

段差付PC床版の開発 - 東雲プロジェクト新築工事 -

東京建築支店 江口尚之

概要：近年，集合住宅ではスケルトンインフィル方式や建築計画におけるフリープランへのニーズが増加し，設備計画のフレキシビリティやバリアフリーへの対応として，水廻りの躯体スラブに段差を設けることが要求されてきた．筆者はスパン8.5～10.0mで中央付近に段差を有する大型PCaプレストレスト合成床スラブの開発を行ってきた．本床スラブは主筋方向に段差を有しており，段差上部および段差下部の床リブに配置されたPC鋼より線は段差部内で定着されている．この場合，段差部におけるPC鋼より線の定着性能を確保することが重要となる．本報告は，PC鋼より線の定着性能に関する付着実験と実大合成床スラブの加力実験に関するものである．

キーワード：超高層マンション，床段差，付着性能，インデント

1. 工事概要

工事概要を以下に示す．

工事名称：(仮称)東雲プロジェクト新築工事

工事場所：東京都江東区東雲1丁目1-3

設計監理：三菱地所(株)

総合施工：戸田建設株式会社

全体工期：2001年11月～2005年5月

躯体工事A棟 2002年10月～2004年6月

躯体工事B棟 2003年2月～2004年12月

規模：A棟 建築面積：10736㎡

延床面積：80763㎡ 階数：地上54階，

地下2階、塔屋1階 軒高：GL+174.2m

B棟 建築面積：10736㎡

延床面積：61321㎡ 階数：地上45階，

地下2階、塔屋1階 軒高：GL+146.0m

用途：集合住宅 構造：高強度RC制震構造

床：段差付PC合成床版

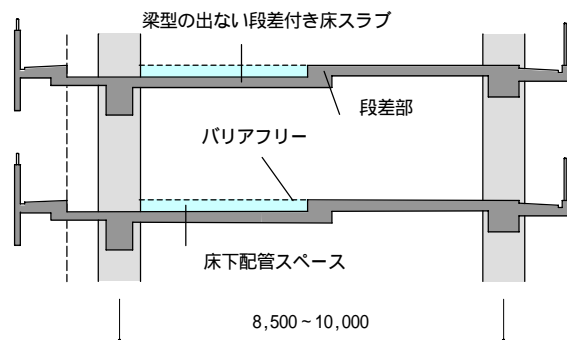


図-1 段差付き合成床スラブ概念図



写真-1 施工状況(A棟)



写真-2 段差付きプレキャストスラブ



江口尚之
PC建築事業部
設計部

2. 設計

2.1 PC版における段差部の特徴

通常、PC版に段差部を設ける場合、大まかに分けて以下に示す2通りの工法が考えられる。

ポストテンション工法によるPC鋼材が段差部で連続するタイプ (図-2)

プレテンション工法によるPC鋼材が段差部で不連続なタイプ (図-3)

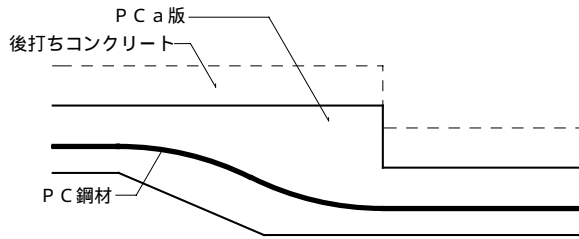


図-2 PC鋼材が連続するタイプ

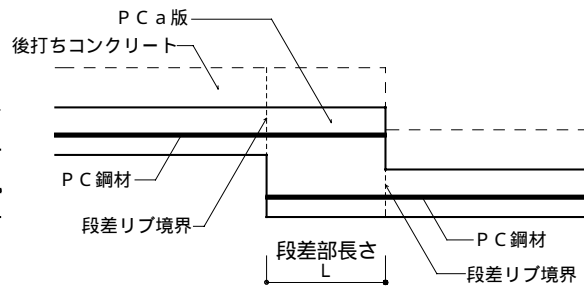


図-3 PC鋼材が不連続なタイプ

ポストテンション工法は段差部のPC鋼材が連続するメリットがあるが、段差部にハンチを設ける必要がある。また、定着具を納める事から一般的に版のボリュームが増える傾向となり、不経済な面がある。さらに製品脱型後に緊張のための工程が追加される。一方、プレテンション工法はPC版のボリュームを大幅に軽減することが可能で、緊張管理も一括で行える利点があるが、最も応力が厳しくなる中央段差部でPC鋼材が不連続となるため、段差リブ境界の危険断面において必要なプレストレスが導入されていなければならない。そのためには図中の段差部長さLの範囲内でPC鋼材が良好に定着されている必要がある。

