

アンボンドフラットスラブ PRC 工場の設計と施工

池 田 憲 一*
藤 井 忠 義**

1. はじめに

フラットスラブ構造は、欧米の地震のない地域ではいたるところで多く用いられているが、地震の多い日本では耐震的な面からあまり用いられていない。

しかし、最近ではコンクリート、鉄筋等の資材よりも型枠大工や鉄筋工等の労務費の上昇が著しく、梁がなく型枠作業も配筋作業も簡単なフラットスラブ構造が見直されてきている。

このフラットスラブ構造の床版にアンボンド PC 鋼線を配して緊張し、フラットスラブ構造の特長を大きく引き出したのが「アンボンドフラットスラブ工法」である。

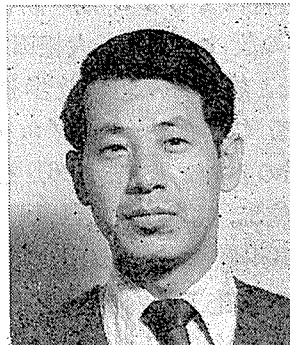
ここでは、このアンボンドフラットスラブ工法を採用



写真—1 建物の全景



* Kenichi IKEDA
清水建設（株）設計本部
構造開発部



** Tadayoshi FUJII
清水建設（株）技術研究所
構造開発部

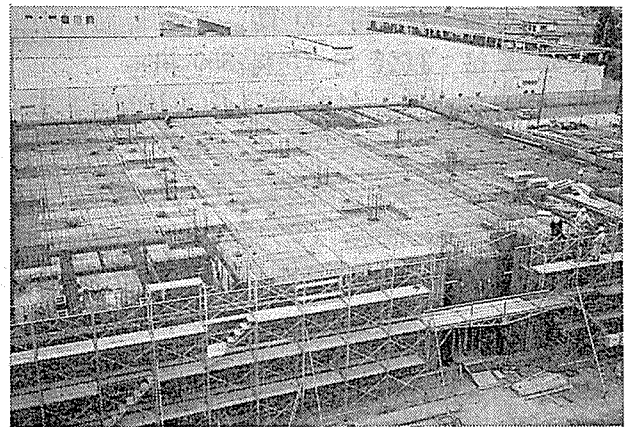
した建物の設計から施工までを、プレストレス関係を中心に紹介する。

2. 建物概要

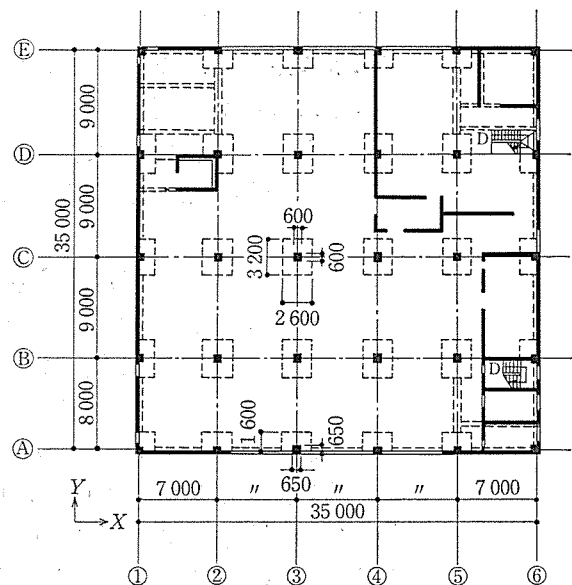
写真—1 に竣工時の建物の全景を、写真—2 に施工中の状況を示す。また 図—1 に基本平面図を、図—2 に軸組図を示す。

工事名称：東京田辺製薬（株）足利工場注射剤棟

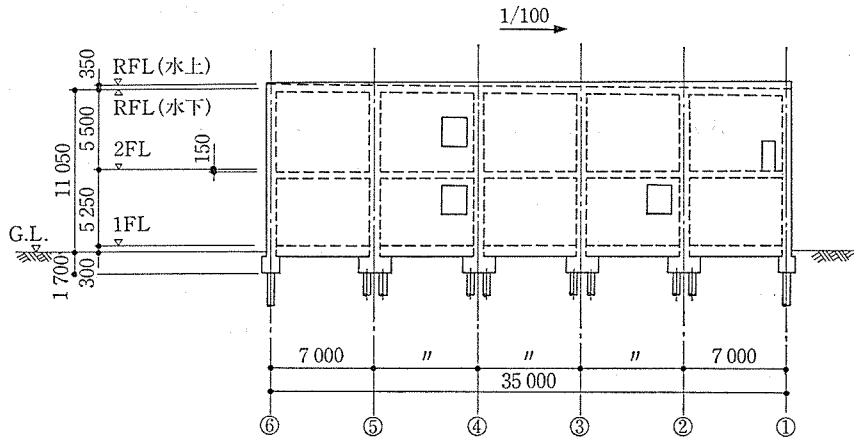
工事場所：栃木県足利市久保田町 558-3



写真—2 施工中の建物の状況



図—1 基本平面図（2階床梁伏図）



図—2 軸組図 (⑥ 通り)

設計：清水建設 (株)
 施工：同上
 建物用途：工場
 建物規模：地上2階建
 建築面積 1635.7 m²
 延床面積 2888.8 m²
 構造：鉄筋コンクリート造 (ただしスラブはアンボンドフラットスラブ)
 竣工時期：昭和 62 年春

3. 設計

3.1 構造計画

(1) 構造形式の選択

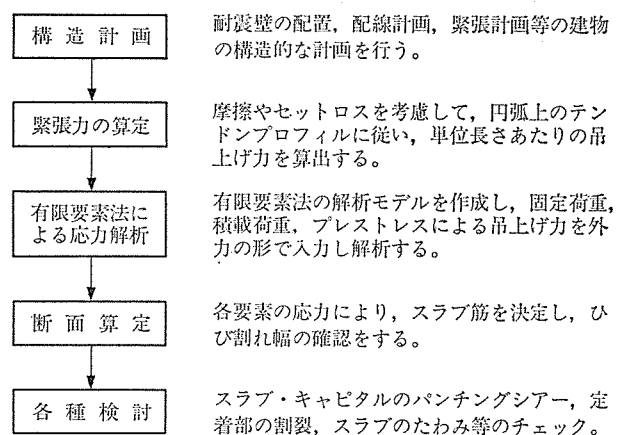
本建物の構造形式は、以下の理由から「アンボンドフラットスラブ構造」とした。

- 1) 建物の用途は注射剤を扱っている工場であり、内部はクリーンルームになっているため、設備配管が天井裏に数多く配管されている。このため、一般柱・梁構造では梁が配管上の障害となる。
- 2) 建物の外周は、用途上、正面の入口部分を除いて開口部が少ない。このため、フラットスラブ構造を選択した場合でも、地震力はこの外周部の壁で処理できる。
- 3) 比較的建設工期も短く、型枠大工や鉄筋工の不足により、手間にかかる梁の型枠や配筋作業を減らす必要があった。
- 4) 基本スパンが 7m×9m と比較的大きく、プレストレスを導入しないフラットスラブではたわみ等の問題が生じる。

