

プレストレスト鉄筋コンクリート梁の 設計, 施工と現場測定

福 島 清*
川 崎 清彦**

1. ま え が き

最近, 建築構造物における比較的大きなスパンの梁やフラットスラブに, ひびわれの制御や大たわみの防止のためプレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 構造を採用する例が増加傾向にある。

今回, 事務所ビル講堂部分の比較的大きなスパンの梁に, アンボンド PC 鋼材を用いた PRC 構造を採用し, 実施に際し, プレストレス導入に伴う梁の変形, ひずみおよびプレストレス導入に伴う不静定力について現場測定を行ったので, ここに, 設計, 施工および測定結果について報告する。

2. 設 計

2.1 建物の概要

建物概要および7階平面図を表-1, 図-1 に示す。

2.2 構造計画

当事務所ビル7階には 図-1 の平面図に示すとおり, 比較的大スパン (13.5 m) の梁をもつ講堂が計画された。また, 敷地の一部は住居地域となっているため, 建物の高さが制限されていた。このような設計条件に対して,

表-1 建物概要

建物名称	前田建設工業 (株) 本社ビル
敷地位置	東京都千代田区富士見 2-10-28
用途	事務所
規 模	延面積 4798.999 m ²
	階 数 29.950 m
	高 さ 29.350 m
構 造	鉄骨鉄筋コンクリート造
	基 礎 MDW 工法 (BCJ-F 187)
	場所打ちコンクリート杭 (アースドリス工法)