本床スラブは図-3のタイプである(プレテンション工法)。図-4に本床スラブの標準図を示す。

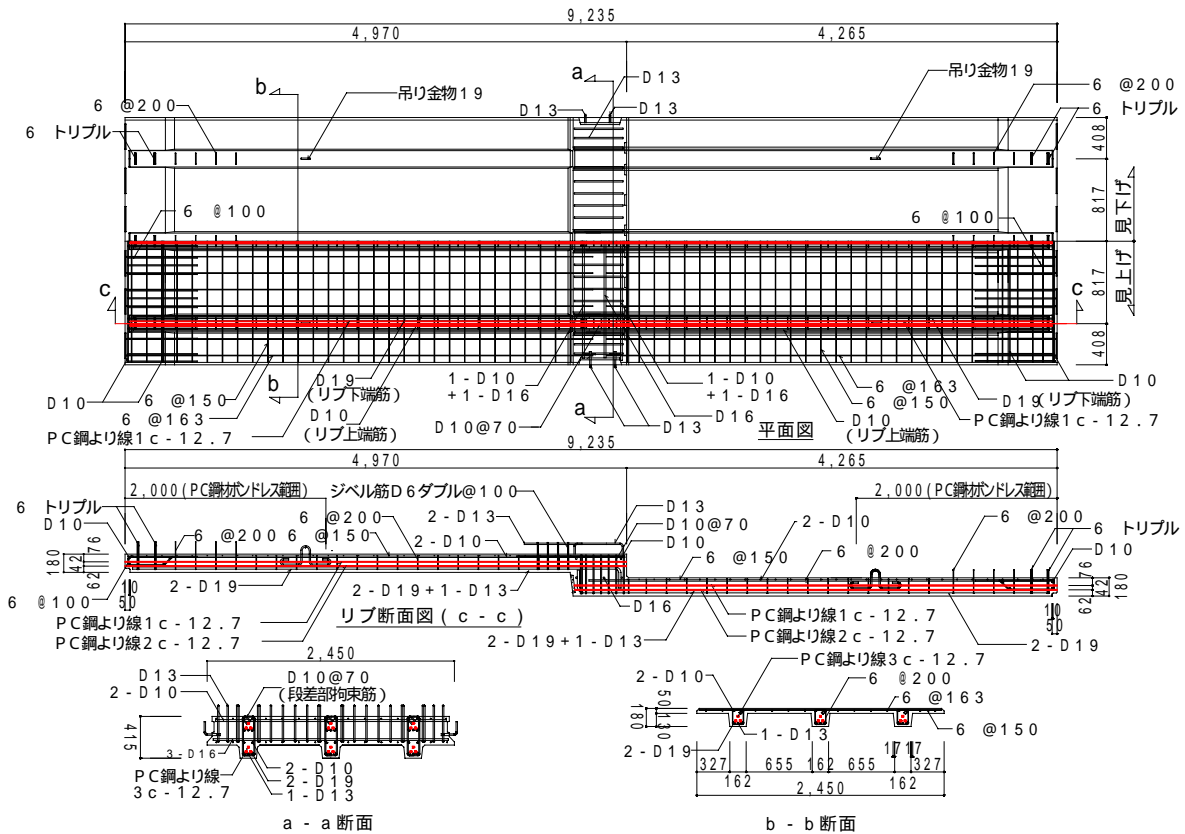


図-4 段差付PC床版 標準図

2.2 設計概要

- (1) 本構造は、プレキャストプレストレストコンクリート版（以下P C版）と場所打ち鉄筋コンクリートを構造的に一体化して外力に抵抗させるP C合成床版とする。
- (2) 本構造の構造種別はプレストレスト鉄筋コンクリート（種P C）造とする。
- (3) 部材設計は、断面の引張縁コンクリートの応力度がコンクリートの曲げ引張強度を超えない 0.1 の設計とする。ただし施工時についてはP C版にひびわれを許容しない観点から断面の引張縁コンクリートの応力度がパーシャルプレッシングのコンクリートの許容引張応力度以内となるように設計する。

- (4) 合成後部材端部に生じる負の曲げモーメントに対してはR C造として設計する。

- (5) 部材設計は、合成過程を考慮して行う。

- (6) 断面応力度の算定は、平面保持の仮定に基づいて行う。なお合成後についてはP C版とトップコンのヤング係数の差を適切に評価して等価断面を用いて算定する。

- (7) 応力計算は、P C版単体設計及び合成床版とも一方方向スラブとして行う。ただし合成床版については異方性スラブとしての検討も行う。

- (8) 支持条件は、図 - 5 に示すようにP C版架設時まではP C版両端より60cmの位置に設けた支保工による2点支持、トップコン打設時はさらに中央に支保工を追加した3点支持、P C版とトップコンが一体化後は両端の梁に支持されるものとする。なおこの場合の端部モーメントは、R C造の単スパンの小梁が大梁から受ける程度のもので固定端モーメントの0.6倍とする。

- (9) プレストレスの導入はプレテンション方式による。なお中央段差部においてP C鋼材は連続させずに、上下各々のスラブ毎に段差内（図 - 3 に示す長さL）で定着させるものとする。

- (10) 中央段差部の検討は、標準T型断面での検討の他、段差内の検討をP C鋼材の定着長さ部のプレストレス減退を考慮して行う。P C鋼材末端においてはプレストレスは0として計算を行う。なお断面の縁応力度の検討を全断面有効として行い、発生応力度レベルの確認を行うと共に、万一ひびわれが発生した場合を考慮してR C造としての設計を行うものとする。