(2) 構造設計のフロー

図—3 に構造計画から設計終了までの設計フローを示す。

(3) 設計上の留意点



図—3 構造設計の概略フロー

構造計画上、特に配慮したことを以下に示す。

- 1) 地震力はそのほとんどを外周部の壁で処理する。ただしフラットスラブ部分は、地震時の層間変形に追従できるように設計する。
- 2) 内部のコンクリート壁は極力少なくし軽量間仕切とし、フラットスラブの力学的明解さを追求する。
- 3) 柱上部には支板となる 2.6m×3.2m のキャピタルを設ける。
- 4) キャピタル厚と同じせいの梁を外周部に設け、耐震要素としての外周壁を成立させる。
- 5) フラットスラブ構造とするのは2階床とR階床とし、1階床は地中梁を設け在来工法とする。
- 6) 階段等の開口部周辺には梁を設ける。
- 7) 屋根は片流れとし、ドレーンの貫通を一辺だけに設けた。

その他構造設計上の特徴を以下に示す。

設計ルート：X, Y 方向ともルート I

積載荷重：2階 300 kg/m²

屋根 180 kg/m²

使用材料：コンクリート強度 $F_c=240 \text{ kg/cm}^2$

鉄筋 SD 30, SD 35
 PC 鋼線 SWPR 19
 19 本より 17.8 mm

図—4 に鋼線の配線の状態を示す。PC 鋼線の配線は X, Y 両方向に行い、柱付近に集中させた。また、柱列帯には 2 本束を採用し、柱間帯には 1 本ものを採用し、7 m×9 m グリッド内に各方向とも 10 本配線した。PC 鋼線の量は、固定荷重と積載荷重の和の約 20% をキャンセルするように設定した。

テンドンプロフィールは、吊上げ力の反力ができるだけ柱内に流れるように決定した。

緊張は片引きとし、くさび定着とした。また、目標最大ひび割れ幅は 0.2 mm に設定した。

設計は、以下の指針に基づいて行った。

- 「プレストレストコンクリート造設計施工指針・

1983 年版」日本建築センター

- 「プレストレスト鉄筋コンクリート (Ⅲ種 PC) 構造設計・施工指針・同解説」日本建築学会

3.2 緊張力の算定

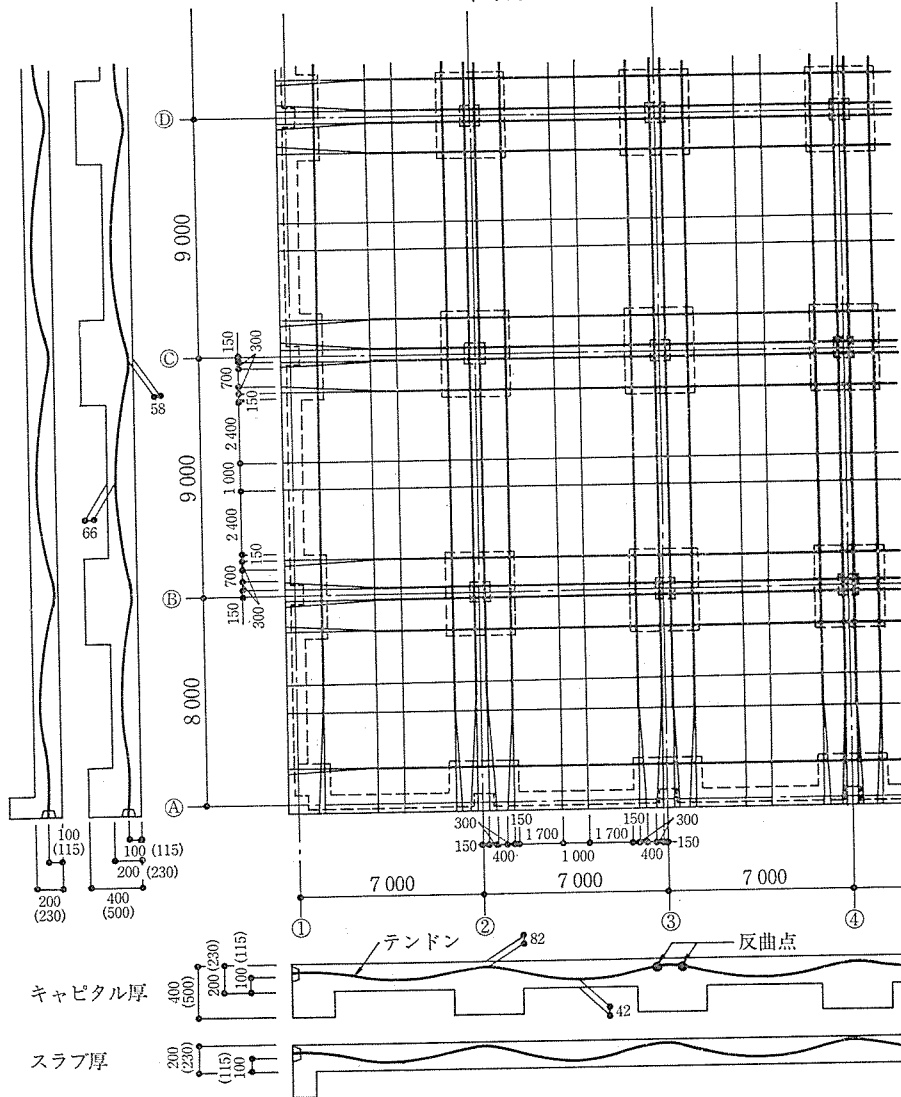
テンドンは曲率半径の異なる 2 つの円弧から成っている。最初にそれぞれの曲率半径を求め、1 本のテンドンの角度変化を求めた。次に、セットロス を考慮しながら 1 本のテンドンの緊張力の平均を求め、この平均値を用いて以降の解析を行った。

