては後述するが、緊張後のひずみ挙動はダミー試験体に類似した収縮傾向を示していることにより、導入力による強制変形量はほぼ維持されていると思われる。

3.1.2. 東壁コンクリートのひずみ挙動 図-4に示すように、地中ばりの材令23日で東壁のコンクリートを打ち込んだが、打ち込み後のひずみ挙動は地中ばりの場合とよく近似している。

(1) 東壁コンクリートの打ち込み後1日間は圧縮ひずみを生ずるがその後反転して、引張ひずみを生じており、最大引張ひずみは 100×10^{-6} 程度(材令7日前後)である。これは熱収縮が地中ばりにより拘束され生じた引張ひずみと考えられる。また、後述するように、材令1箇月でのひびわれ観察からも、幅が0.05~0.10 mm程度の微小なひびわれの発生が認められた。

(2) 東壁コンクリートは緊張後約50日間は圧縮ひずみが増加しているが、その後圧縮ひずみは減少している。これは、乾燥収縮の進行により、東壁に地中ばりの拘束による引張応力が発生したためと思われるが、東壁の材令約275日(緊張後約200日)の引張ひずみは 6×10^{-6} と小さい。

3.1.3. 1階外壁コンクリートのひずみ挙動 1階壁体コンクリート打ち込み時の地中ばりの材令は49日、東壁の材令は26日であった。図-4および図-5で示した壁体コンクリートおよび、同時に作成したダミー試験体のひずみ挙動より以下のことが分かる。

(1) 図-5の壁体のひずみは材令3日で 120×10^{-6} の引張ひずみを生じており、これは同材令でのコンクリート引張限度ひずみを上回っている恐れがある。後述するように、実際にはこの位置でのひびわれは認められなかったが、同じ⑭通り外壁面の壁厚40 cm部分に幅0.05 mmの熱収縮によると思われる初期ひびわれが発生していた。

(2) 図-4および図-5では、緊張後の壁体のひずみ

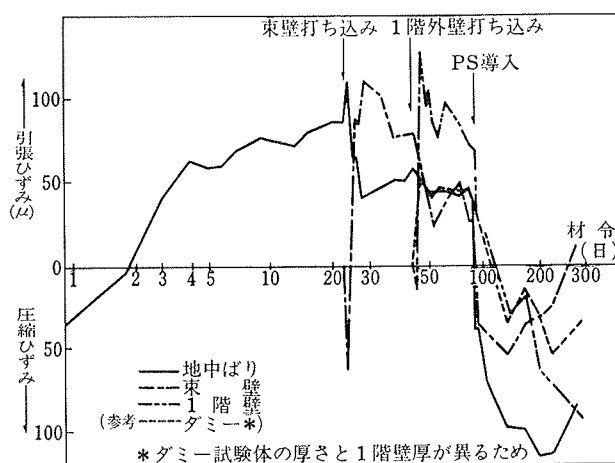


図-4 ⑭通り⑤-⑥間のひずみ挙動

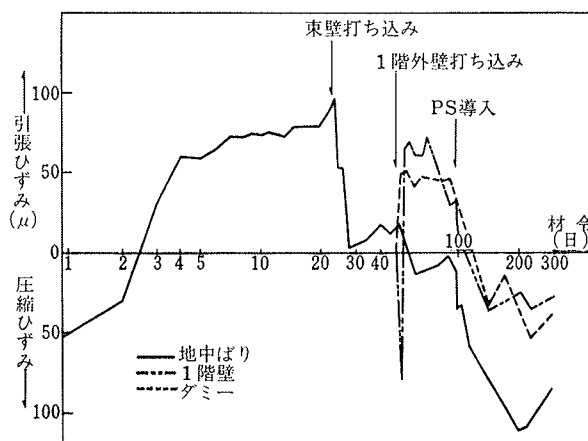


図-5 ⑭通り⑥-⑦間のひずみ挙動

挙動は、ダミー試験体のそれと類似しており、地中ばりの変形拘束が、この位置まで及んでいないことが分かる。

3.2. PS 導入時の測定結果

図-6は⑭通り⑥-⑦間および⑤-⑥間断面の地中ばり・東壁・1階壁のひずみ変化量を緊張前のひずみを0として示したものである。同図によれば、ひずみの大部分は⑭通りの地中ばり緊張の間に発生し、緊張後18時間を経てもほとんど変動がないことが分かる。また、圧縮試験により得られた弾性係数: $E_c = 2.82 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ を用いれば、導入された圧縮応力は、緊張端に比較的近い⑥-⑦間の断面において、地中ばり: 20 kg/cm², 東壁: 11 kg/cm², 1階壁: 6 kg/cm² スパン中央に近い⑤-⑥間では、地中ばり: 7 kg/cm², 東壁: 6 kg/cm², 1階壁: 3 kg/cm²であった。

3.3. コンクリートの温度変化

表-1に、東壁および1階外壁のコンクリート打ち込み温度、および材令1日前後に得られたコンクリート内部の最高温度を示す。この表によれば、打ち込み時からのコンクリート温度の上昇は、厚さ40 cmの壁で最高約