- (11) 中央の曲げ破壊に対する検討においては、標準T型断面が曲げ破壊に至るまで中央段差部の破壊が先行せず、P C鋼材の定着長さを有効に保持できるよう確認する。

- (12) 端部のせん断に対する検討においては、導入プレストレスは0としてR C造として設計する。なお梁支持部においてはトップコンのみでせん断が伝達できるよう設計する。

- (13) P C版とトップコンの打継ぎ面のせん断の伝達はP C版の粗面の付着せん断により行う。粗面はほうき目による。なお部材両端部にはP C版リブ上部に結合鉄筋（ジベル筋）を補助的に設けてより一体接合を確実にする。

- (14) 地震時の床版の面内せん断力はトップコンのみで伝達させるものとする。また、万一P C版とトップコンの打継ぎ面に肌別れが生じて、P C版が脱落しないようなジベル筋を配筋して打継ぎ面における一体性の検討を行う。

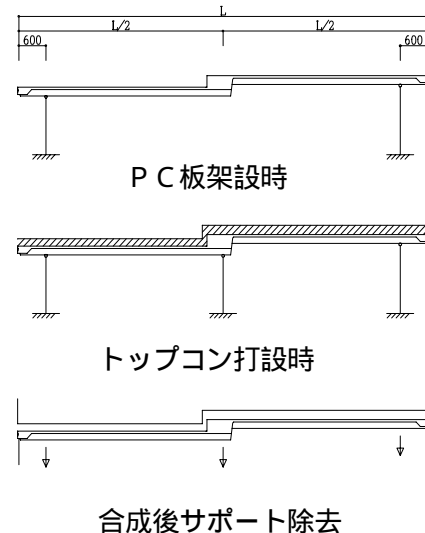


図 - 5 支持条件

3. 付着実験

3.1 実験概要

2. 1で述べたように、段差部におけるPC鋼より線の定着性状を把握する必要があるため、そのための予備実験を行った。はじめに、表面処理状況の異なるPC鋼より線を用いた試験体によりプレストレス導入時のストレスロスを確認し、続いてPC鋼より線の定着耐力を確認するための引抜き加力実験を行った。試験体配筋図を図-6に示す。試験体はプレテンションによりプレストレスを導入した直方体コンクリートとした。緊張材はPC鋼より線(7本より)12.7とし、拘束筋は実部材とほぼ同等の横筋比となるように設定した。また、引抜き力を導入する側の試験体端部は、PC鋼より線とコンクリートの付着を絶縁し、付着区間の長さは実大床スラブの段差部に相当する長さとした。引抜き力は、センターホールジャッキによりPC鋼より線に作用させ、加力は単調载荷とした。加力装置を図-7に、試験体の変動因子を表-1に示す。試験体は、PC鋼より線をそのまま使用したもの(素線)1体と付着性能を向上させるためにPC鋼より線の表面に処理を施したものの3体の計4体とした。インデント処理とは写真-2に示すようにPC鋼より線の側面に直径約2.5mm、深さ0.2mm程度のくぼみを等間隔で打ち付けたものである。

試験体に用いた各使用材料の諸元を表-2, 3, 4に示す。

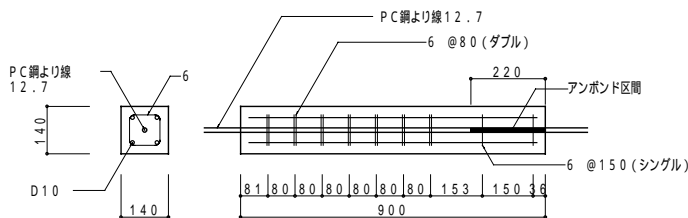


図-6 試験体配筋図

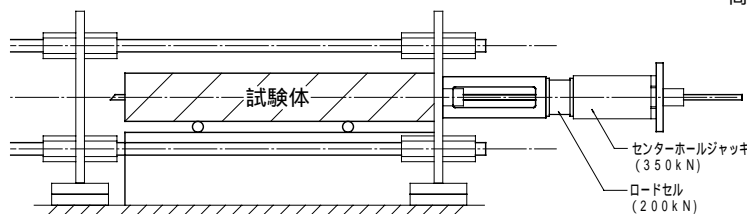


図-7 試験体加力装置

表-1 付着試験体変動因子

試験体	PC鋼より線表面処理方法
PC1	素線(無処理)
PC2	インデント処理
PC3	インデント処理+表面粗し*
PC4	エポキシ接着剤+砂塗布**

* 鋼材表面をサンドペーパーにて軽く研磨

** 高流動エポキシ接着剤に珪砂を混入したものを塗布した



写真-3 インデント鋼材

表-2 コンクリート

試験体	単位	B1	B2
PC1	(N/mm ²)	42.0	48.5
PC2		45.0	53.1
PC3		43.4	50.0
PC4		41.0	49.5

B1: プレストレス導入時

B2: 引抜き実験時

表-3 鉄筋

径	単位	降伏強度	引張強度
6	(N/mm ²)	421	591
D10	(N/mm ²)	375	528

表-4 PC鋼より線(SWPR7BL)