プロフィール上テンドンはすべて円弧で構成されているため、吊上げ力の算出はリングテンションの求心力の算出と同じ考え方で行った。

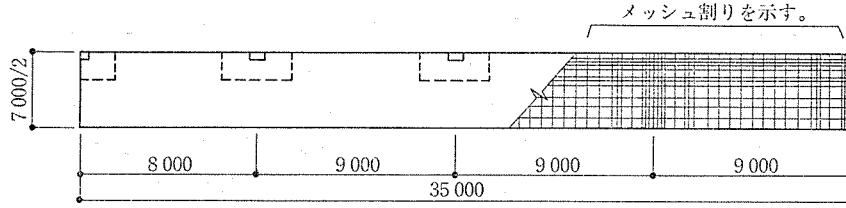
3.3 応力解析

応力解析は有限要素法プログラム「NASTRAN」を用いた平板解析を行った。図—5 に解析モデルを示す。

注) — は 2 本束
 — は 1 本物を示す
 () 内寸法は 2 階部分を示す



図—4 テンドン配線図 (R 階)



図—5 有限要素法解析モデル図・メッシュ割り図

メッシュ割りは応力の急変する柱頭部付近を細かく行った。求めた吊上げ力およびその反力は外力の形で各要素に入力した。

建物用途上やむをえずコンクリートあるいはコンクリートブロック壁を設けた箇所については、これを外力として解析モデルに入れて解析した。

3.4 断面算定

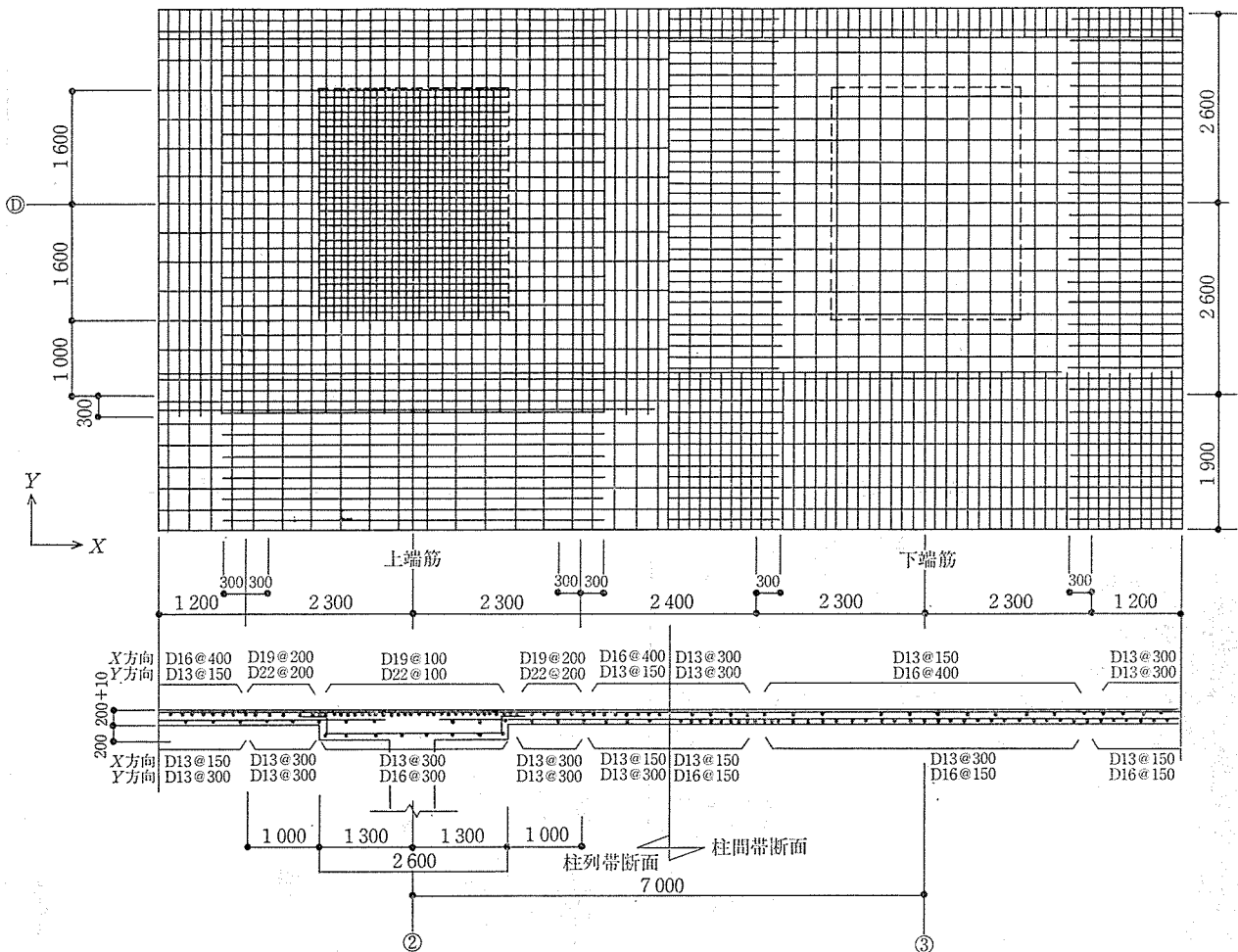
断面算定は応力解析によって算出された各要素の応力に従って行った。このとき、荷重の組合せは以下のように取り扱った。

$$\bullet \max \left\{ \begin{array}{l} 1.2G + 2.0P - 1.0PS \\ 1.7(G + P) - 1.0PS \end{array} \right\} \dots \text{応力チェック用}$$

• 1.0G + 1.0P - 1.0PS ……ひび割れチェック用
ここで、PS：プレストレスによる応力

また、ひび割れのチェックは断面算定に用いた要素すべてについて行い、最大ひび割れ幅が0.2mm以下であることを確認した。

今回の解析は有限要素法による弾性解析であるので、竣工後コンクリートのひび割れ等による応力の再配分が生じスラブ中央に解析値以上の応力が働くことが予想されるため、この部分のスラブ下端筋はRC規準の設計式に従って算出した応力（解析値の約2倍）に耐えるように配筋した。図—6 に配筋の状態を示す。



