

たわみを制御した段階的施工法の計画と実践

— 14 m スパンスラブへの挑戦 —

前田 達彦 *1・太田 義弘 *2・池田 英美 *3・平川 恭章 *4

大阪府内の某事務所ビルにおいて、国内実績でも最大級と考えられる 14 m スパンスラブを採用し、これまでにない魅力的でフレキシビリティの高い無柱空間を実現した。長大スパンスラブの計画と実践においては、同時には解決しづらい応力・たわみ・工程・コストという大きく 4 つの課題が存在する。この 4 つの課題を解決するため、大敵であるたわみに着目し、あえて「たわみを初期に発生させる」という逆転の発想でたわみを制御し、長大スパンスラブを構築できる段階的施工法を考案し実施した。プレストレスを導入したハーフプレキャスト床版の特徴である、正曲げに対する耐力が大きく、クリープ変形倍率が小さいというメリットを有効に活用することにより実現した工法である。プレストレストコンクリートを用いたスラブの長大スパン化への可能性を追求した事例として紹介する。

キーワード：長大スパンスラブ、たわみ制御、段階的施工法

1. はじめに

本建物は、地域の憩いと交流の場として位置付けられている、公共性の高い施設を併設した事務所ビルである。「将来予測される間取り変更や設備機器更新に対し高いフレキシビリティを確保すること」、「地域に愛される開放的で魅力的な空間を実現すること」が建築コンセプトである。そのため、集約された耐震要素と各階床面の梁形を極力なくした長大スパンスラブで構成する構造計画とした。梁形を極力なくすことにより、床下のフレキシビリティを最大限に高め、将来の間仕切り変更や設備配管の更新に対応できるよう配慮した。また、天井懐寸法を小さくすることにより天井高を大きく確保し、開放感のある外観と魅力ある内部の大空間を構成することをねらった。

本稿では、まず、本建物の建物概要および構造計画概要を簡潔に述べる。次に、新工法である「たわみを制御した長大スパンスラブ段階的施工法」の計画と実践について報告する。

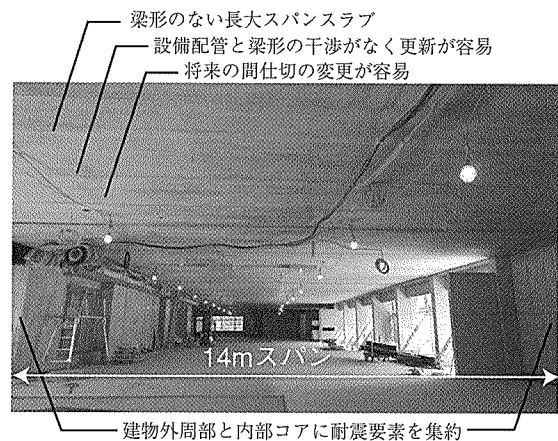


写真-1 東南から北への内観写真

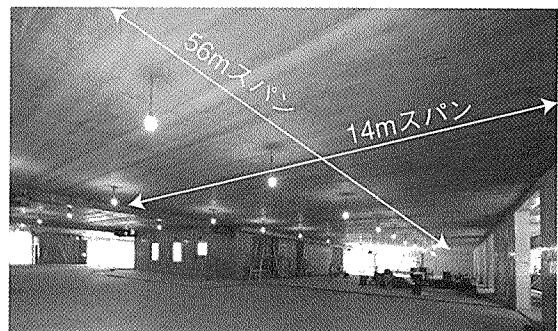


写真-2 北西から南東への内観写真



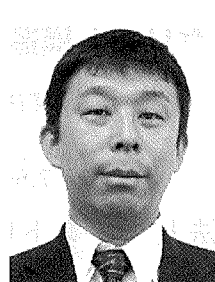
*1 Tatsuhiko MAEDA

(株) 竹中工務店 大阪本店
設計部構造部門



*2 Yoshihiro OTA

(株) 竹中工務店 技術研究所



*3 Hidemi IKEDA

(株) 竹中工務店 大阪本店
設計部構造部門



*4 Kiyooki HIRAKAWA

(株) 竹中工務店 大阪本店
設計部構造部門

2. 建物概要

地上階の平面形状は、東西方向 43.6 m、南北方向 56.6 m の矩形であり、スパンは、東西方向は 14 m、12 m、14 m の 3 スパン、南北方向は 16.3 m、6 m × 4、16.3 m の 6 スパンである。建物中央部にはコアと吹抜けがあり、そのまわりに集会室・公民館・図書館といった公共性の高い施設、各種教室や事務室が配置されている。

建築地	大阪府
建物規模	地下1階 地上4階 塔屋1階
建物用途	事務所
延床面積	9 277.80 m ²
建築面積	2 532.57 m ²
建物高さ	GL + 24.06 m
構造種別	鉄筋コンクリート造 (一部鉄骨造)
構造形式	耐震壁を有するラーメン構造
基礎構造	直接基礎 (独立基礎・べた基礎)
設計施工	(株)竹中工務店
工期	2006.10 ~ 2008.1