径	単位	降伏強度	引張強度	ヤング係数
12.7	(N/mm ²)	1752.6	1955.2	192300

3.2 実験結果

各試験体のプレストレス導入前と導入後のPC鋼より線のひずみ度分布を図-8に示す。試験体PC1(素線)およびPC4(エポキシ接着剤+砂)では、導入前に対して導入後の引抜き端位置でのひずみ度は、それぞれ47%、58%まで減少している。これに対し試験体PC2(インデント)およびPC3(インデント+粗面)では、導入前に対して導入後の引抜き端位置でのひずみ度は、それぞれ86%、87%であり減少量が小さい。表面にインデントを設けたPC鋼より線による引抜き端位置でのストレスロスは、素線のものに比べ非常に小さく付着性能に優れていることが分かる。

表-5にPC鋼より線の引抜き実験における最大荷重 P_u を示す。試験体PC1(素線)およびPC4(エポキシ接着剤+砂)では、最大荷重がPC鋼より線の降伏荷重に達していない。これに対し、PC2(イ

ンデント)およびPC3(インデント+粗面)では,最大荷重がPC鋼より線の降伏荷重に達しており,十分な定着耐力が確保されていることが分かる.以上の結果より,ストレスの抑制および定着耐力の確保のために,PC鋼より線の表面にインデントを設けることは,付着性能の向上に有効であることが確認できた.

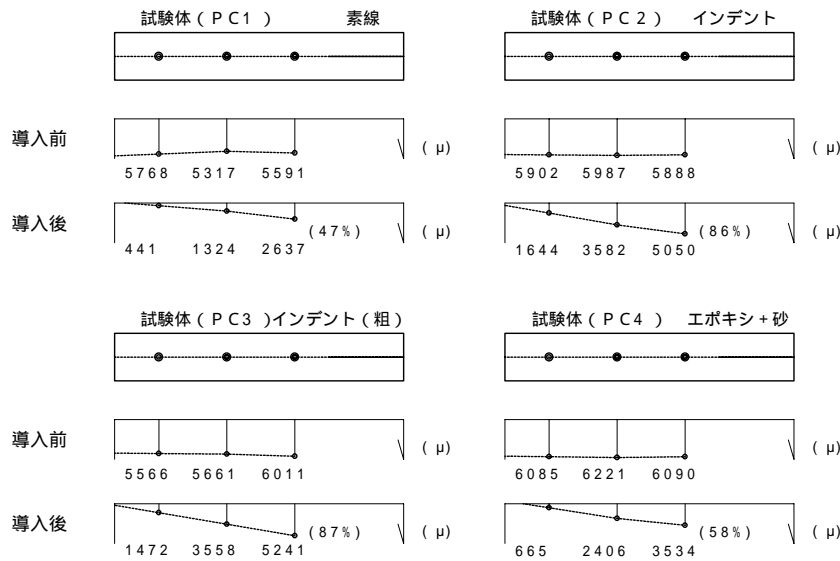


表 - 5 最大荷重

試験体	最大荷重 P_u (kN)
PC1	79.4
PC2	156.9*
PC3	157.9*
PC4	104.9

*鋼材の降伏荷重に達したため載荷を終了した.

図 - 8 PC鋼より線ひずみ度分布

3.3 実験結果の考察

付着実験の結果より,試験体におけるPC鋼より線の平均付着応力度について考察する.図-9に各試験体の定着区間における平均付着応力度 ave と引き抜き荷重 P の関係を示す.平均付着応力度 ave はひずみ値から区間ごとの負担荷重を算出し,付着面積で除して求めた.

これらの図によると,PC1の ave は引き抜き荷重によらず一定値 (2.2 N/mm^2) となっており,すべり量との関連も見られなかった.これに対してPC2,3は引き抜き荷重の増大に伴い, ave の値が増加する傾向にあり,付着強度もPC1のおよそ3倍程度の性能を示している.