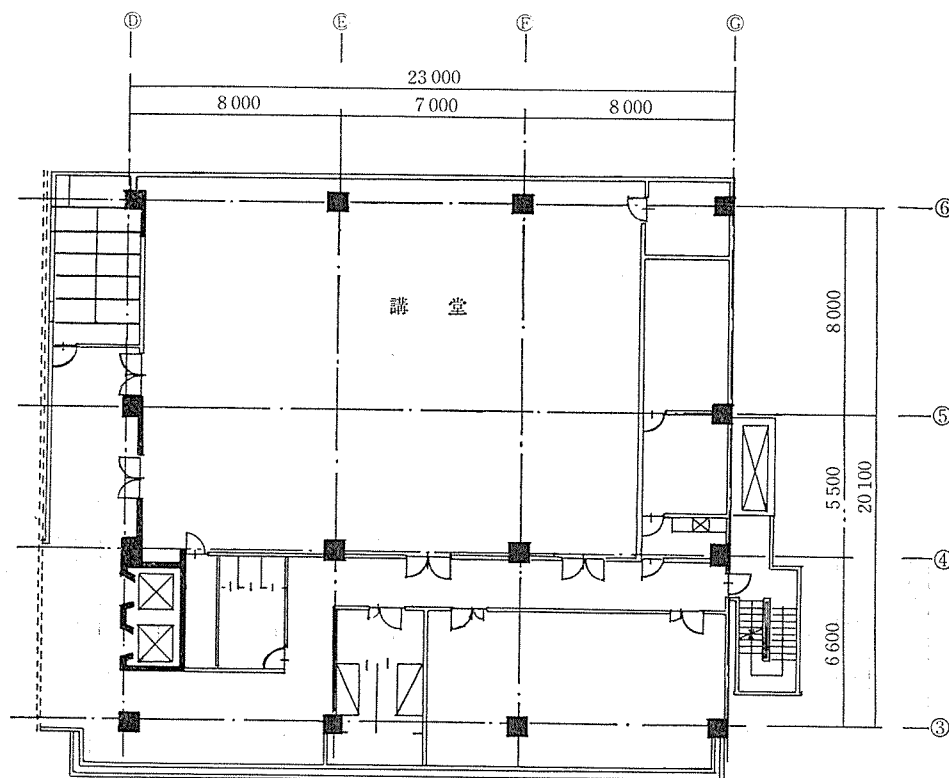


図-1 7階平面図

* 前田建設工業 (株) 建築設計部

** 前田建設工業 (株) 技術研究所

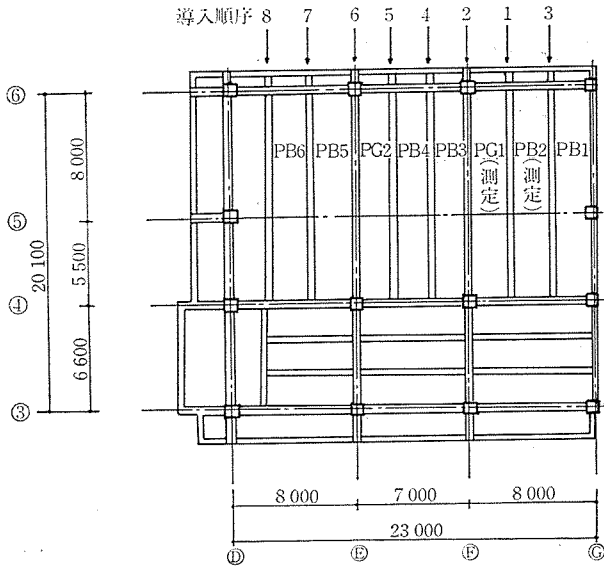


図-2 梁 伏 図

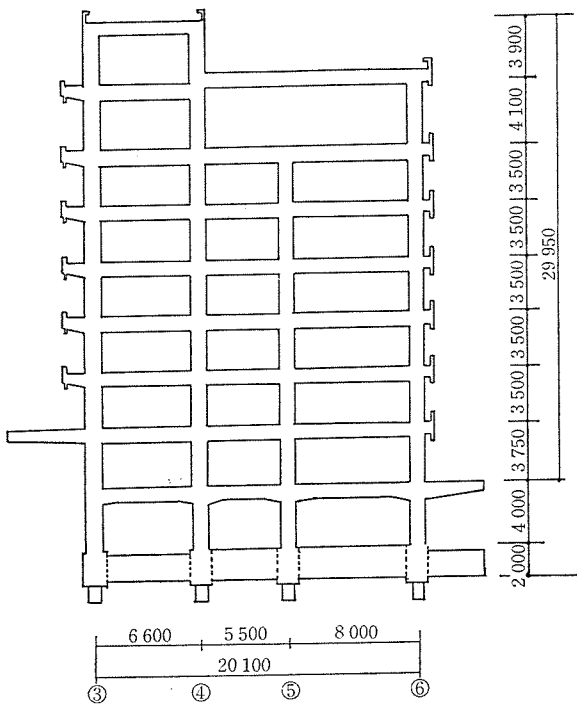


図-3 断 面 図

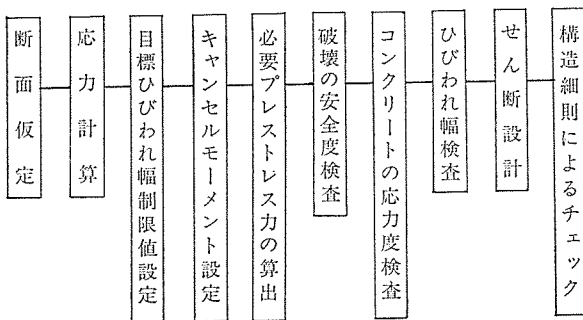


図-4 設計のフローチャート

講堂としての十分な天井高さを確保しつつ、大梁、小梁の梁せいを可能なかぎり小さくすることで階高を抑える方法をとった。そこで、図-2 に示すように、梁間方向の大梁と平行に小梁を配置し、大梁の荷重負担を軽減すること、また、小梁には PRC 構造を採用することで、梁せいの縮小化を図った。大梁は SRC 構造として設計するが、RC 構造に対する PRC 構造の考え方と同様に、軽微なプレストレスを導入して、ひびわれの発生およびたわみの制御を行った。プレストレス導入には、施工性、防錆上の信頼性および経済性等の理由からアンボンド PC 鋼材を用いた。

なお、PRC 構造は建設省告示第 949 号に抵触するため、小梁は RC 構造としての強度を確保した。

2.3 小梁の設計

アンボンド PC 鋼材を用いた PRC 構造小梁の設計例を以下に示す。設計のフローチャートを 図-4 に示す。

(1) 基本方針

- 1) 断面設計は、日本建築学会「プレストレス鉄筋コンクリート構造設計・施工指針(案)」に基づく。
- 2) 最大ひびわれ幅制御目標値は 0.2 mm とする。
- 3) プレストレスによるキャンセルモーメントは、長期荷重の 60% とする。
- 4) PC 鋼材はアンボンド PC 鋼材を使用する。

(2) 使用材料

i) コンクリート

普通コンクリート，設計基準強度 $F_c=240 \text{ kg/cm}^2$ ，スランプ 18 cm。表-2 にコンクリートの調合表を示す。

ii) 鉄 筋

材質 D 19 以上 SD 35
D 16 以下 SD 30

iii) PC 鋼 材

アンボンド PC 鋼より線 19 本より， $\phi 17.8$ 。
PC 鋼材の力学的性質を 表-3 に示す。

(3) 梁の断面と PC 鋼材の配置

表-2 コンクリートの調合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位重量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (kg/80)
20	18	4	59	48.7	171	290	897	981	0.673

表-3 PC 鋼材の力学的性質

種 類	外径 (mm)	被覆厚さ (mm)	標準単位重量 (g/m)	引張荷重 P_u (kg)	降伏荷重 P_y (kg)	許容引張荷重 P_e (kg)
アンボンド PC 鋼より線 19 本より $\phi 17.8$	21.8	1.50	1782	39 500	33 600	28 560