図—6 R 階スラブ配筋図

3.5 設計のまとめ

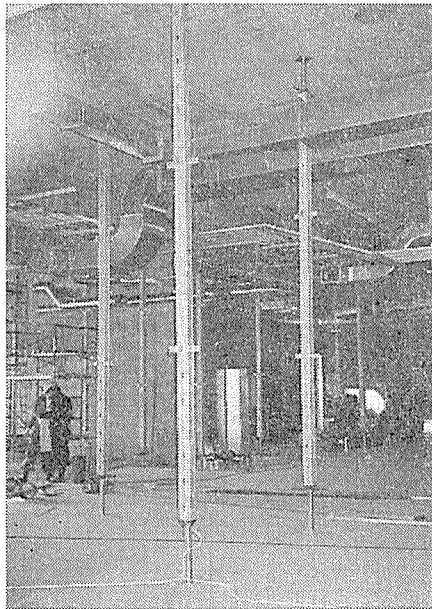
この構造の場合、弾性解析によると柱頭部付近に応力の集中が起こり、解析値どおりに配筋した場合、コンクリートのひび割れ等による応力の再配分によってスラブの中央下端は鉄筋不足、柱頭部付近は過剰設計となる。この応力の再配分を定量的に把えて実際の設計に生かすことが前向きな設計努力であると言える。

また建物の階高を決定するキャピタルのせいは、パンチングシアによって決定される場合が多く、これらの問題点を合理的に解決することによって、キャピタルのないフラットプレート構造が安全に実現すると思われる。

4. 施 工

4.1 支保工、型枠、鉄筋工事

支保工には階高が高いことから、在来のパイプサポートの代わりに角形鋼管のスーパー支柱を用いた（写真—3）。これによりパイプサポート数が在来の約1/4となり



写真—3 スーパー支柱

広い作業空間を確保できた。また、床型枠受けには鋼製トラス（ホリービーム）を使用した。床型枠は作業荷重が小さく、また、建物規模が小さいためフライングシヤを用いずに一般の合板型枠とした。壁型枠には大型のシャタリング型枠を使用した。

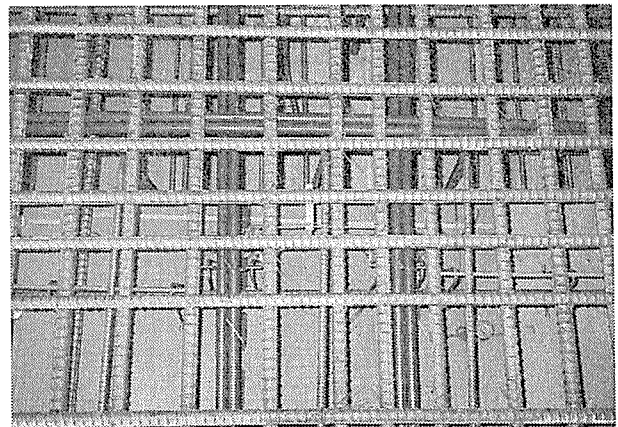
鉄筋は建設地に余裕があったので、主として現場組みの先組み鉄筋を使用した。キャピタル部分の配筋状況を写真—4 に示す。

4.2 PC 鋼材の配線

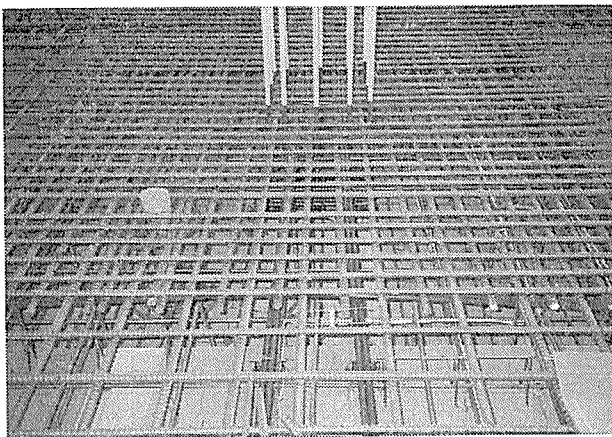
使用した PC 鋼材は SWPR 19, 19 本より、 $\phi 17.8$ mm のシーストストランド（アンボンド PC 鋼より線）である。その配線はスラブ下端筋の配筋後行い、テンドン位置の確保のため、柱頭付近の曲率半径が小さい所は要所を上端鉄筋に結束し、その他の位置ではパー型スペーサーで支持した。

柱列帯では PC 鋼線の数が 8 本と多いことから 2 本束で使用し、固定端、緊張端の両端部で Y 字形に分岐させて配置し、柱間帯に存在する 2 本のストランドは 1 本ずつ配置した（写真—5）。

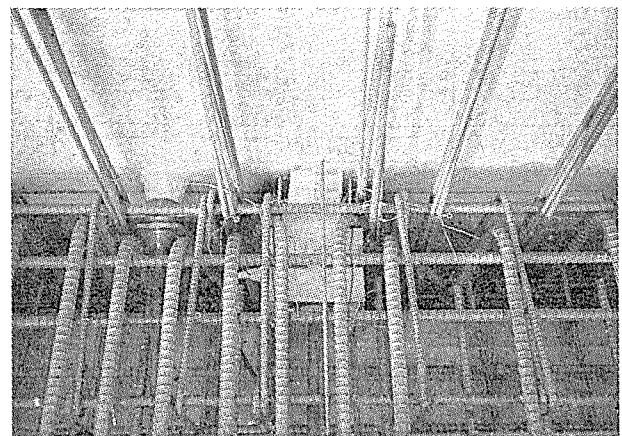
端部の定着具は、固定端は圧着グリッパ（ $\phi 35$, 長さ 90 mm）とアンカープレート（ $100 \times 180 \times 28$ mm）で U



写真—5 テンドンの 2 本束の配置



写真—4 キャピタル部分の配筋状況



写真—6 緊張端の型枠との固定状況

字形ボルトで圧着グリッパ部を固定した。緊張端にはキャストイング(82×187 mm, 高さ 140 mm) を使用しプラスチック製のポケットフォーマーを介して壁型枠に固定した(写真—6)。

4.3 コンクリート工事

本構造物は PRC 造であることから設計基準強度 $F_c = 240 \text{ kg/cm}^2$, スランプ 21 cm (ベーススランプ 15 cm を流動化して 21 cm にしたもの) の普通コンクリートを打設した。打設はまず柱・壁を打設し, 次にキャピタル部, 最後にスラブを打設した。

4.4 緊張工事

緊張は 200 kg/cm^2 以上のコンクリート強度が発現後行った。緊張はテンドン数が X 方向 36 本, Y 方向 46 本と多いことから, X 方向, Y 方向ともに各々 1 台の緊張用ジャッキを使用して行い, X, Y 方向ともに端部のストランドから反対側の端部のストランドに向かって順次片引きで緊張, 定着した。

