

段差付き一方向アンボンドスラブの曲げ載荷実験

Flexural Loading Tests of One-way Unbonded Prestressed Concrete Slab With Step Portion

江頭 寛 HIROSHI EGASHIRA
 山中 久幸 HISAYUKI YAMANAKA
 鈴木 亨 TORU SUZUKI
 小坂 英之 HIDEYUKI KOSAKA
 新上 浩 HIROSHI SHINJO
 鈴木 俊哉 TOSHIYA SUZUKI

超高層集合住宅のバリアフリーや大スパン空間を満足させる床工法として、段差付きスラブの開発を行った。本研究では段差付きスラブにアンボンドPC工法を適用した一方向スラブの曲げ載荷実験を実施し、構造性能の把握を行った。その結果、本工法は主筋降伏後も耐力が上昇するアンボンド工法特有の終局性状を有することを確認した。また、PC鋼線の最適配置の検討では、反曲点を適所に設けることで段差部に生じる偏心モーメントが低減され、モーメント分布の不連続性を解消できることが判明した。

キーワード：大スパン、アンボンドPC工法、中空スラブ、偏心モーメント、反曲点

To satisfy the disabled access requirements and large span space of super high-rise housing, the one-way unbonded prestressed concrete slab with a step has been the proposed solution. Within this framework, flexural loading tests of the slab were executed, as well as examination of the optimal arrangement for PC-strands. The following findings were obtained; 1) Test results showed that the yield strength of the slab increased after the yield of steel bars, as well as the behavior of the usual unbonded PC structure, 2) the discontinuity of moment distribution could be canceled by the proper arrangement of strands at the step portion.

Key Words: Long Span, Unbonded Prestressed Concrete, Void Slab, Eccentric Moment, Inflection Point

1. はじめに

近年の超高層集合住宅では、段差のないバリアフリー床、柱の少ない大スパン空間など建築計画の自由度の高い構造が求められている。こうした要求を満足させる一つの方法として、各方面で段差付き大スパン床工法の開発が行われている。大スパン床工法において最も重要なことは、軽量化と剛性の確保であり、たわみやひび割れを効率よく制御するためにもプレストレスの導入が効果的である。段差スラブにこれを適用する場合、段差部を含めて全長に亘るPC鋼線の配線方法には、その形状と導入プレストレス力のみならず、段差部に必然的に生じる偶力を含め検討課題が多い。そこで本研究では段差付きスラブにアンボンドPC工法を適用した一方向スラブの曲げ載荷実験¹⁾を実施し、その構造性能の把握とPC鋼線の効果的な配線方法に関する検討を行った。

2. 実験概要

(1) 試験体

試験体の諸元を表-1に示す。試験体は、約1/1.6縮尺の段差付きの一方向スラブ3体である。各試験体の構造性能を比較するために、スラブ形状、配筋量、材料強度およびプレストレス導入量は同一とし、床工法の違いをパラメータとした。type1はデッキプレート型枠工法を想定し、ボイド型枠に厚さ0.6mmの薄肉角形鋼管を使用した中空スラブ、type2はハーフPCa床版上に発泡ポリスチレン製ボイド型枠を使用した合成中空スラブ、type3は中空スラブに代わるものとして軽量コンクリートを使用し、材料による軽量化と施工性の向上を図った無垢断面のスラブである。