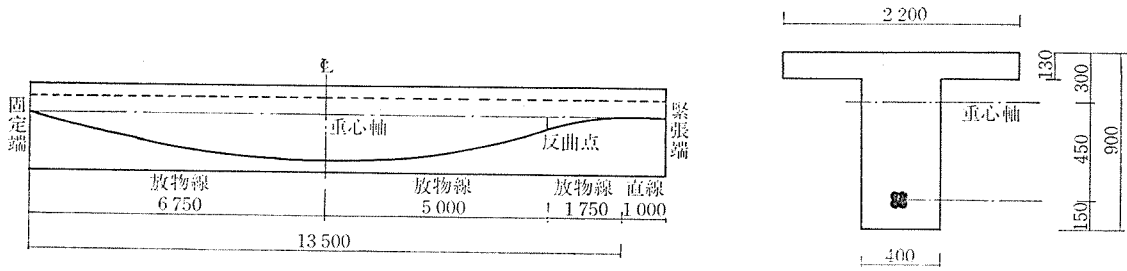


図-5 小梁の仮定断面と PC 鋼線の配線状況

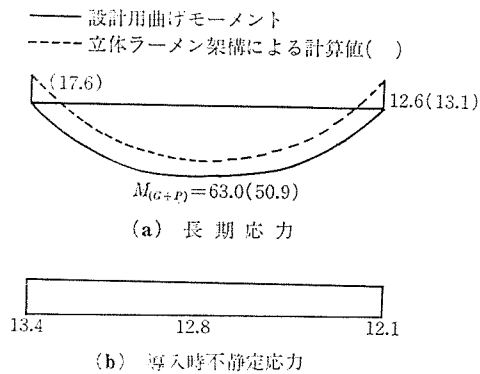


図-6 応力計算結果

小梁の断面と PC 鋼材の配置を 図-5 に示すように仮定する。

(4) 応用計算

長期荷重による応力とプレストレス導入による不静定応力の計算結果を 図-6 に示す。不静定応力は 7 階 1 層を取り出し、柱脚を固定とした、柱、大梁、小梁からなる立体架構として計算した。

(5) 断面の計算

i) 必要プレストレス力の計算

プレストレスによるキャンセルモーメント M_{can} を $0.6 M_{(G+P)}$ として、次式によりプレストレス力 P を求める。

$$\frac{P}{A} + \frac{P \cdot e}{Z} \cdot \frac{m_p \cdot P}{Z} = \frac{M_{can}}{Z}$$

ここに、 $e=45 \text{ cm}$ 、 $A=5940 \text{ cm}^2$

$$Z=0.77 \times 10^5 \text{ cm}^3, m_p=12.8 \text{ kg} \cdot \text{cm/kg}$$

上式より、

$$P=84.8 \text{ t}$$

プレストレス有効率 $\eta=0.85$ として、設計用プレストレス力 P_0 は

$$P_0=99.8 \text{ t}$$

また、摩擦損失係数 $\mu=0.12$ 、 $\lambda=0.0035$ として、中央部に所定の導入力を与えるための端部緊張力 P' は

$$P'=105.9 \text{ t}$$

となり、アンボンド PC 鋼線 19 本より $\phi 17.8$ ($P_e=28.56 \text{ t}$) を使用すると必要ケーブル本数は 4 本となる。

ii) 破壊安全度の検査

断面の曲げ破壊モーメントは、次式により求める。

$$M_u = \frac{7}{8} T_r d_r + T_p \left(d_p - \frac{1}{8} d_r \right)$$

ここに、 T_r : 鉄筋の降伏荷重

T_p : PC 鋼材の降伏荷重

ただし、アンボンドでは
 $0.75 P_e + 0.25 P_y$ (長期用)

曲げ破壊モーメント M_u は、

$$M_u = 324 \text{ t} \cdot \text{m} > 1.7 M_b = 107.1 \text{ t} \cdot \text{m}$$

となり、長期応力の組合せ応力を満足する。

iii) コンクリートの圧縮応力度の検査 (省略)

iv) ひびわれ幅の検査

ひびわれ幅の算定には、阪大鈴木博士の提案式^{6),7)}を用いた。

$$\text{最大ひびわれ幅 } W_{\max} = W_{\text{ave}} \times 1.5$$

$$\text{平均ひびわれ幅 } W_{\text{ave}} = (\epsilon_{\text{s ave}} + \epsilon_{\text{s h}}) l_{\text{ave}}$$

ここに、 $\epsilon_{\text{s ave}}$: 平均鉄筋ひずみ

$\epsilon_{\text{s h}}$: 乾燥収縮ひずみ

$$\text{平均ひびわれ間隔 } l_{\text{ave}} = 2 \left(c + \frac{s}{10} \right) + 0.1 \frac{\phi}{P_e}$$

ここに、 c : かぶり厚

s : 鉄筋の中心間距離

ϕ : 鉄筋径

P_e : 鉄筋を囲む部分のコンクリート断面積

$$\text{鉄筋の応力増分 } \Delta \sigma_s = \frac{M_{(G+P)} - M_{\text{can}} + m_p \cdot P}{A_s \cdot \frac{7}{8} \cdot d_r}$$