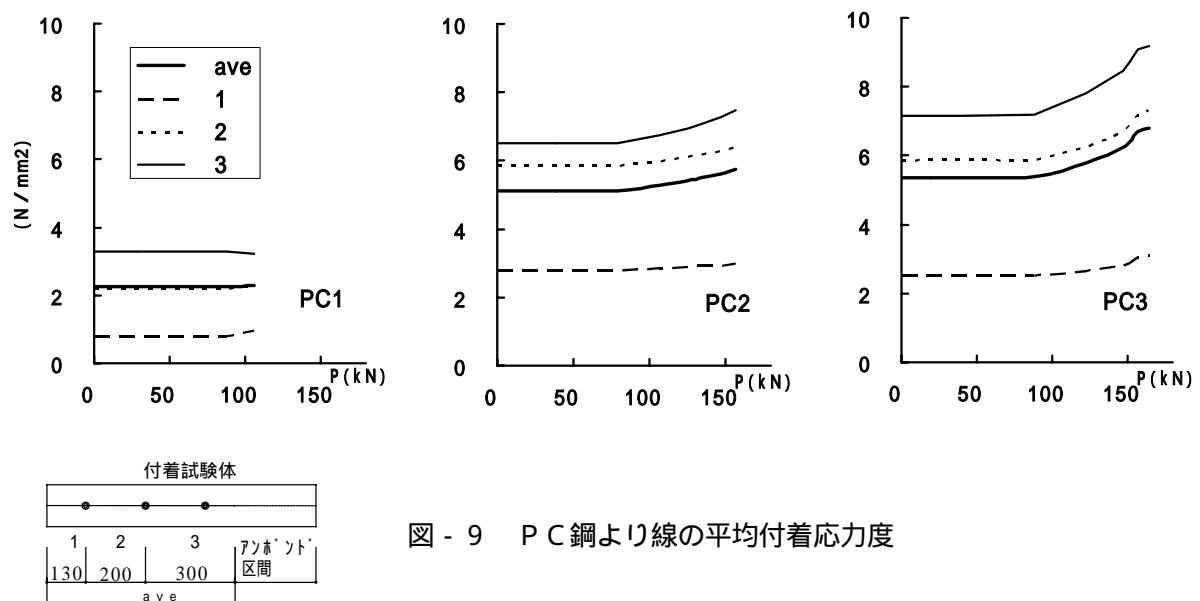


図 - 9 PC鋼より線の平均付着応力度

4. インデントPC鋼材を用いた実大試験体確認実験

前項で述べた付着実験の結果より、付着性能が良好だったインデントPC鋼材を採用して実大試験体による確認実験を行った。

4.1 実験計画

床スラブ試験体は実部材とほぼ同形状とした。PC版は主筋方向にリブを有し、リブ内にPC鋼より線を配置している。段差上部および段差下部のT型リブ内に配置したPC鋼より線は、それぞれ段差部に定着している。試験体は、実部材と同様にプレストレスを導入したPC版を製作した後、場所打ちコンクリートを打設して合成床スラブとした。試験体の変動因子は、PC鋼より線の表面処理方法とした。ここでは、前述の付着実験により、優れた定着性能が確認された表面処理方法の異なる2種類のPC鋼より線（インデント、インデント+粗面）と素線（比較のため）を用いた。図-10に試験体配筋図を、表-6に試験体の変動因子を示す。加力方法は、試験体両端を仮想反曲点位置でピン支持とし、中央2点に鉛直方向荷重を载荷した。図-11に加力装置を示す。载荷履歴は、施工時荷重（場所打ちコンクリート打設時にサポートを3層配置した状態を想定）に相当する荷重で3回、設計荷重（常時荷重）に相当する荷重で2回の繰り返し载荷を行った後、ひび割れ計算荷重、およびレベル1、レベル2の上下方向地震時荷重を上回る想定荷重でそれぞれ1回ずつ繰り返し、破壊荷重まで载荷した。加力スケジュールを図-12に示す。