試験体全体図を図-1に、配筋詳細図を図-2に示す。スラブの寸法は、スパンLが6,900mm、厚さが220mm、幅

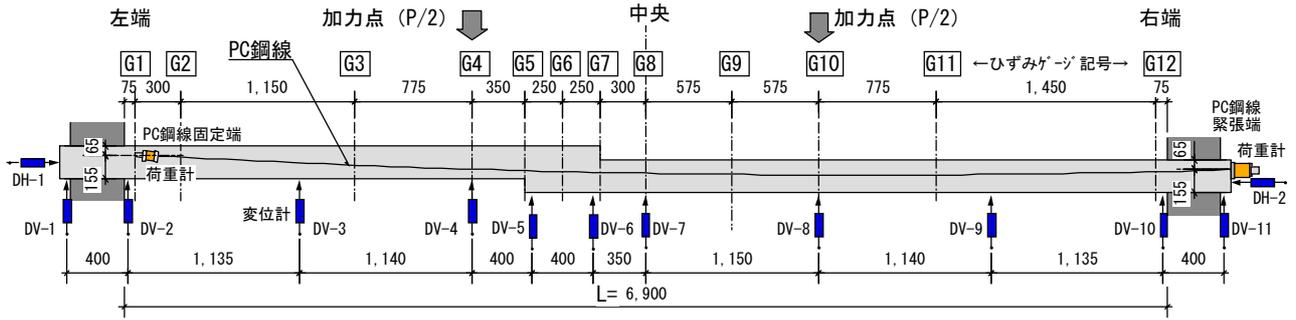


図-1 試験体全体図

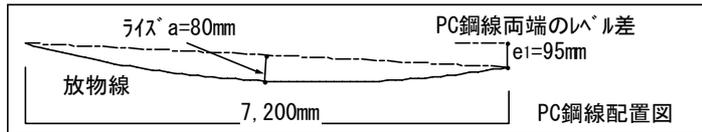


表-1 試験体の諸元

試験体記号		type 1	type2	type3
工法	種類	デッキプレート型枠床	ハーフPCa合成床	デッキプレート型枠床
	ボルト型枠	薄肉角形鋼管	発泡ポリスチレン	なし
設計荷重	中空率*	84%		-
	自重	23.3kN		
	仕上げ	1,000N/m ²		
プレストレス	積載	1,800N/m ²		
	総導入力	161kN		
材料強度	キャンセル率**	40%		
	コンクリート	44.4N/mm ²	44.4N/mm ² (PCa版: 37.2N/mm ²)	46.7N/mm ² 軽量コンクリート
	σ_B	D10: $\sigma_y = 352\text{N/mm}^2$ (type2のPCa版内: 422N/mm^2)		
	鉄筋	降伏荷重: 156kN/1本 ($\sigma_{py} = 1,580\text{N/mm}^2$)		
	PC鋼線	トップ筋9φ: 415N/mm^2 、下端筋6φ: 354N/mm^2		
ヤング係数	コンクリート	$2.97 \times 10^4\text{N/mm}^2$	$2.89 \times 10^4\text{N/mm}^2$ (PCa版: $2.74 \times 10^4\text{N/mm}^2$)	$2.07 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 軽量コンクリート
	鉄筋	D10: $1.88 \times 10^5\text{N/mm}^2$ (type2のPCa版内: $1.94 \times 10^5\text{N/mm}^2$)		
	トラス筋	トップ筋9φ、下端筋6φ: $2.03 \times 10^5\text{N/mm}^2$		
断面	サイズ	厚さ220mm、幅750mm、内法スパン6,900mm、段差95mm		
	主筋	部位	中央	端部
		上端筋	6-D10	12-D10
		下端筋	6-D10	6-D10
PC鋼線	SWPR7B-12.7φ × 2本			

* (中空部をスラブ全長に均したときの平均中空断面積) / (スラブ全断面積)

**設計荷重に対しプレストレスの吊上げ力がキャンセルする割合

が750mmである。スラブ段差は95mmであり、スパン中央から左端寄りに300mmの位置にある。アンボンド PC 鋼線は、ライズが80mmの放物線配線とした。段差部分の配筋は、在来スラブで一般に用いられる段差配筋に斜め補強筋を付加したものである。

(2) 加力・測定方法

実験状況を図-3に示す。加力方法は、図-4に示す油圧ジャッキを用いた2点荷重による一方向漸増繰返し加力である。折返しのピーク値は、荷重Pで+10,+20,+50kNとした後、たわみスパン比 δ/L で+1/200,+1/75,+1/50とした。加力終了後には、PC鋼線のプレストレス力を除荷して再度加力し、RC部材としての最大耐力を確認した。また、各加力サイクルの除荷後に砂袋落下による自由振動実験を行い、破壊に至るまでの固有振動数の変化