緊張方法は CCL 工法で, 能力 30 t の KM-30 型ジャッキを使用し, 端部緊張力は 27.7 t, 中央部の設計用導入力は 25.6 t である。緊張力の計算に当たっては摩擦係数を $\mu=0.06$, $\lambda=0.002$ とし, セットロス は 4 mm

とした。緊張管理は“ δ 管理法”で行い, 伸びが計算値の +5% 以内の許容範囲内に納まっていることを確認した(写真—7, 8)。

緊張後, PC 鋼より線の余長をグラインダーで切断し緊張端部のポケットフォーマー除去後の凹部を無収縮モルタルで充てんした。

5. 計 測

5.1 目 的

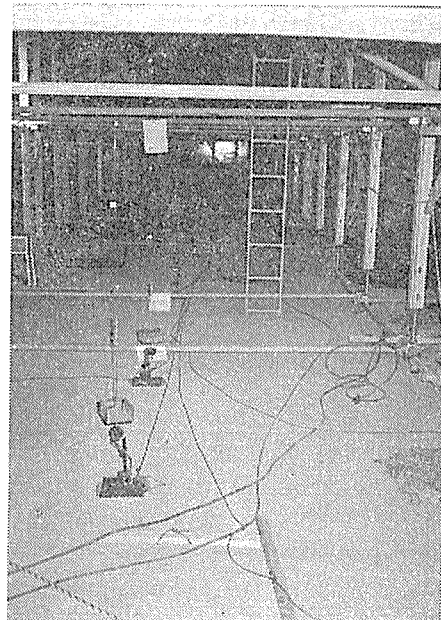
アンボンドフラットスラブの緊張時の構造挙動を明らかにし, 所要の緊張力が導入されているかどうかを明らかにすること, および施工中の支保工に作用する荷重を求めること等を目的に計測を行った。

5.2 項目, 位置, 方法

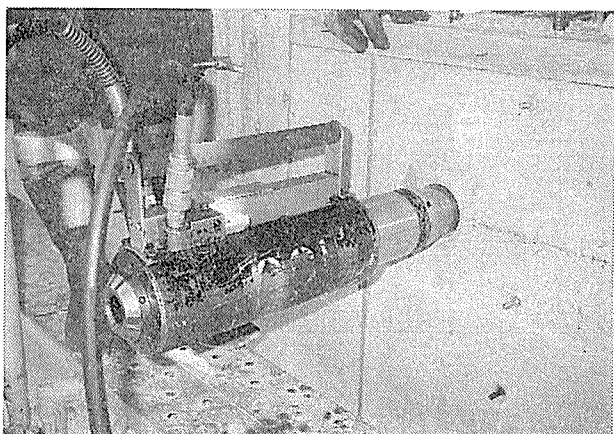
計測項目は, ①スラブの変位, ②スラブのコンクリートひずみ(応力), ③ストランドの緊張力, ④支保工の