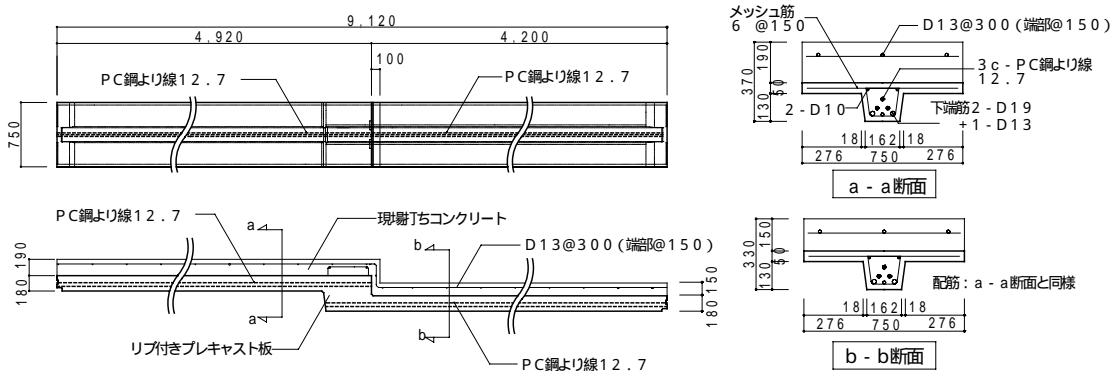


図-10 試験体配筋図

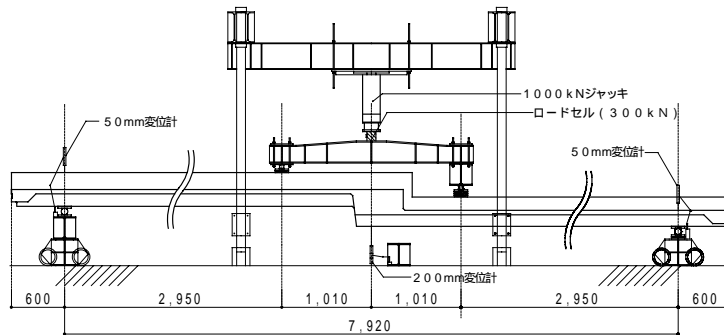


図-11 試験体加力装置

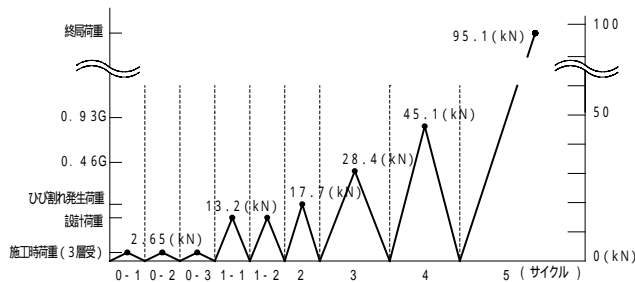


図-12 加力スケジュール

表-6 試験体変動因子

試験体	PC鋼より線表面処理方法
TPS1	素線
TPS2	インデント処理
TPS3	インデント処理 + 表面粗し

4.2 実験結果

(1) PC鋼より線導入時ひずみ度分布

図-13にプレストレス導入時のPC鋼より線のひずみ度分布を示す。インデント鋼材を使用したTPS2,3の段差部ひずみ度分布を見ると段差部分と床板部分の境目となる断面位置において、ほぼ良好なプレストレスが導入されていることがわかる。これと比較して素線を用いたTPS1のひずみ度は、段差リブ境界面でTPS2,3の半分以下となっており、大幅にストレスが失われている事がわかる。

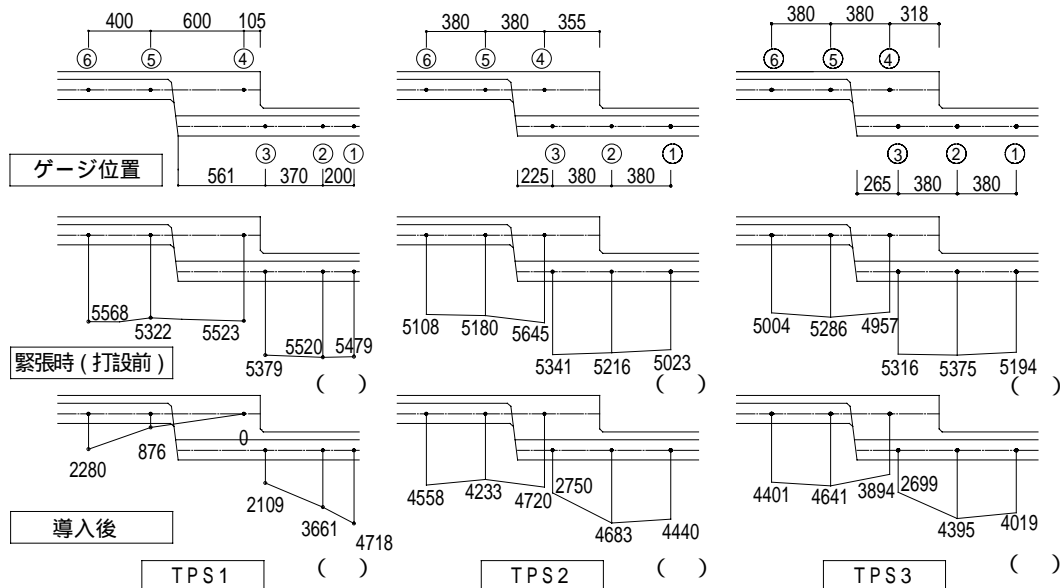


図 - 13 PC鋼より線導入時ひずみ度分布

(2) ひび割れ幅の推移

表-7に各試験体のひび割れ幅の推移を示す。TPS1はPC鋼より線の付着不良により載荷前にひび割れが発生した。その後も載荷が進むに従って鋼線のすべりが起き、ひび割れ幅は徐々に開いていき、設計時で最大0.1~0.15mm、鉛直震度(kv=0.93)の時に最大0.3~0.4mmという結果になった。それに対してTPS2は、施工時荷重まではひび割れは観測されず、発生後も微細なひび割れであり、その幅はほとんど進展しなかった。鉛直震度相当(kv=0.93)時でひび割れ幅が最大0.1mmになったが、除荷後にはひび割れはほぼ閉じた。TPS3は設計荷重時までひび割れが観測されず、ひび割れの進展状況についてはTPS2とほぼ同じ傾向であった。

表 - 7 ひび割れ幅推移一覧 (単位: mm)

	測定部分	載荷前	施工時	除荷後	設計時	除荷後	0.46 G	除荷後	0.93 G	除荷後
		TPS1 (素線)	上付根	0.04	0.04	0.04	0.15	0.10	0.25	0.15
	上リブ	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04
	下リブ	0.04	0.04	0.04	0.10	0.05	0.20	0.10	0.30	0.15
TPS2 (インデント)	上付根	無	無	無	0.04 未	0.04 未	0.04 未	0.04 未	0.04	0.04 未
	上リブ	無	無	無	0.04 未	0.04 未	0.04 未	0.04 未	0.04	0.04 未
	下リブ	無	無	無	0.04 未	0.04 未	0.04 未	0.04 未	0.10	0.04 未
TPS3 (インデント粗)	上付根	無	無	無	無	無	0.04 未	0.04 未	0.04	0.04 未
	上リブ	無	無	無	無	無	0.04 未	0.04 未	0.06	0.04 未
	下リブ	無	無	無	無	無	0.04 未	0.04 未	0.08	0.04 未