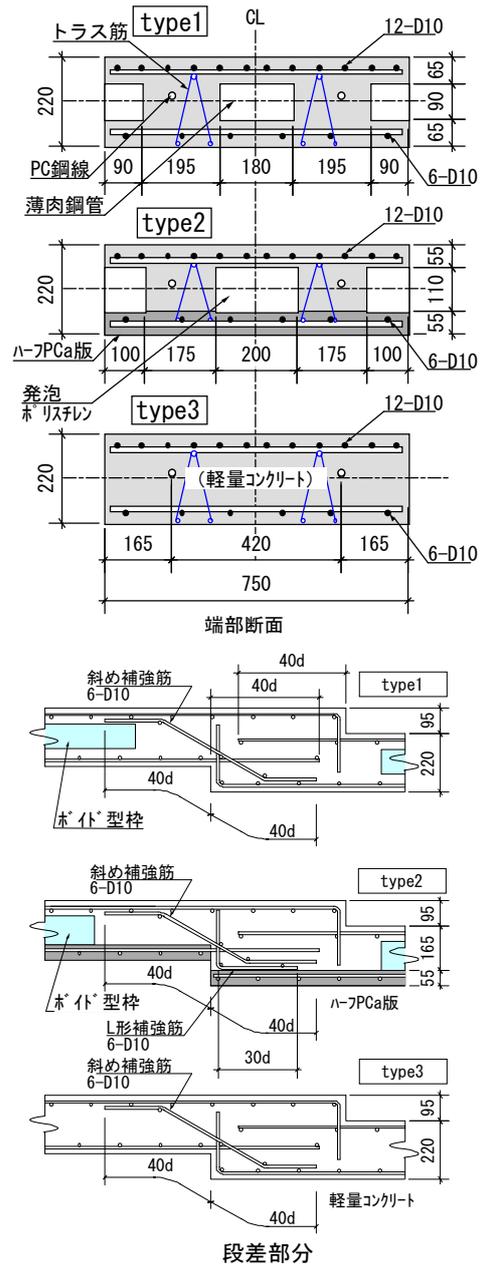


図-2 試験体配筋図

を測定した。図-1にスラブの変位、主筋のひずみ度の測定位置と、PC鋼線のプレストレス力を測定した荷重計の位置を示す。



図-3 実験状況 (type1)