21℃に達している。

3.4. コンクリートひずみの日変化

外気温の変化により生じるコンクリートの自己応力を調べるため、比較的気温の日変化が大きい日に関して、コンクリートひずみの動きを求めた。測定日はPS導入後7日である。図-7に、得られた温度変化により壁体に生じる拘束ひずみと時刻との関係をAM 7:00のひずみを0として示す。同図によれば、ひずみの日変化に及ぼす壁厚の影響は大きく、壁厚40cmの部材のひずみ挙動は、地中ばりとは大差がないのに対して、壁厚20cmの部材は 20×10^{-6} 程度の変動がある。そのため壁厚20cmの1階壁および東壁には、弾性係数を $E_c = 2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とした場合、1日につき約 4 kg/cm^2 の温度応力変動が生じるものと思われる。

3.5. ひびわれ調査結果

図-8に緊張前の㊸通り外壁のひびわれ調査記録を示す。ひびわれ調査は各階コンクリート打ち込み後約4週で行なったもので、ひびわれ幅の測定にはクラックスケールを用いた。同図より緊張前の東壁・1階壁には数本のひびわれが発生しているが、幅が0.1mmを超えるものは生じていない。ひずみ計測の結果などから判断して、このひびわれの原因は乾燥収縮というよりむしろ熱収縮によるものと考えられる。また、外壁仕上げ直前(緊張後6週間)に再度㊸通りのひびわれ目視調査を行なった結果、材令4週時に比べひびわれ本数および幅に顕著な増加は見られなかった。

全1階外壁について、ひびわれ係数(観察区間長さL内のひびわれ幅の総和 $\sum W$ をLで除した値)を求めると、コンクリート打ち込み後4週時は 5.8×10^{-6} 、PS導入後6週時は 7.2×10^{-6} であった。これは、当社が管理の目安とする 25×10^{-6} に比べ、かなり良好な結果であることが分かる。

4. FEM解析による検討

4.1. モデル概要

図-9は解析に使用したモデルを示す。要素に記入した数字は、各要素の版厚(cm)で、記入のないものは、水平方向に隣接する要素と同じ厚さであることを示す。また、支持点はいくを表わし、演算にはそれを鉛直・水平方向のバネに置換した。バネ定数は当該建物の構造計算に用いた数値と等しい値を使用した。すなわち、くい径が1,600φの場合、鉛直方向: $K_v = 1.09 \times 10^6 \text{ kg/cm}$ 、水平方向: $K_H = 6.24 \times 10^6 \text{ kg/cm}$ と仮定し、同様に、1,400φの場合、 $K_v = 0.93 \times 10^6 \text{ kg/cm}$ 、 $K_H = 5.80 \times 10^6 \text{ kg/cm}$ とした。

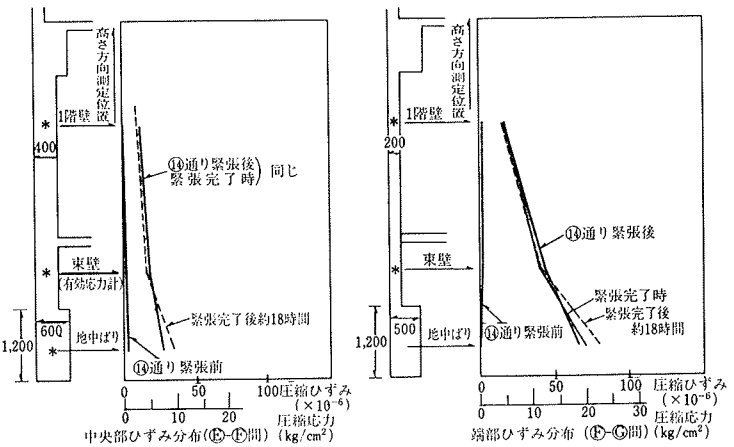


図-6 PS導入時のひずみ変化

部材 (厚) cm	東壁 (40)	東壁 (20)	1階壁 (40)	1階壁 (20)
打ち込み温度(1)	26.0	26.4	27.8	28.5
最高温度(2)	47.0	38.6	48.3	41.8
差 (2)-(1)	21.0	12.2	20.5	13.3

表-1 打ち込み温度と最高温度(℃)

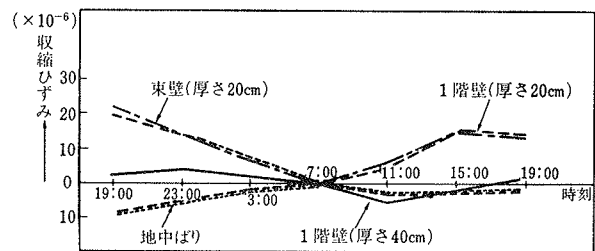


図-7 ひずみの日変化

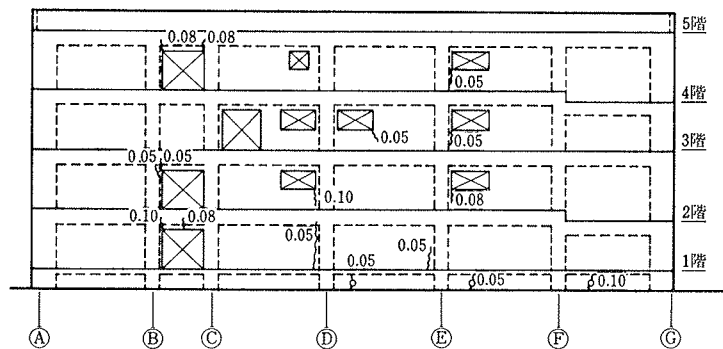


図-8 ひびわれ調査結果(単位: mm)