ここでは 2 段目の鉄筋もひびわれ幅の算定に含めた。

以上の諸値を入れて、

$$\text{鉄筋の応力増分 } \Delta \sigma_s = 1624 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{鉄筋の平均ひずみ } \epsilon_{\text{s ave}} = 624 \times 10^{-6}$$

$$\text{平均ひびわれ間隔 } l_{\text{ave}} = 18.4 \text{ cm}$$

$$\text{平均ひびわれ幅 } W_{\text{ave}} = 0.14 \text{ mm}$$

$$\text{最大ひびわれ幅 } W_{\max} = 0.21 \text{ mm}$$

以上、ひびわれ幅の算定の結果、最大ひびわれ幅は目標値よりわずかに大きくなったが、実施工に際しては、RC 構造として強度を確保するため、鉄筋を補強してあ

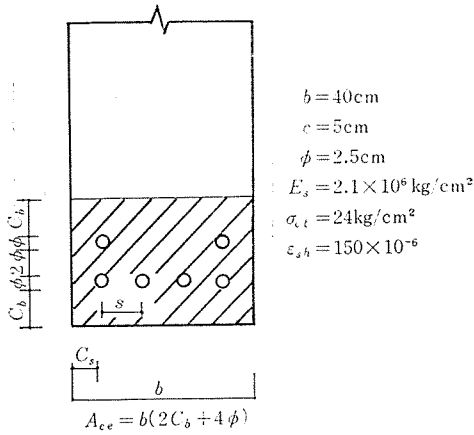


図-7 ひびわれ幅検討用梁断面図

るので、問題はないと判断した。

v) セン断耐力の検査 (省略)

3. 施 工

3.1 コンクリート工事

使用したコンクリートは普通コンクリートで、設計基準強度 240 kg/cm^2 、スランプ 18 cm 、最大骨材寸法 20 mm である。調合は表-2 に示すとおりである。コンクリートはポンプ車を使用して、柱、壁、梁、スラブの順に一体に打設した。締固めにはバイブレーターを使用した。

3.2 PC 工 事

(1) 配 線

アンボンド PC 鋼線は、固定端の圧着グリップを工場に取り付け、所定の長さに切断して現場に搬入した。本建物の主要構造部材は SRC 構造であるので、梁の配筋は型枠工事に先行して、鉄骨に固定された角パイプに吊るす方法で行った。鉄筋の配筋後、桁行方向大梁鉄骨のウェブに設けた PC 鋼線用の穴を通してアンボンド PC 鋼線を挿入し、 1 m ピッチでスターラップに結束された支持用の棚筋に PC 鋼線を仮止めした。型枠工事の際に、再度 PC 鋼線の位置をチェックし、所定の位置を確保した。固定端のアンカープレートは鉄骨ウェブに溶接し、緊張端のアンカープレートは型枠にボルトで固定した。

(2) プレストレス導入

コンクリート打設後 2 週間を経て、コンクリートの圧縮強度が 200 kg/cm^2 以上になったことを供試体で確認した後、PC 鋼線の緊張作業を行った。緊張順序は図-2 に示すとおりである。小梁には PC 鋼線が 2 段配置になっており、偏心距離の小さい下段の 2 本を先に緊張した。