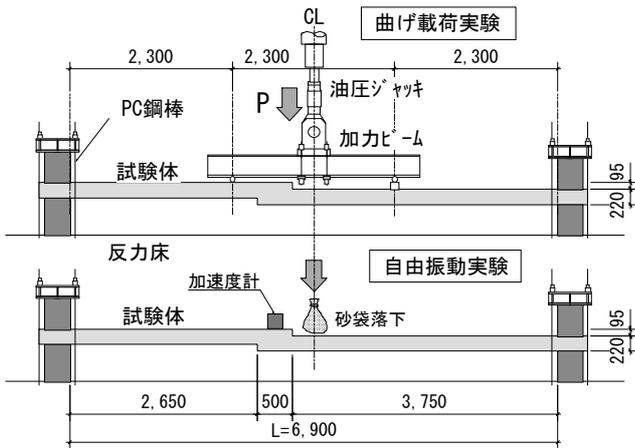


図-4 加力方法

3. 実験結果

(1) 荷重 - 変位関係

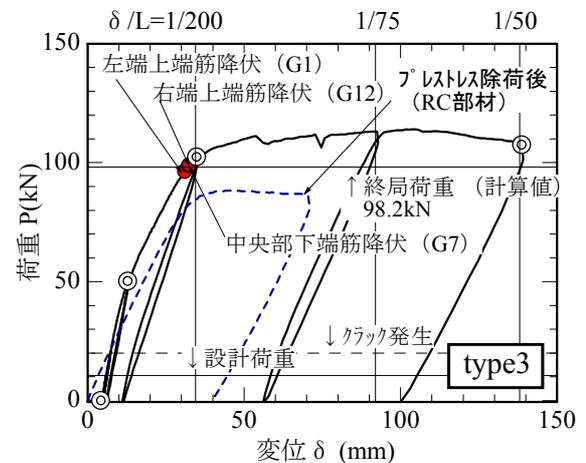
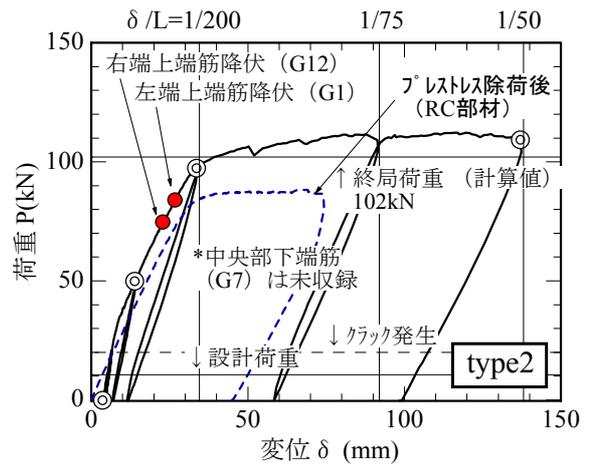
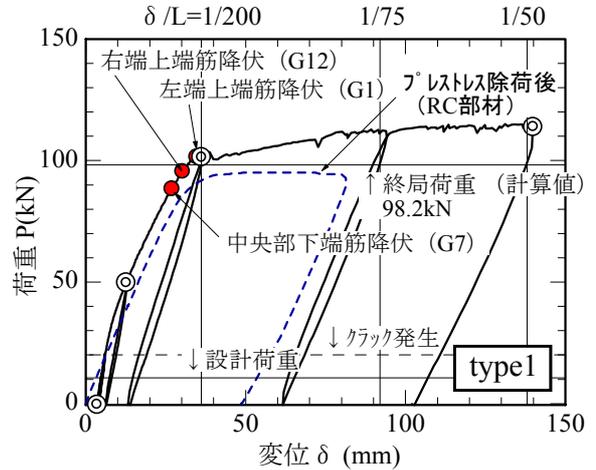
最大荷重の一覧を表-2に、荷重Pとスラブ中央部の変位 δ (DV-7)の関係を図-5に示す。 $\delta/L=1/75$ 程度までは各試験体とも同様な曲線を描き、同等な構造的な性能を有することが判明した。設計荷重時にはひび割れは観察されず、その2倍程度の荷重で端部上端および中央部下端に0.1mm程度のひび割れが発生した。 $\delta/L=1/300 \sim 1/200$ では、端部上端、中央部下端の主筋が降伏した。type1,2は主筋降伏後もプレストレスが増加し、加力終了まで耐力が漸増したが、type3は $\delta/L=1/75$ 付近で中央上端のかぶりコンクリート部分に小さな圧壊を生じ、耐力がやや低下した。段差部分の最終破壊状況を図-6に示す。各試験体とも段差部分に大きな損傷は見られず、両端部の上端と中央部の下端で曲げひび割れが進行する3ヒンジの破壊モードを示した。

プレストレス除荷後の荷重-変位曲線を図-5に、最大荷重を表-2に併記する。PC鋼線とRC部材との荷重負担割合は各試験体とも2:8程度となっている。

表-2 最大荷重一覧

試験体	①最大荷重* (kN)	②プレストレス除荷後 (RC部材) (kN)	PC鋼線負担率 (①-②) / ①
type1	115	95.1	0.17
type2	112	88.3	0.21
type3	114	88.3	0.23