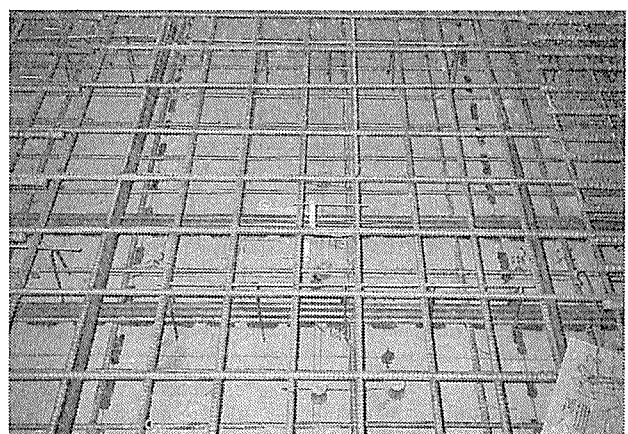
写真—7 緊張端の状況



写真—9 スラブのむくりの電気式ダイヤルゲージによる測定状況



写真—8 ジャッキによる緊張状況



写真—10 スラブ中に埋設したモールドゲージ

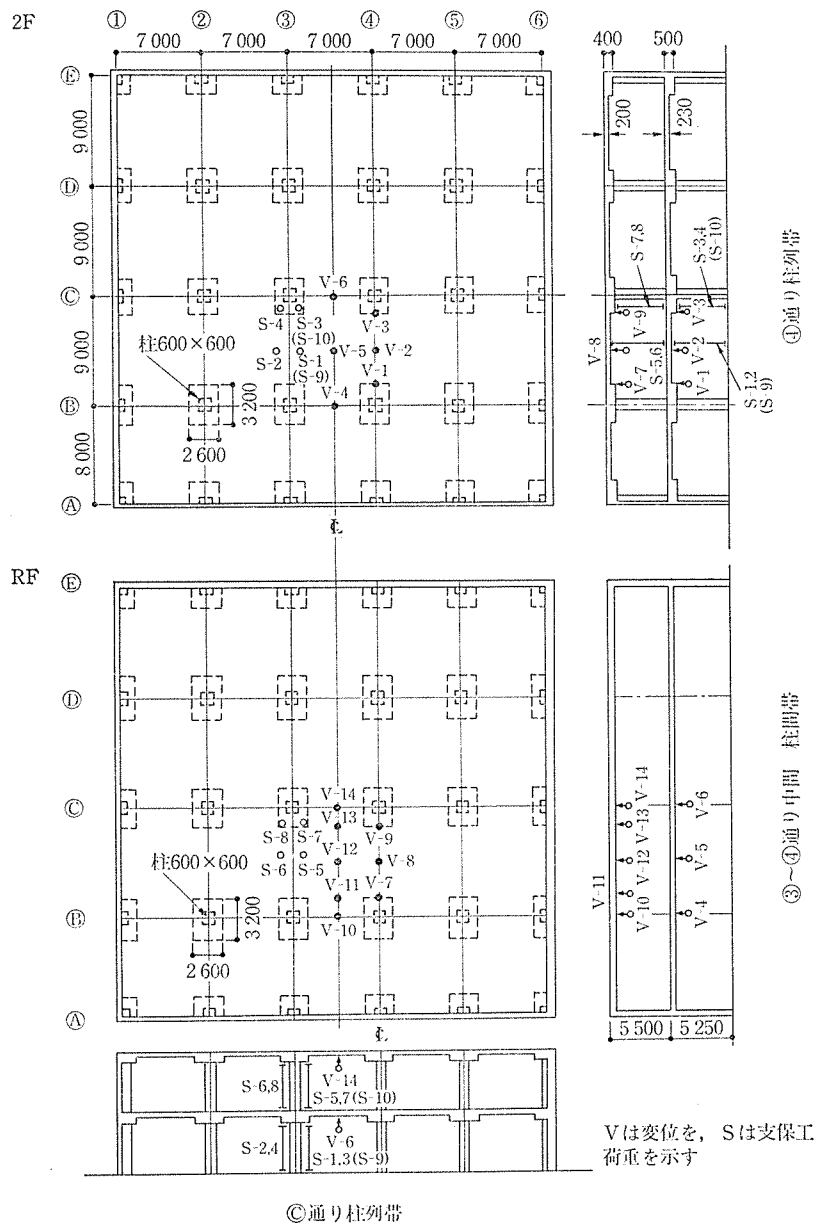


図-7 スラブのむくり, 支保工荷重の測定位置

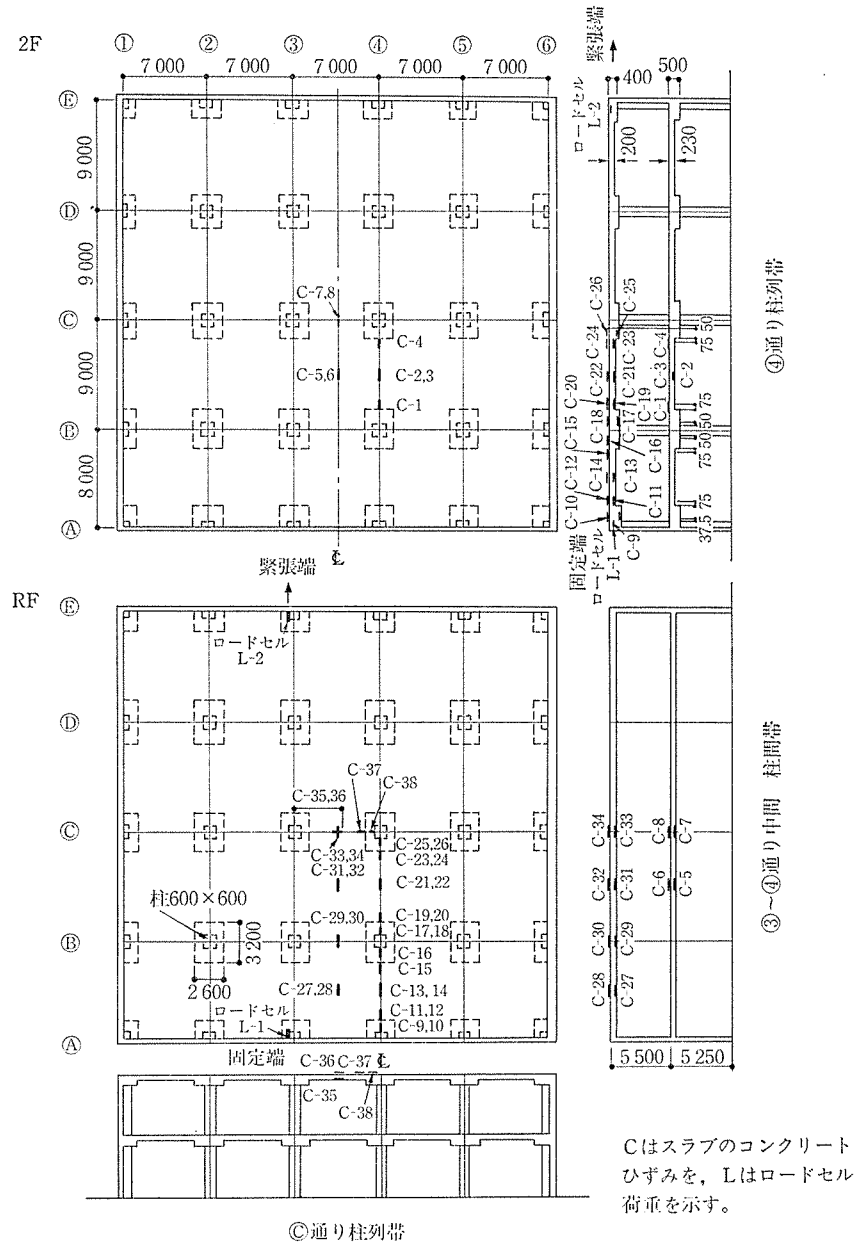


図-8 スラブのひずみ, ストランドの緊張力の測定位置

作用荷重等である。

計測位置は 2, R 階スラブで, X, Y 方向の中央の通りの柱間帯, 柱列帯で, その位置を 図-7, 8 に示す。

計測の方法は, スラブの緊張時のむくりは電気式ダイヤルゲージにより行い, コンクリートのひずみ(応力)はスパンの中央, 端部(スラブまたはキャピタル部)のコンクリート中に埋設したモードゲージにより測定した。ストランドの緊張力はストランドの緊張端, 固定端に容量 30 t のロードセルを取り付けて測定した。支保工の作用荷重の測定は, 支柱にワイヤーストレインゲージを貼付して行った。

5.3 結果と考察

計測結果のすべてを記述するのは頁数の関係で無理なので, 以下に代表的なものについて示す。

(1) スラブの変位

スラブの緊張によるむくりを 図-9 に示す。スラブは緊張によりむくりを生じ, 柱列帯のむくりより柱間帯のむくりの方が大きい。最大のむくりは③, ④通り間の柱間帯のスパン中央位置で 1.03 mm である。しかし緊張によるスラブのむくりは, スパン 7~9 m を考慮するとほとんど無視できるオーダーである。