導入プレストレスが小さいため、緊張ジャッキは比較的重量が軽く、人力で移動できる程度のものであり、緊張作業には、特別な仮設や機械を必要としなかった。

(3) 端部の処理

緊張作業終了後、PC 鋼線の余長をガスで切断した。

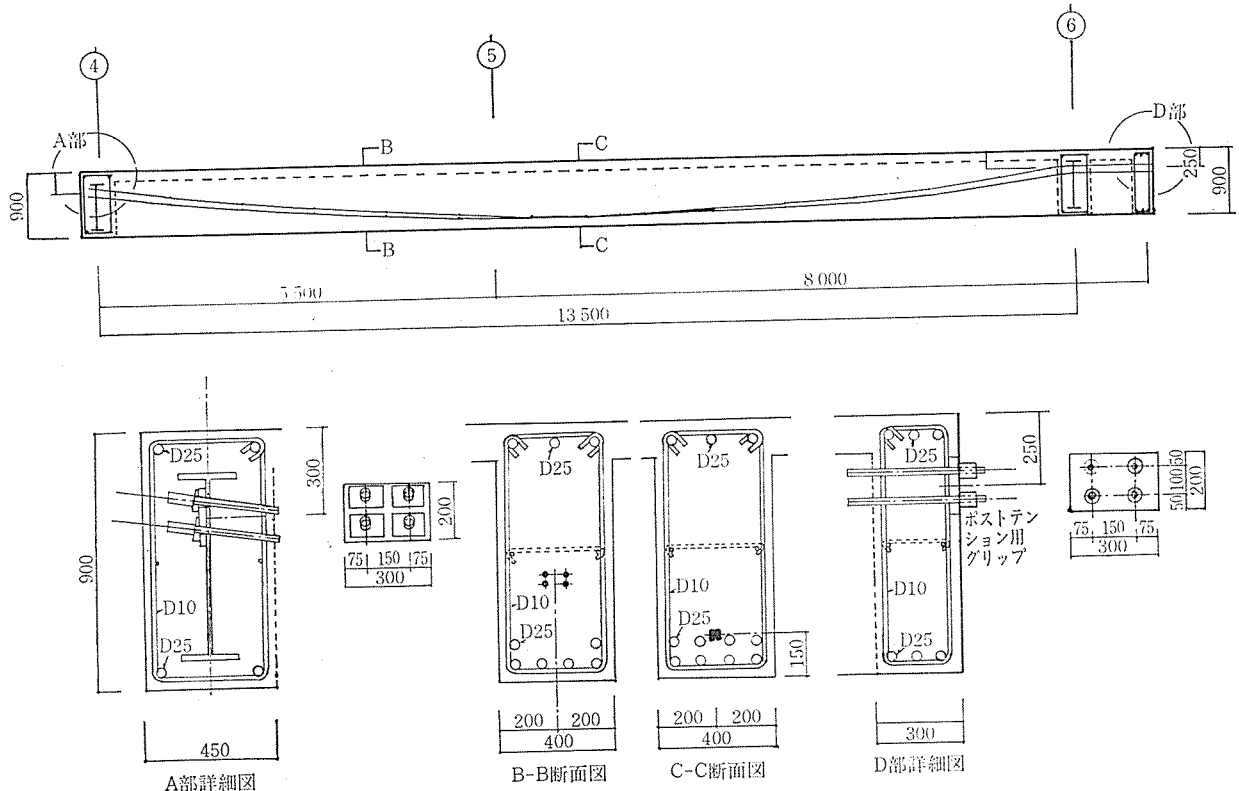
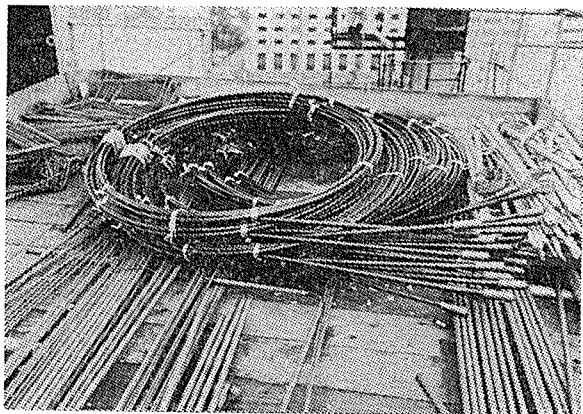
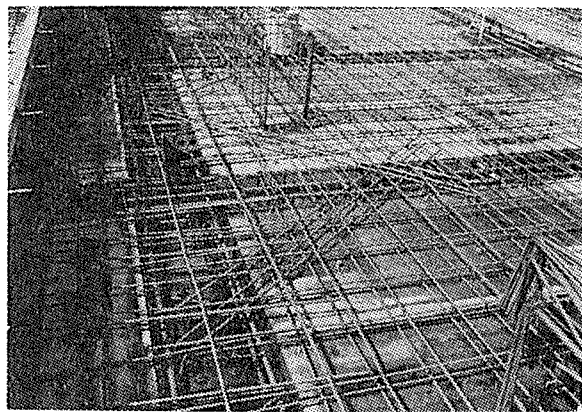