3. 構造概要

架構形式は、両方向とも建物の外周およびコアまわりに耐震壁を集約した耐震壁を有するラーメン構造である。南北方向には建物外周とコアを接続する大梁として、梁せいを確保できる1階には鉄骨梁、梁せい制限が厳しい2~4階にプレビームを配置する。これら外周架構、内部コア、接続大梁で囲まれた14 × 56.6 m の範囲、および12 × 16.3 m の範囲の4つに分割したスラブには梁形を設けない計画とした。スラブはFRボイドスラブを用いた合成床板による長大スパンスラブとしており、短辺スパンは14 m、12 mである。スラブ厚は一般部380 mm、屋上緑化など荷重の大きいところで450 mm、500 mm、スラブを支持する外周の壁厚は、370 mmを基本とした。代表的断面および使用材料を下記に、2~5階伏図を図-1に、主要な軸組図を図-2~4に示す。また、南東から北への内観を写真-1に、北西から南東への内観を写真-2に示す。

・ラーメン架構代表断面

- 柱断面 3, 5 通り 800 × 2 000 mm
- 梁断面 A, G 通り 600 × 1 700 mm
- 3, 5 通り 1階：S梁 2~4階：プレビーム
- プレビームに使用した鉄骨
- 端部 H-800 × 500 ~ 中央 H-500 × 400 程度

・耐震壁

- 東西方向 壁厚 200 ~ 750 mm
- 南北方向 壁厚 370 ~ 570 mm

・スラブ

- FRボイドスラブ 380 ~ 500 mm

・使用材料

- コンクリート Fc 30
- 鉄筋 SD 295 A, SD 345, SD 390

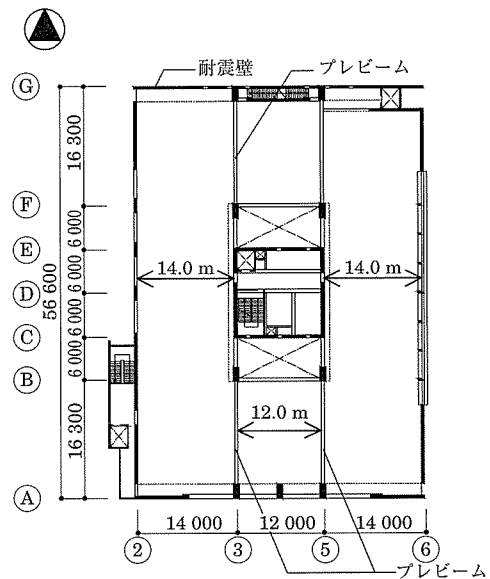


図-1 2~5階伏図

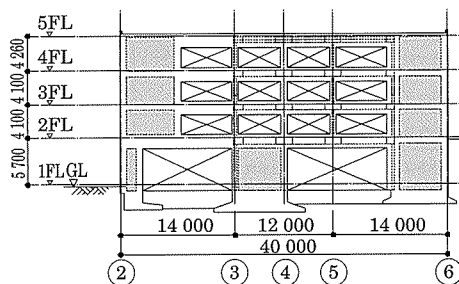


図-2 A通軸組図

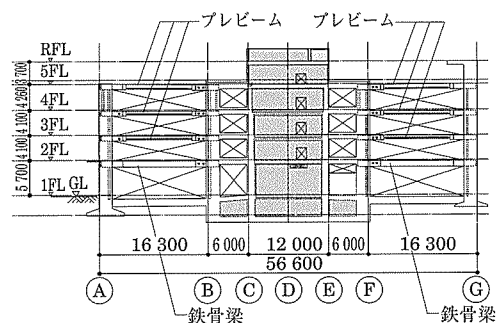


図-3 3通軸組図

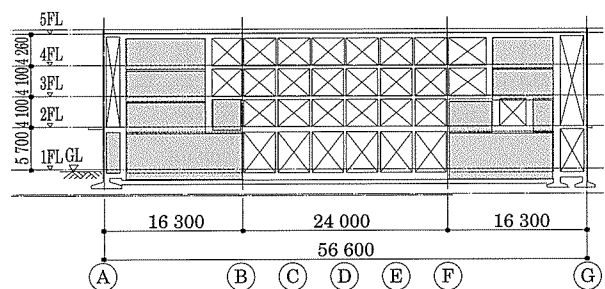





図-4 6通軸組図

4. 新工法の計画

4.1 従来工法を採用する場合の問題点

長大スパンスラブの設計においては、応力・たわみ・工期・コストという大きく4つの問題が存在し、同時には解決しづらい。たとえば、14 m スパンの事務所の場合ハーフ PCa 板はクリープ変形による長期たわみは小さくできるが、スラブ端部の大きな応力を処理するためには、450 mm 程度のスラブ厚およびスラブを支持する壁厚が必要となり、不経済である。また、PC 鋼線を用いた現場打ちスラブは、スラブ端部上端の PC 鋼線で大きな応力を処理できるため、400 mm 程度のスラブ厚および壁厚を実現することが可能であるが、大量の PC に関する現場作業が必要となり、工期・コストは増加する。表 - 1 に従来工法による比較を示す。