*測定部分 上付根：上段リブと中央段差部の境界付近 上リブ：上段T型断面のリブ部分
下リブ：下段T型断面のリブ部分

(3) 破壊性状

各試験体の破壊性状を図 - 14 に示す。TPS1 は曲げひび割れが分散して発生し、主筋降伏後にひび割れ幅が大きくなり、たわみが進んだ。終局時において、ひび割れの多くは場所打ちコンクリートの上部にまで達している。TPS2, 3 も曲げひび割れがリブ下端より分散して発生しており、典型的な曲げ破壊の性状を示した。また、荷重 $P = 80 \sim 90\text{kN}$ の時に場所打ちコンクリートに斜めひび割れが発生したが、さらに変形が進んでも耐力の低下はみられなかった。

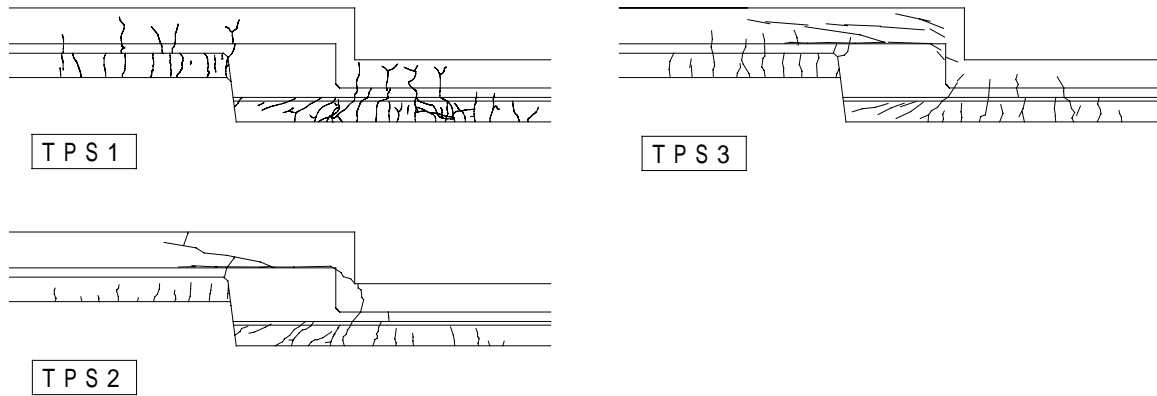


図 - 14 各試験体の終局時破壊状況

(4) 荷重変位関係

図 - 15 に各試験体の荷重変位関係を示す。TPS1 は設計荷重を上回る耐力が得られ、耐力低下も見られなかったが、復元性の乏しいRC部材に近い履歴ループを描いている。一方、TPS2, 3 はサイクル4 ($P_{\max} = 45.1\text{kN}$: 鉛直震度 $k_v = 0.93$) まではPC部材特有の原点復帰の傾向がみられ、復元力に富んだ部材であることがわかる。また両試験体は、包絡線、履歴ともほぼ同等であり、鋼材表面処理による差異は特にみられなかった。