図-8 PC 鋼材の配線状況および定着部詳細



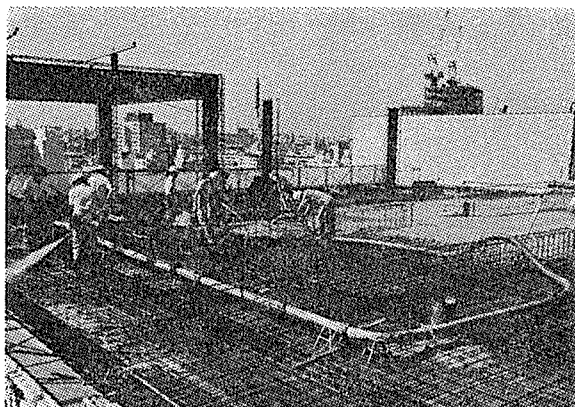
写真—1 PC 鋼材現場搬入状況



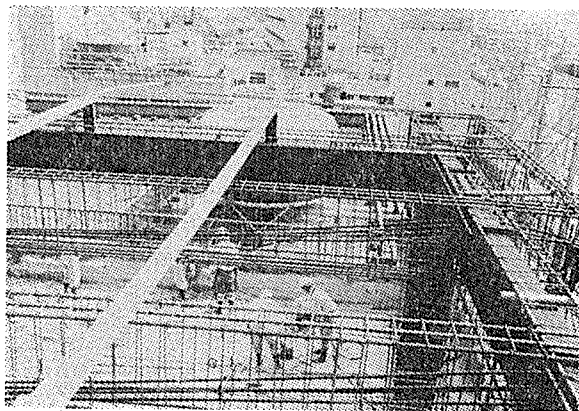
写真—5 スラブの補強筋



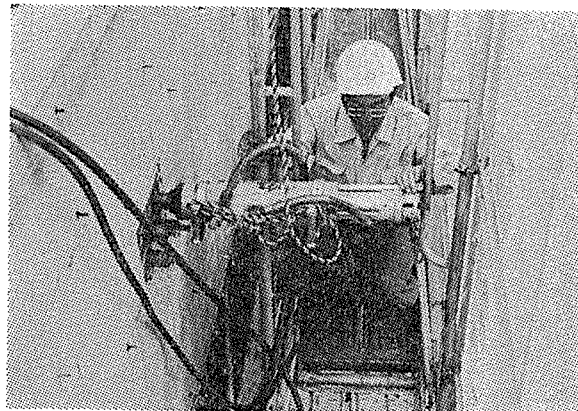
写真—2 PC 鋼線の配線作業



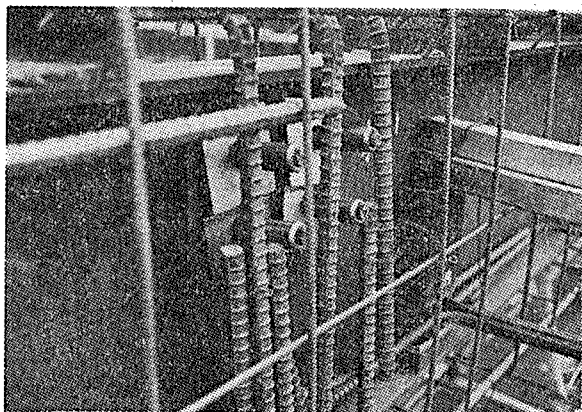
写真—6 コンクリートの打設



写真—3 PRC 構造小梁



写真—7 緊張作業



写真—4 固定端の状況



写真—8 緊張完了状況

報 告

アンカープレート、定着具、PC 鋼線に防錆塗料を塗布した後、アンカープレートに補強鉄筋を溶接し、コンクリートを打設して、防護、防錆処理を施した。

4. 測 定

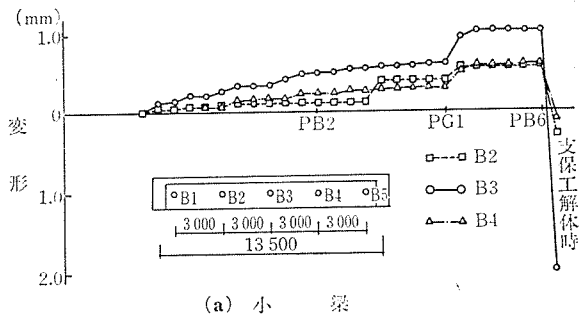
4.1 梁の変形

(1) 測定方法

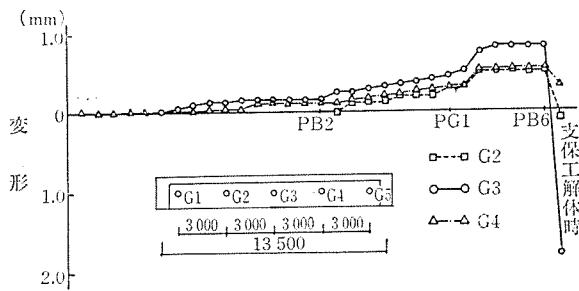
梁の変形は、梁側面と下階のスラブをダイヤルゲージを介してピアノ線をつなぎ、ダイヤルゲージの目盛を読み取る方法で測定した。

(2) 測定結果

大梁、小梁のたわみ測定結果を図-9、図-10に示す。図-9はプレストレス導入過程のたわみ変化について示したものである。図-10はすべての梁にプレストレスの導入を完了した時（以後全プレストレス導入時と表現する）と型枠支保工解体時の小梁のたわみ分布を示したものである。



(a) 小 梁



(b) 大 梁

図-9 大梁、小梁のたわみ

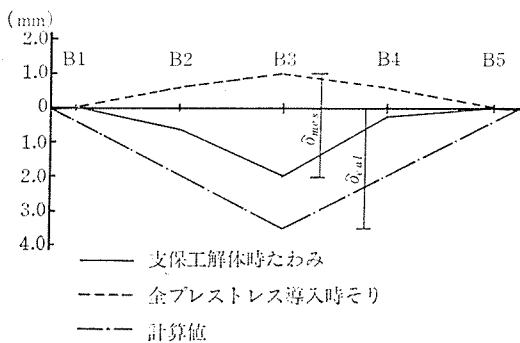


図-10 小梁のたわみ分布

(3) 考 察

小梁は、自身のプレストレス導入時に中央で 0.5 mm 程度のそりを生じた。更に隣接する大梁、小梁にプレストレスを導入した時にもそりは増加し、全プレストレス導入時には約 1.0 mm であった。導入後1週間ほど養生した後、支保工の解体、型枠の脱型を行ったが、プレストレス導入時からのたわみ量（以後たわみ量とする）は 3.0 mm (1/4 500) であり、プレストレス導入の効果は十分に認められた。