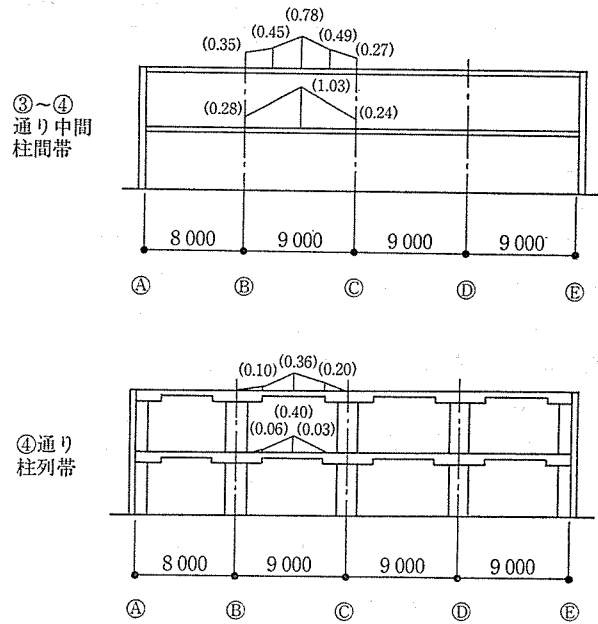
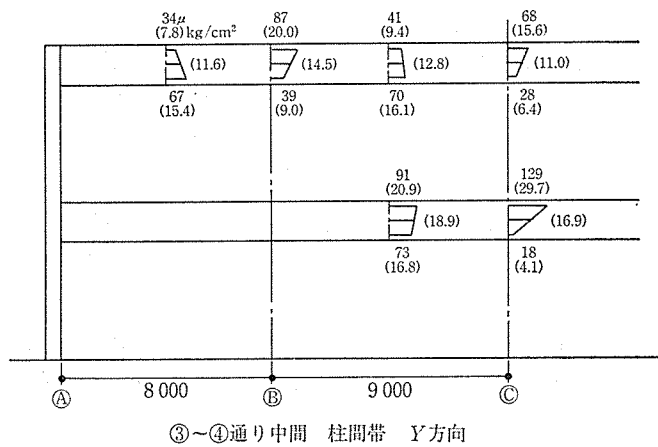


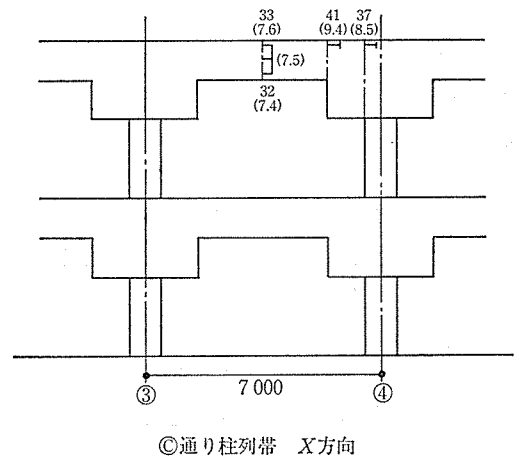
図-9 緊張によるスラブのむくり (mm)

(2) スラブのコンクリートのひずみ(応力)

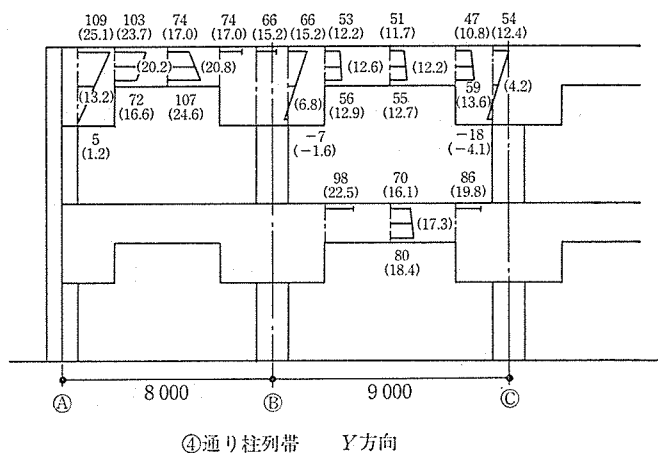
スラブのコンクリートひずみは, スラブ(厚さは2階 23 cm, R 階 20 cm) およびキャピタル(スラブを含



③~④通り中間 柱間帯 Y方向



④通り柱列帯 X方向



④通り柱列帯 Y方向

上側: ひずみ($\times 10^{-6}$)
下側(): 応力(kg/cm²)

図-10 スラブ, ドロップパネルへの導入ひずみ(応力)

表—1 2階, R階スラブの導入プレストレスの計算値

位置	方向	導入プレストレス P (t)	スラブ厚 (cm)	スパン (スラブ幅) (cm)	スラブ断面積 A (cm ²)	平均プレストレス $\sigma = P/A$ (kg/cm ²)	プレストレスの値 (kg/cm ²)
2階	X方向	256	23	900	20700	12.4	—
	Y方向	256	23	700	16100	15.9	
R階	X方向	256	20	900	18000	14.2	7.5
	Y方向	256	20	700	14000	17.4	11.0~20.8

めたキャピタルの厚さは2階 50 cm, R階 40 cmで, 幅は 2.6×3.2 m)の上端, 下端から 30~35 mm の鉄筋位置に埋設したモールドゲージで測定したもので, 結果を 図—10 に示す。同図中にはコンクリートのヤング係数 E を建築学会式から下式で求め, 測定したひずみ ϵ (×10⁻⁶) から計算した応力 σ (kg/cm²) も示す。

$$E = 2.1 \times 10^5 \times \left(\frac{r}{2.3} \right)^{1.5} \times \sqrt{F_c/200}$$

$$= 2.1 \times 10^5 \times \sqrt{240/200} = 2.30 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

得られた応力は, ストランドの配置形に沿って大きい応力の分布状況を示す。スラブ部分には 10~20 kg/cm² の平均圧縮応力が導入されており, キャピタルの上端にも 10~25 kg/cm² の圧縮応力が導入されているがキャピタルの下端には圧縮応力が導入されておらず, 逆にわずかな引張応力が見られる箇所もある。また, 吊上げ力によってスラブに生ずるモーメントは, ほぼ解析値どおりであった。

表—1 は1スパン当たり 10 本のストランドがあり, 平均緊張力 (1ケーブル 25.6 t) がスラブ全面にわたって均等に分布していると仮定して求めた導入プレストレスで, 実測した応力とは一応合っていると言える。

多スパンのアンボンドフラットスラブ構造では, 中央スパン近傍では吊上げ力は働くがスラブの軸圧縮応力は極めて小さいと言われているが, 実際には中央スパンのスラブにも軸圧縮応力が導入されている。この導入プレストレスが積載荷重による曲げ応力に対し有効に働くとと言える。

(3) ストランドの緊張力

緊張および以後の緊張力の変動を示すと表—2 のようである。緊張により生じたクサビ定着後の緊張力は, 緊張端で 25.29 t, 固定端で 25.49 t であり, これは計算値の緊張端 25.4 t, 固定端 24.7 t に対し各々 25.29/25.4=1.00, 25.49/24.7=1.03 となり, 緊張端では一致しているが, 固定端では実測値の方が計算値より約 3% 大きい。これは計算で採用した摩擦係数, $\mu=0.06$, $\lambda=0.002$ が多少大きすぎたためと思われる。