*自重は含まない



◎印：自由振動測定時の経験最大変位

図-5 荷重-変位曲線

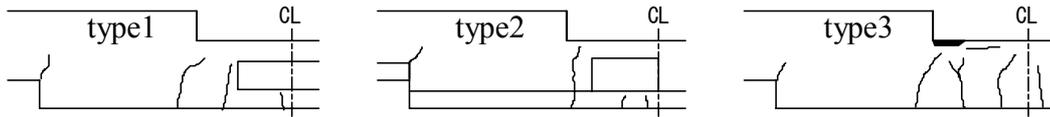


図-6 段差部破壊状況

(2) 固有振動数

図-7に固有振動数の推移を示す。図の横軸は、図-5中に◎印で示す各加力サイクルで経験した最大変位である。加力前の固有振動数は type1 が14.4Hz, type2 が14.2Hz, type3 が13.2Hzであり、軽量コンクリートの type3 は1割程度低くなっている。加力後の固有振動数は各試験体とも同様な傾向を示し、加力前の固有振動数に対して $\delta/L=1/500$ 後で約98%, $\delta/L=1/200$ 後で約90%, $\delta/L=1/50$ 後で70%となっている。

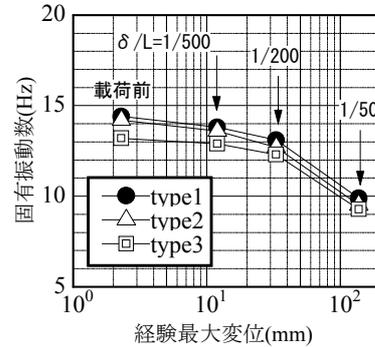


図-7 経験変位と固有振動数の関係

(3) 終局荷重の検討

図-8に終局荷重 P_u の実験値と計算値との対応を示す。ここで、実験値は最大荷重とし、計算値は、実験結果に基づきスラブの崩壊形を3ヒンジモデルとして、式(1), (2)²⁾によるヒンジ発生部位の終局モーメント M_u から算出したものである。

$$M_u = \frac{7}{8} T_y d + T_p \left(d_p - \frac{1}{8} d \right) \quad (1)$$

$$T_p = a_p (0.75 \sigma_{pe} + 0.25 \sigma_{py}) \quad (2)$$

ここに、

M_u : 断面の終局曲げモーメント

d : 引張鉄筋有効せい

d_p : PC鋼線有効せい

T_y : 引張鉄筋の引張合力 (降伏と仮定)

T_p : 終局モーメント時PC鋼線の引張合力

a_p : PC鋼線断面積

σ_{pe} : PC鋼線有効引張応力度

σ_{py} : PC鋼線規格降伏点応力度

式(1), (2)より算定される終局モーメント M_u において、RC部分(式(1)第1項)の負担率は68%, PC鋼線(同第2項)は32%であった。図-8より終局荷重 P_u の実験値は、何れの試験体も計算値の1.25~1.35倍となり、計算値は安全側の評価となった。RC部分の負担荷重の割合は、計算値の68%に対し実験値は77~83%であった。実験値が計算値に比べて大きいのは、プレストレスにより導入されたスラブの圧縮軸力の影響等が考えられる。