表 - 1 従来工法による比較

	現場打ちスラブ	ハーフ PCa 板 (PC 鋼線あり)	現場打ちスラブ (PC 鋼線あり)
従来工法			
応力	× スラブ厚・壁厚大	× スラブ上端は PC 鋼線なし →スラブ厚・壁厚大	○ 引張側に PC 鋼線がある →スラブ厚・壁厚小
変形	× クリープ大	○ クリープ最小	△ クリープ小
工期	△ 現場作業の増大	○ スラブ型枠不要	× 大量のアンボンド PC 工が必要
コスト	× 建物重量増加の影響大	△ 揚重機のコストアップ	△ ボイド、PC 鋼線、型枠など多くの職種が必要

4.2 新工法の基本的考え方

上記の問題を解決するために、以下の Step 1 ~ 4 を基本としたスラブを段階的に施工する新工法を考案した。

スラブには、クリープの小さいハーフ PCa 板に着目し FR 板を採用した。重量を低減するため規格品よりかさ上げしたボイドを要求し、スラブ厚は 380 mm と設定した (図 - 5)。次に、応力およびたわみの両方の問題点を解決することができる Step 1 ~ 4 で構成される段階的工法を採用した (図 - 6)。

- Step 1 支保工上部に FR 板をむくりをつけて設置する。
- Step 2 端部にあと施工帯を設け、スラブのトップコンク

リートを打設する。

Step 3 支保工を一旦緩めスラブを両端ピンで構造的に成立させる。また、その状態で一週間程度放置する。この支保工を緩め、一週間ほど放置する作業を以下では「除荷」と呼ぶ。本工法のもっとも重要な工程はこの Step 3 である。

Step 4 あと施工帯を打設し、最終的に両端固定の架構を成立させる (上層階のスラブコンクリート打設時の重量を支持するために、支保工を突き直す)。

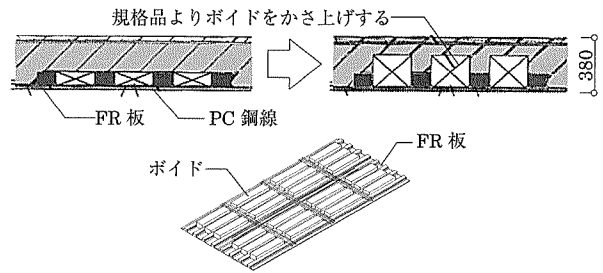


図 - 5 スラブ断面計画

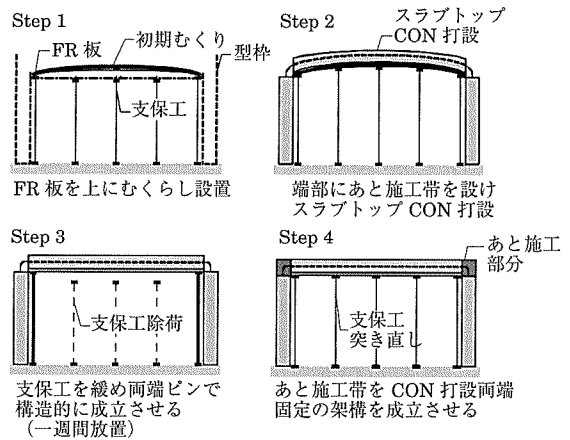


図 - 6 たわみを制御した段階的工法

スラブのコンクリートを打設するときには、下層 2 層で支持することを条件として計画した建物全体施工手順図を 図 - 7 に示す。

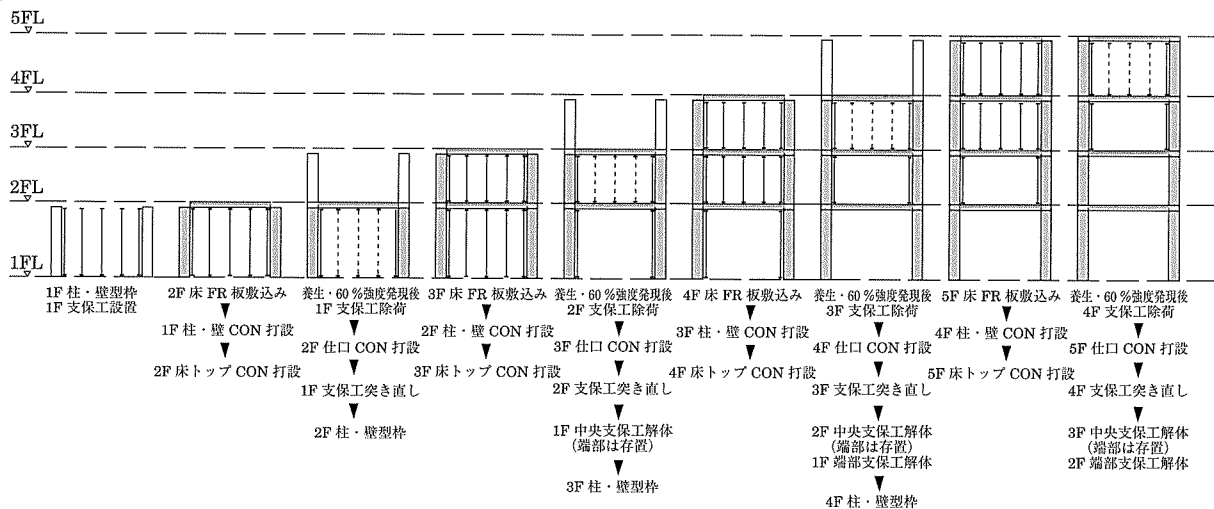


図 - 7 建物全体施工手順図

4.3 新工法のメリット

(1) スラブ端部応力低減

表 - 1 に示すような従来工法では、作用荷重すべてに対し両端固定となるため、スラブ端部の応力が大きくなる。一方、新工法では、あと施工帯を設けることにより自重に対しては両端ピンで構造的に成立させるため、端部に生じる応力は仕上げ・積載荷重に起因するものだけになる。スラブ端部およびスラブを支持する壁の応力は、従来工法の35%程度となり、スラブ厚・壁厚・鉄筋量を大幅に低減することができる(図-8)。