また、建築学会「RC 構造計算規準・同解説」の 13 条の小梁付床スラブのたわみ略算式¹⁾および PC 単純梁のプレストレス力によるそりの計算式²⁾に端部の固定度を考慮して求めた計算値を図-10に示す。計算値と測定値はほぼ一致した。

大梁の変形も小梁同様な経過を示し、全プレストレス導入時のそりは 0.8 mm、支保工解体時のたわみ量は 2.6 mm (1/5 200) であった。

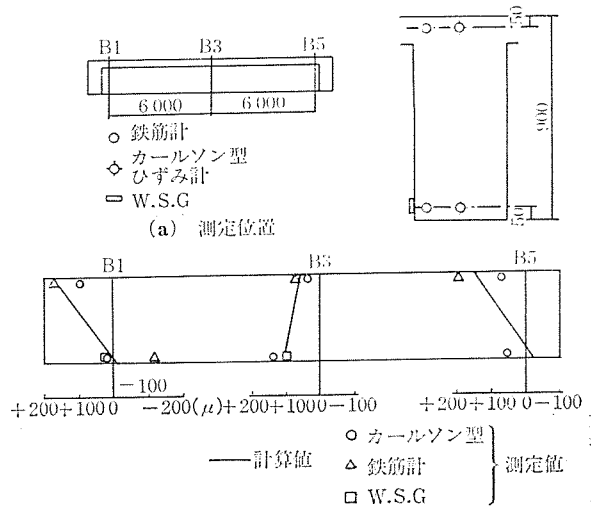
4.2 小梁の導入プレストレス

(1) 測定方法

小梁に導入されたプレストレスを確認するため、図-11に示す位置でコンクリートおよび鉄筋のひずみ測定を行った。

(2) 測定結果

図-11に全プレストレス導入時の各断面のひずみ分



(b) 各断面のひずみ分布

図-11 小梁のひずみ分布

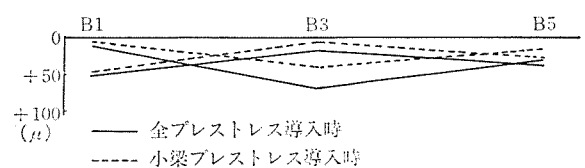


図-12 材軸方向のひずみ分布

布を示す。また、図-12には材軸方向のコンクリートのひずみ分布を示す。

(3) 考 察

中央断面のひずみは上下端とも圧縮ひずみであった。下端では 96μ (W.S.G), 132μ (カールソン型), 上端では 71μ (鉄筋計), 31μ (カールソン型) と若干ばらつきがあるが、ひずみ分布は軸力とわずかな負の曲げモーメントの合成された傾向を示している。図-11にプレストレス導入時の設計応力によるひずみ分布を示す。測定値とほぼ一致しており、設計どおりにプレストレスは導入されたと思われる。

4.3 プレストレス導入に伴う不静定力

(1) 測定方法

図-13に示すように、柱頭、柱脚の鉄骨、鉄筋およびコンクリートに W.S.G を貼布して、ひずみ測定を行った。

(2) 測定結果

全プレストレス導入時の柱のひずみ分布を 図-13 に示す。

(3) 考 察

各測定点のうち、全プレストレス導入時のコンクリート表面の最大圧縮ひずみは 80μ (16.8 kg/cm^2), 最大引張ひずみは 24μ (5 kg/cm^2) であった。導入に伴う不静定力は小さく、柱にはひびわれを発生させるほどの引張応力は生じていない。同時に行ったひびわれの観察でも柱をはじめ、直交梁、スラブにもひびわれの発生はなかった。また、設計に用いた不静定モーメントより求め

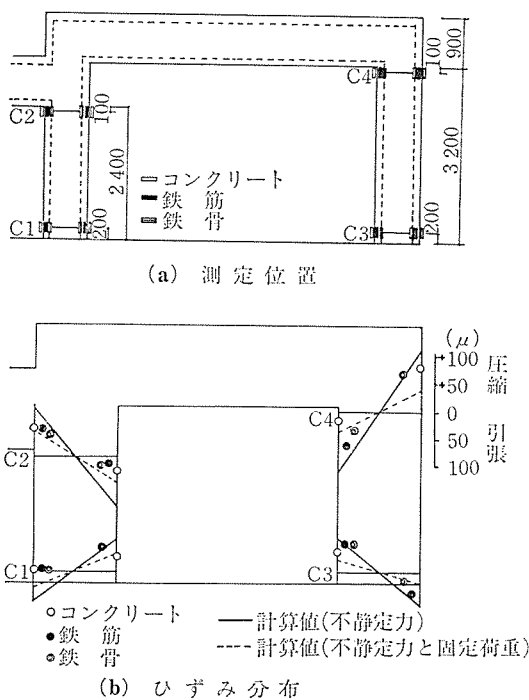


図-13 柱のひずみ分布

たひずみ分布を 図-13 に示す。点線は不静定力と鉛直荷重(長期設計荷重の 60%)による応力を合成したものであり、実線は不静定力のみによる値である。ただ、軸力の変化は考慮していない。測定値はほぼ両者の中間値を示しており、不静定力の計算方法については、実用に大きな問題はないと思われる。