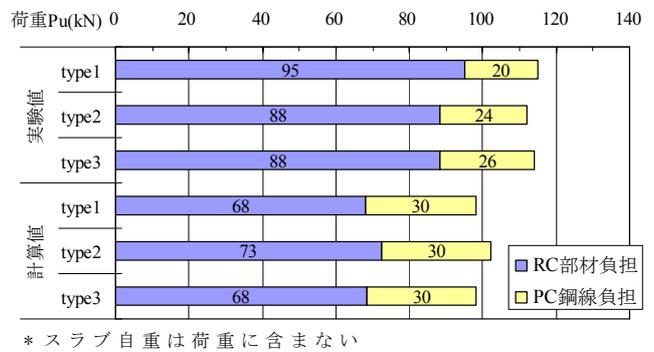


図-8 終局荷重の比較

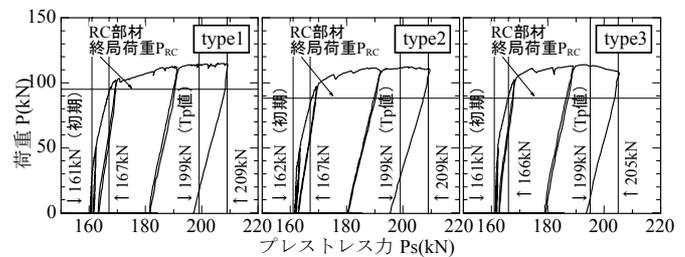


図-9 荷重-プレストレス力関係

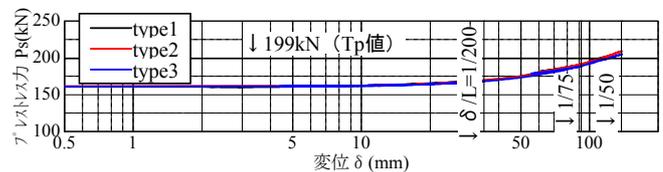


図-10 変位-プレストレス力関係

(4) 終局時のプレストレス力の挙動

荷重 P とプレストレス力 P_s (PC鋼線緊張側定着部での測定値) の関係を図-9に、スラブ中央の変位 δ と P_s の関係を図-10に示す。加力開始直後は初期導入量からの応力増分は小さくアンボンド特有の性状を示している。

プレストレス力は RC 部分の終局荷重を超える $\delta/L = 1/200$ 以上で上昇しており、PC 鋼線が終局時の荷重負担に有効に機能することを確認した。最大耐力時のプレストレス力 P_s は、同図に示すように、式 (2) の T_p の計算値 (アンボンド PC 鋼線引張合力: 199kN) に近い値を示している。

4. PC 鋼線の最適配置方法の検討

(1) 応力分布状態への影響

主筋のひずみ分布を図-11に示す。縦軸は降伏ひずみに対する比である。ひずみ分布は、天井面の段差部 (a) で小さく、床面の段差部 (b) およびスラブ中央部で大きい不連続な分布形状を示している。図-12の「実験値 (●)」は、type1 の $P=10\text{kN}$ 時におけるひずみ分布より求めた曲げモーメントである。ひずみ分布と同様に曲げモーメントは段差部で不連続であり、段差から右側のスラブ部分で曲げモーメントが大きくなっている。この分布形状を図-13(1)に示すように「②プレストレス軸力による偏心モーメント」の影響を考慮することで説明できる。これを考慮した曲げモーメントの計算値は、図-12の「計算値」に示すように実験値とおおむね対応している。通常のアンボンドPC工法では、スラブの曲げモーメントはPC鋼線のプレストレスによる吊上げ効果のみで評価するが、スラブに入るプレストレス軸力が大きい場合は、PC鋼線両端の偏心距離 e_1 によって生じる偏心モーメントの影響を考慮する必要があるものと考えられる。

(2) PC 鋼線に反曲点を設けた配線方法の提案

プレストレス軸力による偏心モーメントの影響を緩和する方法として、図-13(2)の提案法に示す PC 鋼線の配線法を検討した。この配線法は、プレストレス軸力による偏心モーメントに対して逆向きモーメントを発生させるために、段差部付近で PC 鋼線に反曲点を設けたものである。 $P_s \cdot e_1 = P'_s \cdot e_2$ にすることにより、図の⑤に示すような曲げモーメントの不連続を解消することができる。さらに、結果として PC 鋼線のライズが大きく取れることとなり、より大きな吊上げ力も期待できることとなった。

(3) PC 鋼線配置の解析検討

本提案法による PC 鋼線の最適配線形状を解析的に検討した。解析モデルを図-14に、検討ケースを表-3に示す。本解析では、PC 鋼線の下部反曲点の位置 b (配線検討1) と段差部分の位置 $L1$ (配線検討2) をパラメータとし、各々の最適位置を検討した。