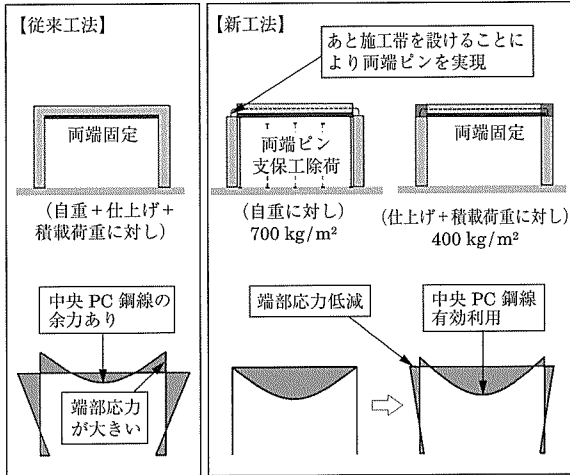


図-8 応力の比較

(2) 仕上げたわみ低減

従来工法では、支保工の撤去は一回だけなので、それまで支持していたすべての荷重に対するクリープ変形が一度に進展する。一方、新工法では、第一段階として支保工の除荷を行い、自重に対するクリープ変形の大部分を進展させる。第二段階として最終的に支保工を撤去するが、この時のクリープ変形は仕上げ・積載荷重によるものだけとなる。すなわち、自重によるクリープ変形を早期に進展させることにより仕上げ後のクリープ変形を小さくすることができる。

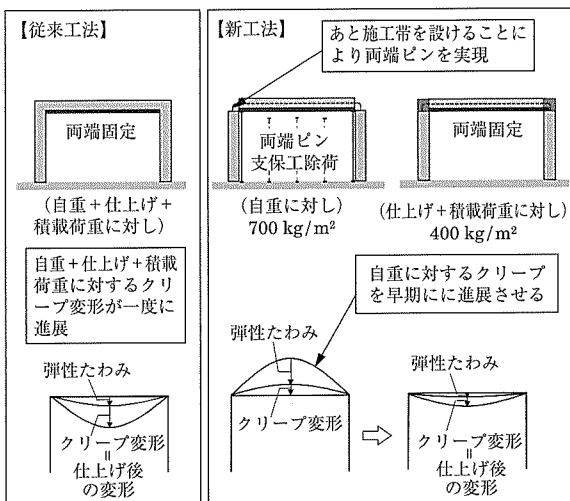


図-9 たわみの比較

(3) 支保工存置期間短縮

PC 鋼線を用いた現場打ちスラブによる従来工法によると、一般に支保工の多層受けが必要になり、上層のスラブ重量が下層の支保工に累積する傾向がある。一方、新工法では、「除荷」を行い各層で架構を構造的に成立させながら積層するため、上層のスラブ重量が下層の支保工に累積しない(図-10)。よって、従来工法と新工法の工期を比較すると、躯体全体工期は若干増えるが、アンボンドPC工事を省け、支保工を早期に撤去できるため、仕上げ開始時期は各階で20日ほど早めることができる。

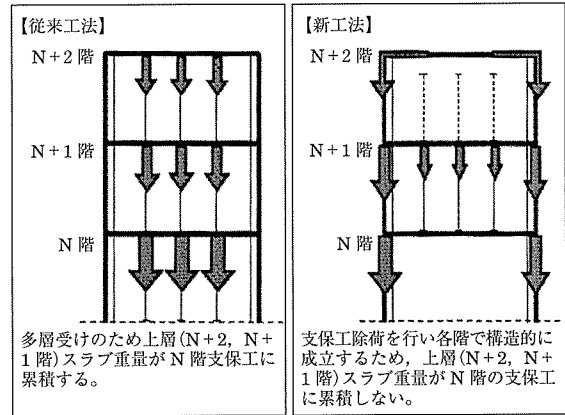


図-10 支保工存置期間の比較

4.4 新工法のたわみ算定

段階的施工手順を考慮したたわみ予測を行った。スラブの長期たわみ=単純支持状態の長期たわみ+両端固定状態の長期たわみとして算定した。まず、段階的施工をステージ区分した所要日数を併記した模式図にし、各ステージでスラブが負担する重量および端部境界条件を考慮した弾性たわみを算定する。次に各ステージ間で想定される長期たわみ倍率を乗じ、それらを累積して全長期たわみを算定する。12mスパンの計算例を以下に示す。