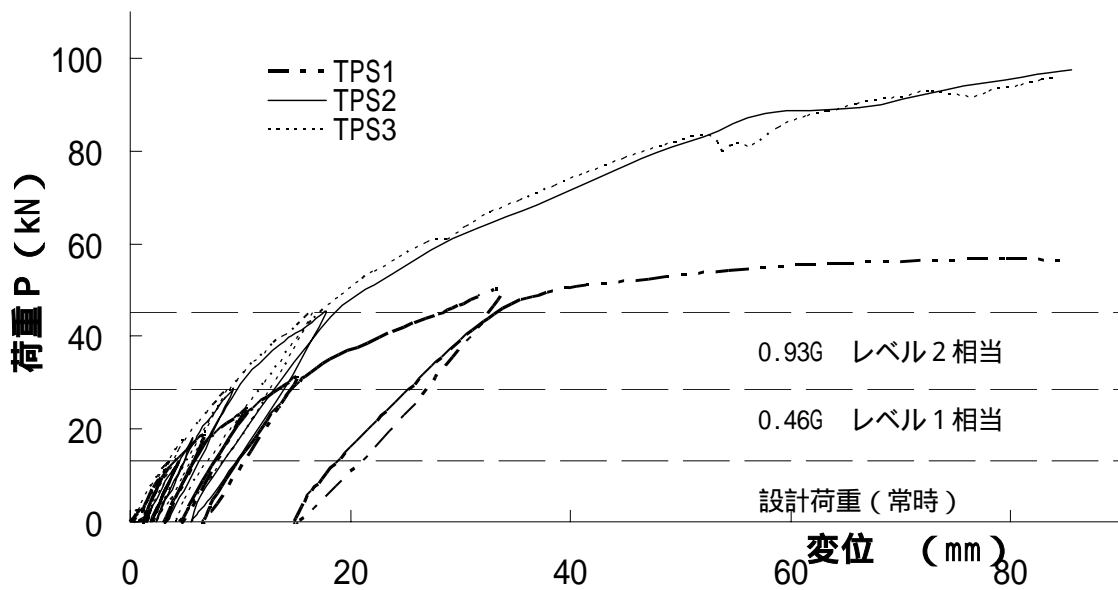


図 - 15 各試験体の荷重 P - 変位関係

(5) PC鋼より線の荷重 - ひずみ度関係

図 - 1 6 に荷重とPC鋼より線のひずみ度の関係を示す。(ゲージ位置, 図 - 3 参照 ひずみ度は載荷時を原点として表している) TPS1 は載荷を開始してからすぐにひずみ度が圧縮側の値を示した。その後もサイクルが進むにつれ圧縮側へ増大しており, 付着切れによるストレスロスが起きている事が推測される。TPS2, 3 においてはサイクルの進行と共にひずみ度が引張り側に増大していき, 最終的には載荷時からおよそ 3000 μ 程度になった。このひずみ度に, 導入時のひずみ度, 後打ちコンクリート合成後自重(試験体載荷前)のひずみ度を加算すると約 9000 μ となるのでインデント処理をしたPC鋼より線は降伏していると考えられる。

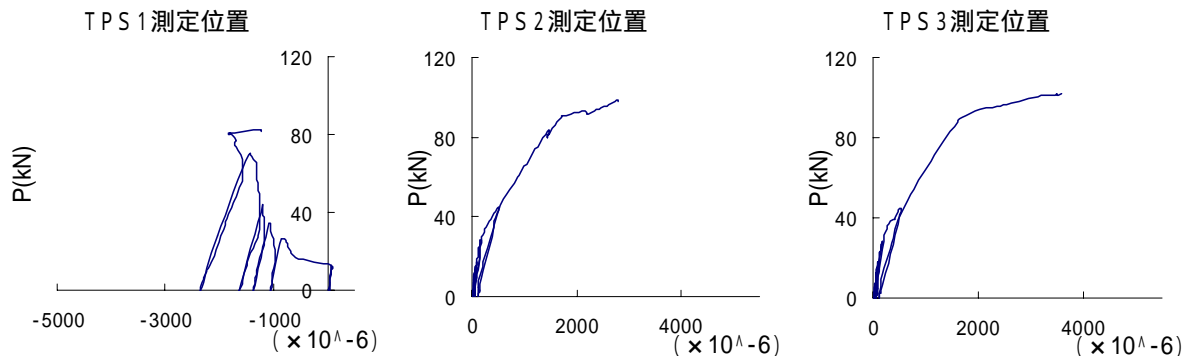


図 - 1 6 各PC鋼より線 荷重 - ひずみ度関係

(6) 段差床の終局荷重

実大実験の試験体3体について, 終局荷重の計算値と実験結果の比較を表 - 8 に示す。計算値のPC鋼より線の強度は, 付着実験から得られた最大引抜き荷重を用いている。なお, TPS1 では, PC鋼より線の強度に降伏強度を用いた計算値をあわせて示す。TPS2 および TPS3 の試験体は, 計算値と実験値は非常に良く一致した。これは, 終局時において段差部際のPC鋼より線が降伏していることを示しており, インデント処理したPC鋼より線は, 降伏に達するのに段差部の定着強度が十分であることがわかる。一方 TPS1 では, 実験値がPC鋼より線の強度に降伏強度を用いた計算値を下回っており, PC鋼より線は降伏していないものと推定される。

表 - 8 終局荷重

試験体	終局荷重 実験値(kN)	終局荷重 計算値(kN) ^{*1}	実 / 計
TPS1	58.7	54.6 (95.5) ^{*2}	1.07 (0.61) ^{*2}
TPS2	98.0	99.7	0.98
TPS3	101.0	100.5	1.01

*1: 終局荷重の算出はPC規準65条によった。

*2: TPS1 () 内数値はPC鋼より線の降伏強度による計算値

5. まとめ

これまでの実験から得られた知見を以下に述べる。

- (1) 表面にインデント処理を施したPC鋼より線は, 素線のものと比較して優れた定着性能があり, ストレスロスの抑制に有効である。
- (2) 段差スラブの中央段差部境界に必要なプレストレスを導入する事において, インデント処理を施したPC鋼より線を用いる事は有効であることがわかった。
- (3) インデント処理によりPC鋼より線の定着力を確保することにより, 段差付き合成床スラブは, 施工時荷重, あるいは鉛直地震動も考慮した荷重を上回る十分な耐力および変形性能を有することを繰り返し載荷による実大規模の段差床実験により示した。

6. 施工写真

施工中の写真を、写真 - 4 ~ 写真 - 7 に示す。(平成15年1月下旬の時点でA棟5階の架設終了)



写真 - 4 5階後打ちコンクリート打設状況



写真 - 6 5階スラブ配筋状況



写真 - 5 5階後打ちコンクリート打設状況



写真 - 7 5階スラブ見上げ

謝辞

実大実験の実施に戸田建設(株)、インデント鋼材の開発に住友電工スチールワイヤー(株)、部材製作に(株)ピーエス三菱茨城工場に御協力いただきました。深く感謝の意を表します。