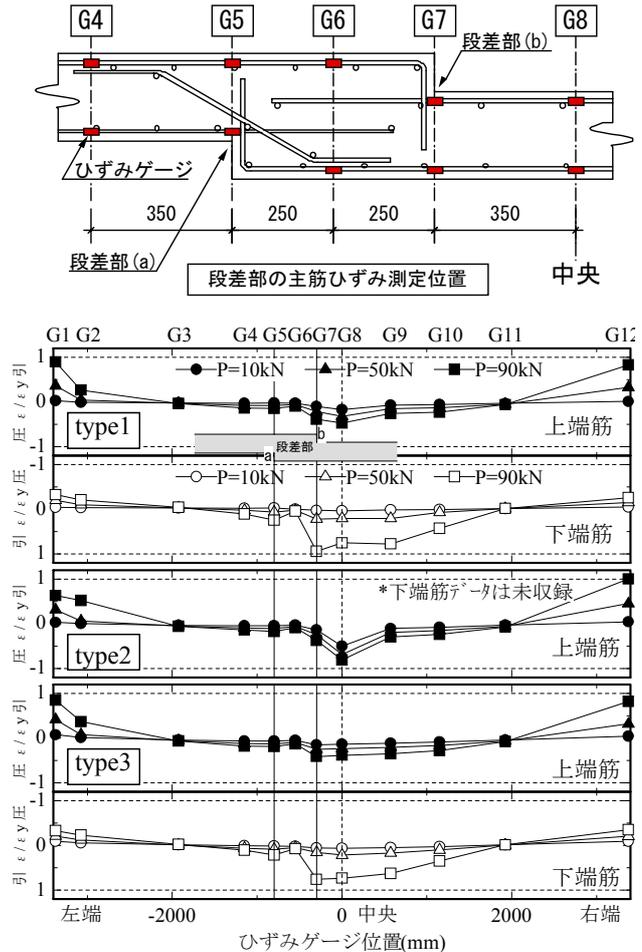


図-11 主筋ひずみ分布

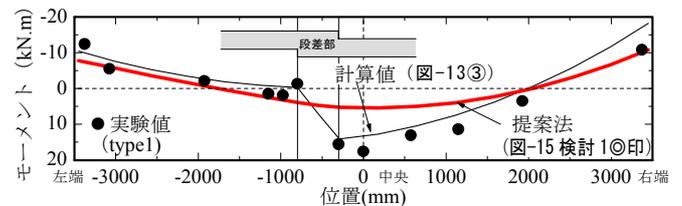


図-12 長期モーメント比較

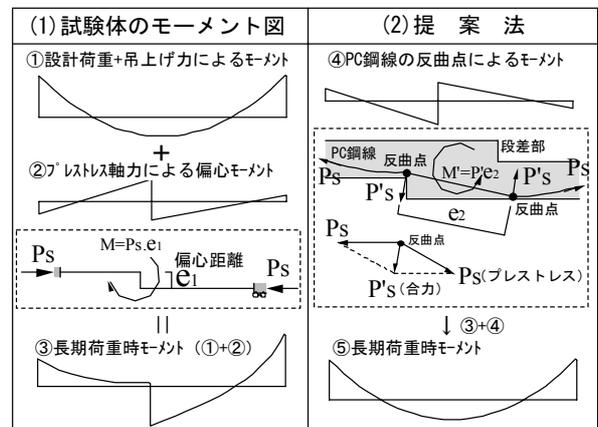


図-13 設計モーメント図

解析結果を図-15に示す。最適位置は同図に定義するモーメント量 (M_{TL}) が最小となる位置である。モーメント量 M_{TL} は各パラメータによって変動し、下部反曲点位置 b が反曲点のレベル差 ed の15倍付近 ($b/ed=15$)、段差部位置 $L1$ がスラブ中央付近 ($L1/L=0.5$) の場合に PC 鋼線の配線が最適となることが分かる。

この最適配線時の曲げモーメント分布の解析結果を、図-12の「提案法」に示す。プレストレス軸力による偏心モーメントがキャンセルされて吊上げ力のみが有効に作用し、曲げモーメント分布は、中央部の偏心モーメントの影響が減少して放物線形状となっている。