(1) 設計荷重

D.L	(固定荷重)	5 470 N/m ²
F.L	(仕上げ荷重)	800 N/m ²
L.L	(積載荷重)	3 000 N/m ²
T.L	(全荷重)	9 270 N/m ²

ここで、D.Lの内分けはFR板1 770 N/m²、トップコン3 700 N/m²である。また、実状に応じた施工荷重を500 N/m²とした。

(2) たわみのクライテリア

たわみのクライテリアは、絶対値と相対値との二つの観点から定めた。絶対値としては、水平床面からの絶対変位をスパン/667以下とし、相対値(変位差)としては、仕上げの追従性を勘案し仕上げ後長期たわみを25 mm以下とした。

(3) 段階的施工ステージ区分模式図

模式図を図-11に示す。縦軸に1~5階のフロアを取っている。支保工を除荷するときは点線表示、支保工を撤去するときは二点鎖線表示している。3階床スラブのたわみ算定のために、3階の床に着目した代表的な施工手順をス

ページ番号を付け示した。矢印で示す日数は、次のステージ開始までに必要とする当該ステージの所要日数を、枠内で示す日数は、累積日数を示す。

(4) 荷重履歴と弾性たわみ

荷重履歴と弾性たわみを図 - 11 にまとめた。除荷によりそれまで支持していた上層スラブ重量がなくなることによる弾性たわみの戻りはマイナス値として表現している。

(5) 長期たわみ倍率を考慮した累積たわみ

① 単純支持状態の長期たわみは以下の条件で算出する。

・対象とする荷重：FR 板自重、場所打ちコンクリート自重

・長期たわみの要因：クリープ

② 両端固定状態の長期たわみは以下の条件で算出する。

・対象とする荷重：施工時荷重，F.L，L.L，D.L の一部

・長期たわみの要因：端部…ひび割れ，クリープ，乾燥収縮，施工時荷重の影響，端部の抜出

中央部…クリープ

・長期たわみ倍率：長期たわみ倍率は端部の条件から算出されるたわみ倍率と中央部の条件から算出されるたわみ倍率の平均値とする。

③ 再支保工期間の 14 日間は、たわみ（変形）は進行しないが、クリープは進行するため、支保工には鉛直荷重が導入される。導入される鉛直荷重は、「D.L × (14 ~ 28 日のたわみ倍率) / (0 ~ ∞ 日までのたわみ

倍率)」として算定した。導入荷重は D.L の 15 % となり、この荷重によるたわみ 7.6 mm を支保工撤去後の弾性たわみとして考慮する。

④ 3 階スラブの FR 版重量および施工荷重は、2 階スラブの仕口強度が発現していない時期に載荷されるため、すべて 1 階スラブに支持させた。

⑤ 3 階スラブの現場打ちコンクリート重量は、2 階スラブの仕口強度が発現している時期に載荷されるため、2 階スラブと 1 階スラブに半分ずつ負担させた。

以上より、3 階スラブで算定した全長期たわみは、

$$= \delta^{D.L} (\text{ピン}) \times 1.32 + \{ \delta^{D.L \text{の一部}} (\text{固定}) + \delta^{F.L+L.L} (\text{固定}) \} \times 4.47$$

$$= 23.8 \text{ mm} + 19.0 \text{ mm}$$

$$= 42.8 \text{ mm}$$

ここで、

$\delta^{D.L} (\text{ピン})$: D.L に対する両端ピンの弾性たわみ

$\delta^{D.L \text{の一部}} (\text{固定})$: D.L の一部に対する両端固定の弾性たわみ

$\delta^{F.L+L.L} (\text{固定})$: F.L + L.L に対する両端固定の弾性たわみ

となる。 $\delta^{D.L} (\text{ピン})$ の値が 30 mm 程度であることから、むくりを 30 mm 確保するよう計画し、全長期たわみが生じたときの水平床面からの絶対変位を 13 mm とした。また、支保工撤去後のたわみが 19 mm 程度であるため、相対値もクライテリアを満足する。