4.4 スラブの有効幅について

(1) 測定方法

測定点は 図-14 に示すとおりである。W.S.G は、梁の材軸と平行に貼布した。

(2) 測定結果

小梁緊張時のスラブ中央と外端のひずみ分布を 図-14 に示す。

(3) 考 察

外端部のひずみ分布をみると、小梁のひずみが最大で、小梁から離れるにしたがって小さくなる傾向にある。しかし、中央では、小梁、スラブのひずみ分布には傾きはみられない。これは、軸力によるプレストレスは緊張端では集中的にかかり、中央に向かうにしたがって応力が分散していることを示している。

5. ま と め

測定の結果、以下の点が明らかになった。

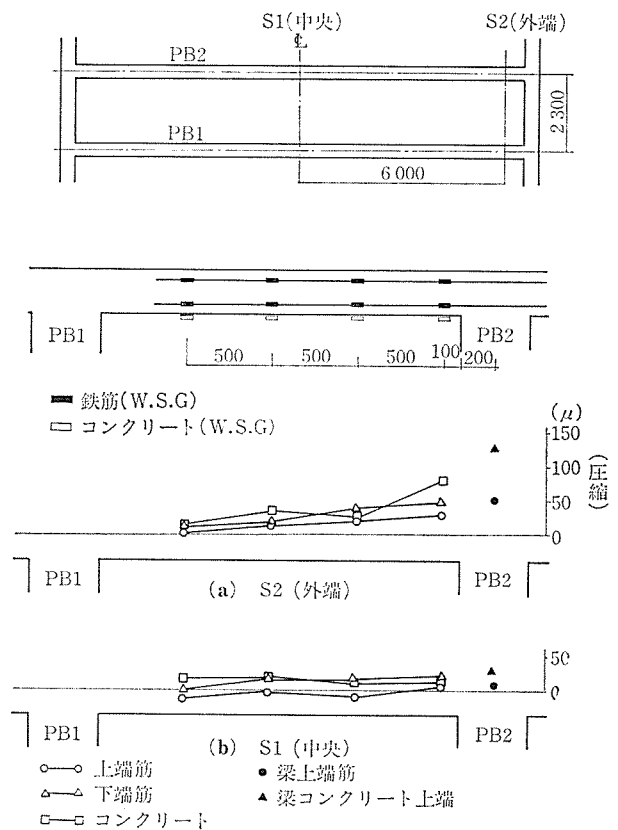


図-14 スラブのひずみ分布

報 告

- 1) 型枠支保工解体時の小梁、大梁のたわみ量はそれぞれ 3.0 mm (1/4 500), 2.6 mm (1/5 200) であり、プレストレス導入の効果は十分に認められた。
- 2) 小梁のプレストレスはほぼ設計どおり導入できた。
- 3) プレストレス導入時、柱に生じた最大引張応力は小さく、柱、直交梁、スラブなどにひびわれの発生はみられなかった。不静定力の計算方法は実用上問題はない。
- 4) 今回の工事では、アンボンド PC 鋼線の摩擦損失係数は設計に用いた値よりも小さく、損失がほとんど零に近い鋼材の伸び量を示した。

6. あとがき

今回は、アンボンド PC 鋼材の PRC 構造への適用個所が建物の一部であって、建物全体にわたる施工性、構造性能、経済性について総合的に評価するには不十分であるが、設計、施工および現場測定をとおして、貴重な資料を得ることができた。

また、先ごろ、プレストレストコンクリート造に関する告示が全面改正され、アンボンド PC 鋼材および低強度 (210 kg/cm²) のコンクリートの使用が、制限つきであるが法的に認められたことによって、PRC 構造は建

築構造物へ大いに適用されるであろう。

最後に、設計、施工、測定にあたり、御指導をいただいた日本大学教授本岡博士に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会「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 (案)」建築雑誌, Vol. 97, No. 1194, 1982 年 6 月号, p. 50
- 2) 日本建築学会「アンボンド工法用 PC 鋼材の施工時の取扱いについて」建築雑誌, Vol. 94, No. 1153, 昭和 54 年 7 月号, p. 57
- 3) 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」1982
- 4) 日本建築学会「プレストレストコンクリート 設計施工規準・同解説」1975
- 5) 岡田 清:「プレストレストコンクリート構造学」国民科学社
- 6) 鈴木計夫, 大野義照:「プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅に関する研究 (その 1), 初期ひびわれ幅について」建築学会論文報告集, 第 303 号, 昭和 56 年 5 月, p. 9
- 7) 鈴木計夫, 大野義照:「プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅に関する研究 (その 2), ひびわれ算定図表」建築学会論文報告集, 第 305 号, 昭和 56 年 7 月, p. 51
- 8) 六車 照:「アンボンドプレストレストコンクリート構造とプレストレスト鉄筋コンクリート構造——その問題点と展望——」プレストレストコンクリート, Vol. 22, No. 6, Dec. 1982, p. 8