5. まとめ

段差付き一方向アンボンドスラブの曲げ載荷実験を行い、本工法の構造特性の把握と PC 鋼線の最適配線方法の検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 床工法の異なる3体の試験体は、何れも十分な構造性能を有することが確認された。
- 2) 本工法の終局耐力は既往の略算式²⁾で安全側に評価できることが確認された。
- 3) 段差スラブに PC 工法を採用すると、スラブの軸力負担が大きい場合には、段差部に偏心モーメントが発生し、曲げモーメントが不連続となった。
- 4) 偏心モーメントの影響は、PC 鋼線の反曲点を適所に設けることで緩和できることが分かった。しかしながら段差スラブの形状は多様であり、これらに対して一般性のある最適配線方法の解明までには至らず、検討課題を残した。

今後は実大スラブにて長期たわみ性状の検証実験を行うとともに、残された課題に対してさらなる検討を行い、本工法の実用化を図る所存である。

謝辞：本研究に当たり、ものつくり大学の河谷史郎先生から貴重な資料のご提供とご指導を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 江頭ほか：段差付き一方向アンボンドスラブの曲げ載荷実験その1～その2，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2，pp.163-166，2004.8
- 2) 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，pp.63-67，2003.2

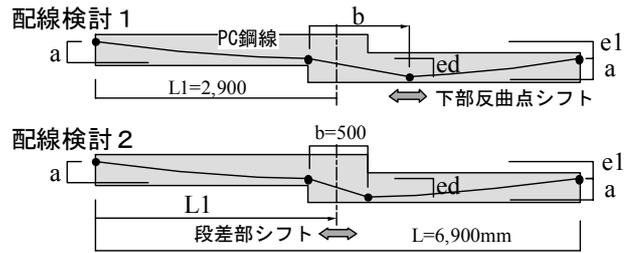
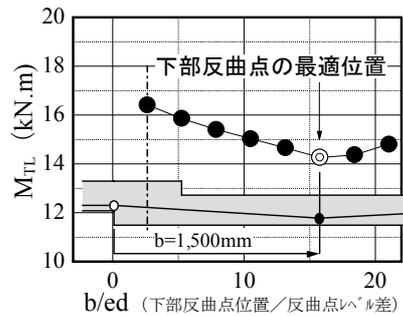


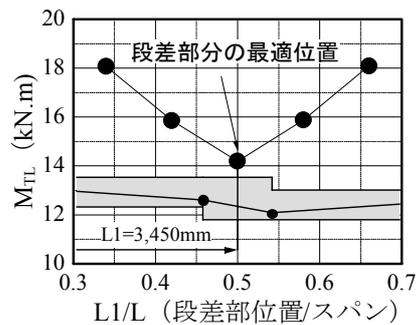
図-14 解析モデル

表-3 解析ケース

パラメータ	PC鋼線の配線検討1	PC鋼線の配線検討2
下部反曲点の位置	$b=250 \sim 2,000 \text{ mm} @ 250 \text{ mm}$	段差部の位置
	$b/ed=2.6 \sim 21.1$	$L1=2,350 \sim 4,550 \text{ mm} @ 550 \text{ mm}$
固定値	$L1=2,900 \text{ mm}$	$b=500 \text{ mm}$
共通事項	鋼線ライズ $a=115 \text{ mm}$ 、反曲点のレベル差 $ed=95 \text{ mm}$ プレストレス軸力の偏心距離 $e1=95 \text{ mm}$ スパン $L=6,900 \text{ mm}$	
解析条件等	サイズ、設計荷重、プレストレスは試験体と同じ 荷重：等分布荷重 支持条件：固定・回転固定・水平ローラー	



PC鋼線の配線検討1



PC鋼線の配線検討2

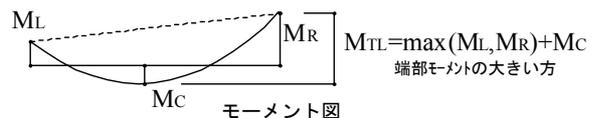


図-15 解析結果