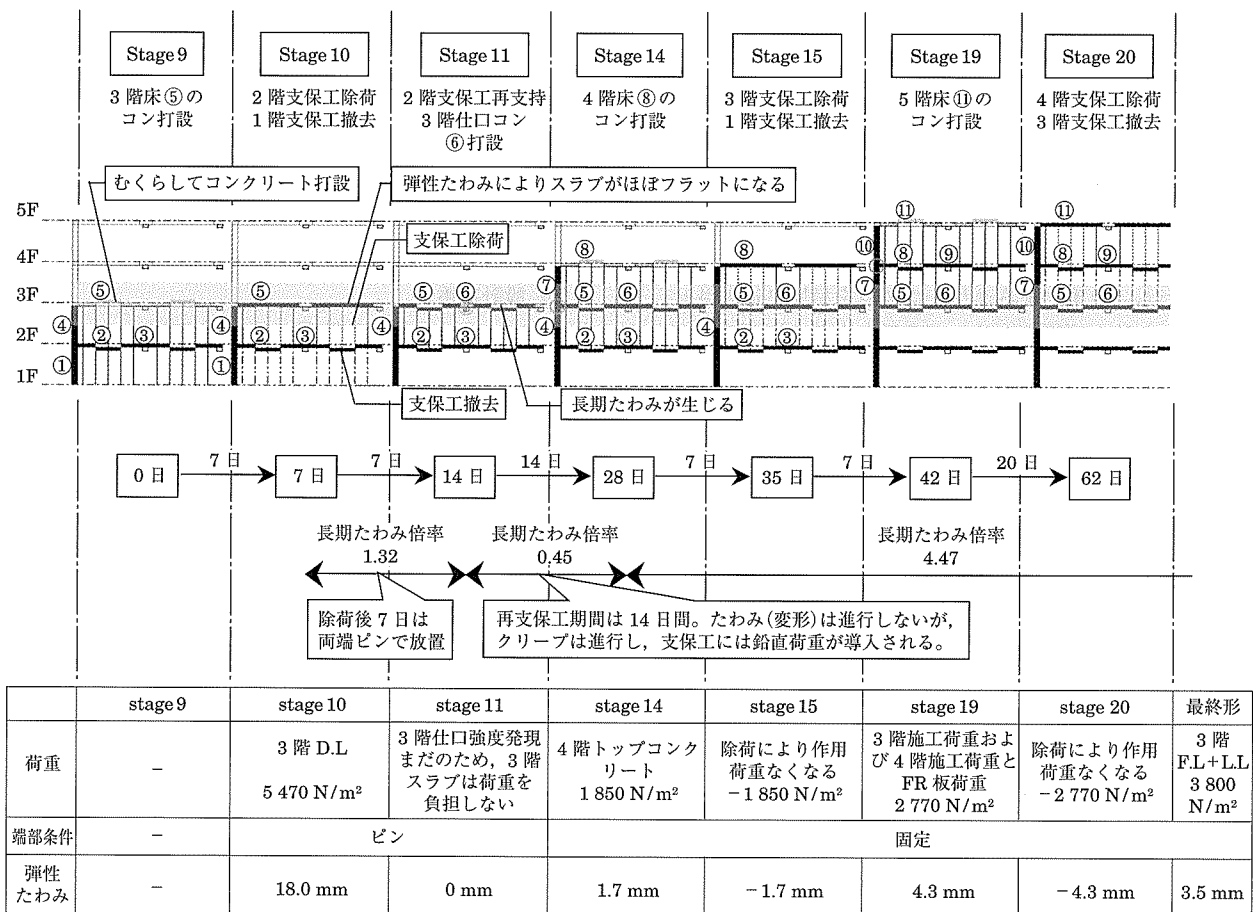


図 - 11 段階的的施工ステージ区分および 3 階スラブにおける荷重履歴と弾性たわみ表

5. 新工法の実施

5.1 実施状況

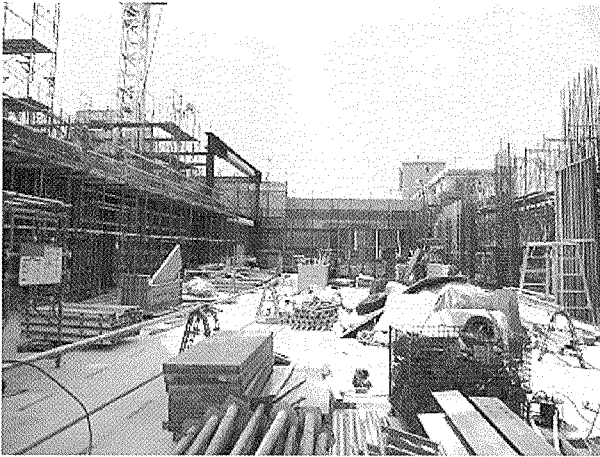


写真-3 ① 柱壁配筋および型枠
鉛直部材の配筋および型枠を行う。

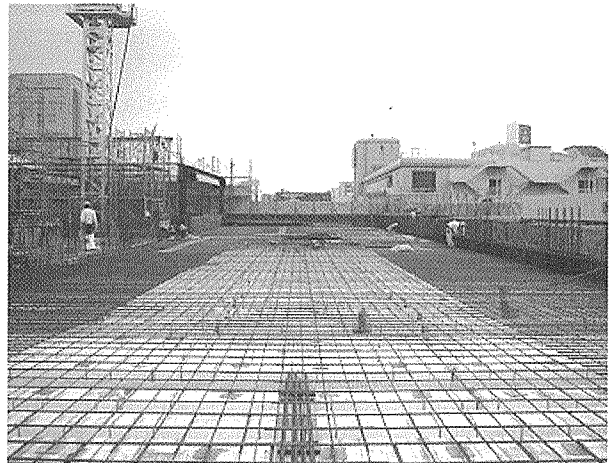


写真-6 ④ スラブ配筋
とくにスラブ端部の主筋位置を重点管理する。



写真-4 ② 支保工組立て
中央部で 30 mm 程度の FR 板むくりを想定し、スラブ下支保工を設置する。

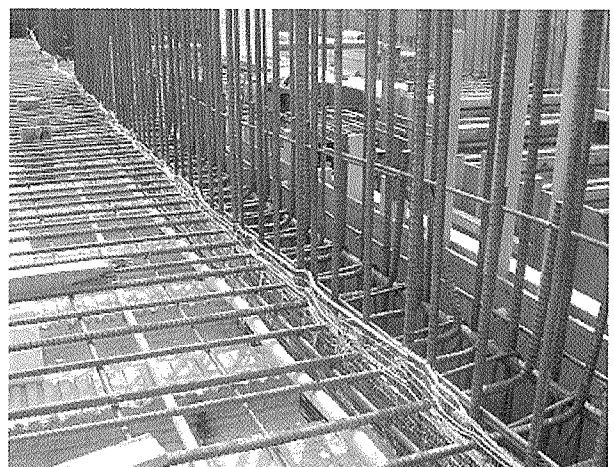


写真-7 ⑤ スラブ端部仕口ラス型枠区分
ラス型枠を用い、あと施工帯を形成する。

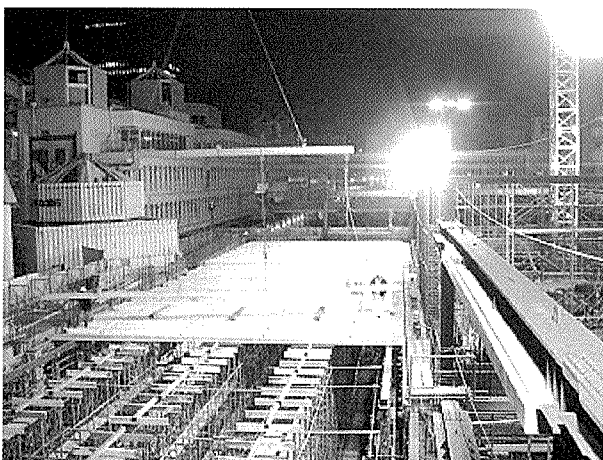


写真-5 ③ FR 板敷込み
支保工で設定したレベルになじませ FR 板を敷込む。

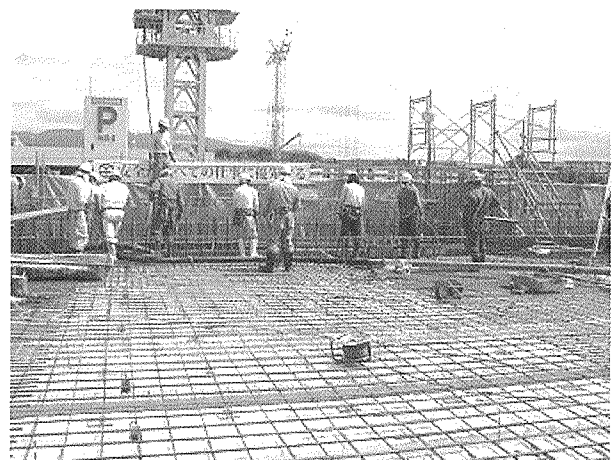