4.2. 応力の算出

図-10は、PS導入力による主応力を示したものであるが、東壁・1階壁端部には、八字形に圧縮力が作用し、地中ばりにPSを導入することが、乾燥収縮による逆八字形ひびわれの低減に有効であることが分かる。

4.3. 計測結果との対応

図-11は、導入された応力の水平成分を表わしたもので、同図中に埋め込みゲージによるひずみと、導入時弾性係数を用いて算出した応力の測定値も示している。両者は良く一致しており、解析結果は実構造物の応力状態をうまくとらえていると思われる。

5. まとめ

外壁のひびわれを低減する

ため、地中ばりにプレストレスを導入した建物について行なった計測および応力解析の結果、以下のことが分かった。

(1) コンクリート打ち込み後 PS 導入までのひずみ変化によれば、地中ばりの収縮変形は小さく、あまり乾燥収縮が進行しない。

(2) 緊張完了時に導入された応力は、埋め込みゲージのひずみと圧縮試験で得た $E_c = 2.82 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ を用いると、地中ばりで $7 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 、1階外壁では $3 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ であった。

(3) 導入後の地中ばりコンクリートのひずみ挙動によれば、導入力によって生じた強制変形量はほぼ維持されていると思われる。

(4) 外気温の日変化により生じるコンクリート内部の応力の日変動幅は、壁厚 20 cm の部材で、約 4 kg/cm^2 程度であることが分かった。

(5) PS 導入前のひびわれ目視調査において、1階壁・東壁ともに幅 0.1 mm 以下の若干のひびわれが発見された。導入後 6 週時の調査結果をこれと比較すると、ひびわれ本数およびひびわれ幅の増加はわずかであった。

(6) FEM 解析によって、地中ばりに PS を導入した場合の各部分の応力状態を算出した結果、解析値は測定値とよく一致することが確認された。

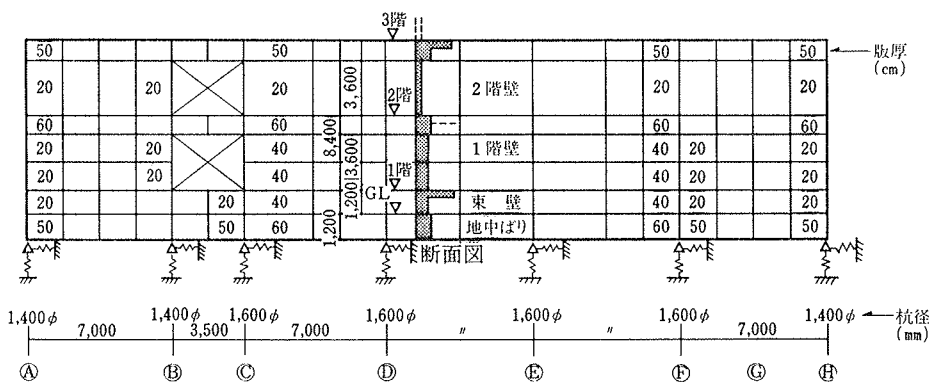


図-9 解析モデル

	- 1.3	-	-	-	-	-	-	-	-
2階壁	- 2.7	-	-	-	-	-	-	-	-
	- 4.1	-	-	-	-	-	-	-	-
1階壁	- 4.7	-	-	-	-	-	-	-	-
	- 5.9	-	-	-	-	-	-	-	-
東壁	- 6.8	-	-	-	-	10.9	10.4	9.4	-
地中ばり	- 7.5	-	-	-	-	15.3	15.9	19.6	24.7
						16.9	20.0	24.2	30.1

図-10 導入力による主応力度 (kg/cm^2)

2階壁									
1階壁	4.7	4.9	4.8	③ 4.4	3.9	5.9	⑥ 4.6	2.5	0.4
	5.9	6.0	6.2	6.1	5.9	9.7	8.5	6.4	2.0
東壁	6.8	6.9	7.5	8.0	8.7	13.9	⑪ 14.3	14.8	15.1
地中ばり	7.5	7.7	8.5	⑦ 10.1	11.0	16.9	⑫ 19.9	24.1	30.0

図-11 応力度 (σ_x) の比較 (kg/cm^2)

参考文献

1) 鈴木, 大野, 三浦: プレストレッシングによるコンクリート壁体のひびわれ制御, 日本建築学会近畿支部研究報告集, (昭和161年), pp. 25~28