しかし, 全局的には所定の緊張力が導入されていると言える。また緊張後 21 日で緊張力が 2~3% 減少している。

表—2 緊張端, 固定端のロードセル荷重

測定時点	緊張端 P _T (t)	固定端 P _F (t)	P _T /P _F
ジャッキ荷重 0 t	0	0	0
” 6	6.25	4.76	1.31
” 12	11.79	10.57	1.12
” 18	17.44	16.13	1.08
” 24	22.84	21.66	1.05
” 27.7	26.69	25.52	1.05
クサビ定着後	25.29	25.49	0.99
全ケーブル緊張後	24.92	25.16	0.99
緊張後 21 日	24.05	24.57	0.98

() 対緊張後 (96.6%) (97.7%)

(4) 支保工の作用荷重

緊張, コンクリート打設時に柱列帯に設置した支保工 (スーパー支柱) に作用している荷重を示すと表—3, 4 のようである。

表—3 によれば, 2階スラブのコンクリート打設による支保工の作用荷重の増大量は, スラブ中央下 3.411 t, キャピタル端部下 1.613 t で, スラブ中央下の支保工の荷重増大が大きい。緊張による荷重の減少は, スラブ中央下 1.194 t, キャピタル端部下 0.087 t で, スラブ中央下の支保工の荷重減少が大きい。

支保工に作用する最大荷重はコンクリート打設直後より緊張直前の方が大きく, これはコンクリート硬化後にスラブ上に作業荷重が載荷されたためと考えられる。

R階のコンクリート打設, 緊張により2階支保工, 1階支保工に作用する荷重変動を示したのが表—4 である。

R階のスラブのコンクリート打設により, 2階支保工のみでなく, 1階支保工にも荷重が作用しており, また R階スラブの緊張により2階支保工だけでなく, 1階支保工の作用荷重も減少していることがわかる。しかし, この場合, 1階支保工の数は2階スラブの緊張後に約半分を除去しており, 2階支保工の約半分とその数が少ないことを考慮すると, R階スラブのコンクリート打設, 緊張により1階支保工に影響する荷重は2階支保工の作用荷重の約半分と言える。

5.4 計測のまとめ

アンボンドフラットスラブ構造の構造的挙動について緊張時を主に計測を行って明確にした。

計測を行った項目は, スラブのむくり, スラブのコン

表—3 2階のコンクリート打設、緊張による1階支保工の荷重変動

(単位：t)

位置	記号	コンクリート打設前 ①	コンクリート打設後 ②	緊張前 ③	緊張後 ④	コンクリート打設による増加分 ②-①	緊張による減少分 ③-④
スラブ中央下	S-1	0.502	3.728	4.414	3.093	3.226	1.321
	S-2	0.338	3.933	4.425	3.359	3.595	1.066
	平均					3.411	1.194
キャピタル端部下	S-3	0.051	1.116	1.485	1.413	1.065	0.072
	S-4	0.164	1.424	1.669	1.567	1.260	0.102
	平均					1.163	0.087

表—4 R階のコンクリート打設、緊張による1階、2階支保工の荷重変動

(単位：t)

位置	記号	コンクリート打設前 ①	コンクリート打設後 ②	緊張前 ③	緊張後 ④	コンクリート打設による増加分 ②-①	緊張による減少分 ③-④	
2階	スラブ中央下	S-5	0.348	3.708	3.953	2.970	3.360	0.983
		S-6	0.881	4.199	3.964	3.062	3.318	0.902
		平均					3.339	0.943
	キャピタル端部下	S-7	0.399	1.485	1.598	1.485	1.086	0.113
S-8		1.168	2.335	1.342	1.270	1.167	0.072	
平均						1.127	0.093	
1階	スラブ中央下	S-9	0.520	3.861	5.659	4.793	3.342	0.866
	キャピタル下	S-10	1.159	2.796	1.225	1.252	1.637	0.027

注：1階の支保工の数は2階の約半分

クリートの圧縮ひずみ（応力）、ストランドの緊張端および固定端の緊張力、支保工の作用荷重等である。得られた結果をまとめると以下のようである。

- ① 緊張時のスラブのむくりは最大 1.03 mm で、柱列帯より柱間帯の方が大きい。
- ② 緊張により生じるスラブの圧縮ひずみ（応力）はストランドの配置形状に沿った大きい応力分布を示しており、圧縮応力の最大値は、X 方向 7.5 kg/cm²、Y 方向 20.8 kg/cm² であり、Y 方向ではフラットスラブ全面にわたって 10~20 kg/cm² の圧縮応力が導入されている。実測応力はスラブ全断面が均等な圧縮応力を受けていると考えた計算値（X 方向：12.4~14.2 kg/cm²、Y 方向：15.9~17.4 kg/cm²）に比べ、一応合っていると云える。
- ③ ロードセルで測定した緊張力は、計算値（緊張端 25.4 t、固定端 24.7 t）に比べると緊張端では良い一致を示しているが、固定端では測定値の方が約 3% 大きい。これは、このような多スパンでライズが小さく直線配置に近いストランドを使用したフラットスラブ構造では計算で採用した摩擦係数 $\mu=0.06$ 、 $\lambda=0.002$ の値が大きすぎるためと云える。
- ④ スラブのコンクリート打設、緊張により支保工荷重は変動するが、スラブ中央下の支保工の方がキャ

ピタル端部下の支保工より大きい荷重変動を受ける。

支保工の作用荷重はコンクリート打設により増大し、その後スラブ上に作業荷重が載荷されるため緊張前に最大で、緊張により支保工の作用荷重は減少する。R階スラブのコンクリート打設、緊張による荷重を1階、2階支保工の両方で受ける2階受けの支保工の場合、下階の支保工は上階の支保工の作用荷重の約半分の荷重変動を受ける。

以上述べたように、本アンボンドフラットスラブ構造の施工時の計測を行い、そのむくり、導入プレストレス、ストランドの緊張力の変動、支保工荷重の変動等興味深い点がわかった。今後、この種の構造物の設計、施工に反映させていきたい。

謝 辞

最後に、終始応力の計測等の機会を与えてくださった東京田辺製菓（株）の足利工場建設の御担当の方々に深く感謝いたします。

また、様々な工法を積極的に採用していただいた、清水建設（株）の辻伴工事長、並びに越田和憲課長に感謝の意を表します。

【1989年2月8日受付】