写真-8 ⑥ 柱壁 CON 打設
スラブ端部仕口を残し、鉛直部材をコンクリート打設する。



写真 - 9 ⑦ スラブ CON 打設 [Stage9, 14, 19]

支保工レベル調整をした後、スラブ端部のあと施工帯を残し、コンクリートをむくりなりに打設する。レベル管理は水平ではなく、スラブ厚一定となるよう行う。



写真 - 12 ⑩ 支保工再支持 [Stage11]

支保工がFR版を突き上げないように注意しながらスラブ下端を再支持する。

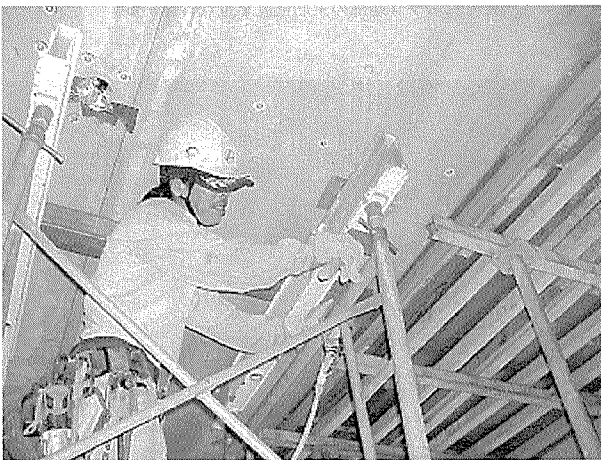


写真 - 10 ⑧ 中央部支保工除荷 [Stage10, 15]

スラブコンクリートに所定の強度が発現した後、支保工除荷を行い、スラブの弾性たわみを生じさせる。一週間この状態を放置し、初期クリープ変形を進展させる。



写真 - 13 ⑪ 中央部支保工解体

スラブ端部は支保工を存置している。

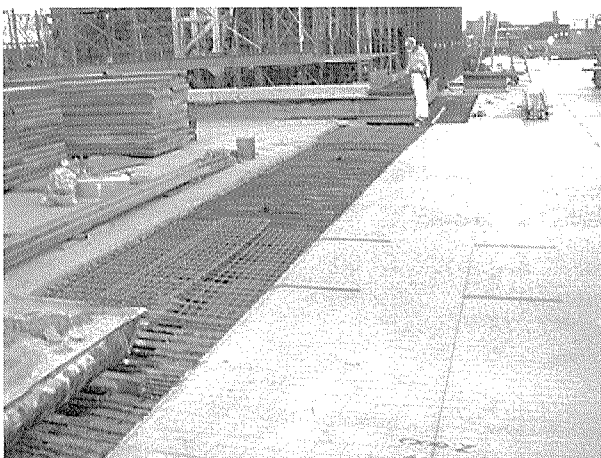


写真 - 11 ⑨ あと施工 CON 打設 [Stage11]

あと施工帯のコンクリート打設を行い、スラブ両端を固定とした架構を成立させる。



写真 - 14 ⑫ 支保工解体 [Stage20]

架構が成立する。

5.2 たわみとスラブ主筋応力度の予測値と実測値

(1) たわみ

全長期たわみの予測値と実測値を図 - 12 に示す。本手法による段階的の施工を反映した全長期たわみの予測値は実測値をよく近似できている。また、支保工撤去後に生じる長期たわみも、予測値が実測値とよく対応している。

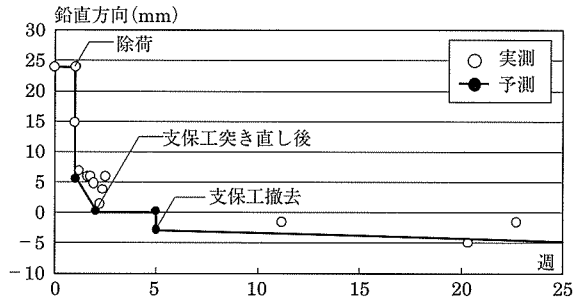


図 - 12 たわみの予測値と実測値

(2) スラブ主筋応力度

たわみ予測において、除荷後再度設置した支保工にはほとんど軸力が生じず、スラブ自重によりスラブ端部に曲げ応力がほとんど生じないと仮定した。この仮定の妥当性を検証するため、スラブ主筋応力度の測定を行った。スラブ主筋応力度の実測値を図 - 13 に示す。左側の縦軸にはひずみゲージで測定した主筋に生じる引張応力度を、右側の縦軸には主筋に生じる引張応力度の長期許容引張応力度に対する比率を示した。施工過程で主筋応力度は変動するが、支保工撤去後に残る主筋応力度は長期許容引張応力度の5%程度であり、無視できる程度であることが確認できた。

以上より、実測値は予測値と良い対応にあり、本手法が妥当であることを確認できる。なお、竣工後、1年半程経過した現在、スラブの長期たわみが過大に生じたなどの不具合はとくに生じていない。

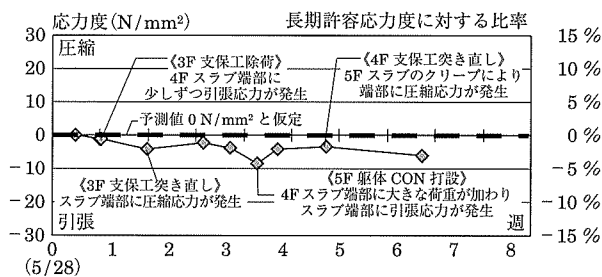


図 - 13 スラブ主筋応力度の実測値

5.3 スラブ厚の検証

当社が設計施工した短辺スパンが6 m以上のスラブを有するプロジェクトの実績調査を行った。横軸にスラブ短辺スパン、縦軸にスラブ厚をとったグラフを図 - 14 に示す。スパンとスラブ厚の関係は、ある領域ではほぼ比例関係にあり、図のハッチ部分の領域内にあるのが通常であることが分かる。一方、本建物はその領域に含まれず、スパンに対して比較的薄いスラブ厚となる領域にあることが分かる。新工法により、他事例と比較して薄いスラブ厚でより長大スパンを実現できたことが分かる。

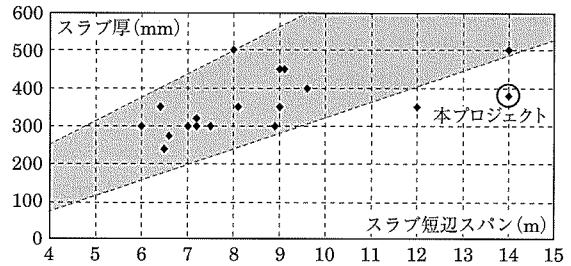


図 - 14 スラブ短辺スパンとスラブ厚の関係 (実績調査)

6. まとめ

正曲げに対する耐力が大きく、クリープ変形倍率が小さいというプレストレスを導入したハーフプレキャスト床板の特徴に着目し、たわみ、応力、工程、コストのいずれにおいても要求性能を高いレベルで満足させることができる長大スパンスラブの段階的の施工法を考案し実施することができた。これらは、緻密な構造計算、事前からの施工者との十分な協議、徹底した施工管理を行うことによりはじめて実現できるものと考えられる。本建物の設計・施工を行うにあたり、多大なご理解およびご協力をいただいた建築主の方々、濱田直明氏をはじめ (株) 富士ピー・エスの方々、構造安全審査において御指導いただいた日本建築総合試験所の近藤一夫先生、辻聖晃先生に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 — 許容応力度設計法 — 1999, 日本建築学会
- 2) プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 日本建築学会
- 3) 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

【2009年5月12日受付】