

# 論文 ハーフプレキャスト床スラブの段差部補強方法に関する研究

成瀬 忠\*1・細川洋治\*2・渡邊朋之\*3・廣田祐史\*4

**要旨:** ハーフプレキャスト床板を用いた鉄筋コンクリート製の床スラブに 15~25cm 程度の段差を設ける場合、従来は段差部分に形成される梁形に梁と同様な配筋を行っていた。

本報では、梁配筋より簡略化した配筋方法を提案し、構造実験によりひび割れ発生強度、最大耐力が従来工法と同等以上であることを確認した。また、破壊メカニズム時の抵抗機構を検討し、耐力の評価方法を提案した。

**キーワード:** スラブ、プレキャスト、床段差、載荷実験、マクロモデル

## 1. はじめに

高齢化社会にともない、近年集合住宅ではバリアフリーが注目されている。しかし、仕上げレベルをフラットにするためには、水周り部の床躯体レベルを 20cm 程度下げるケースもあり、従来は梁と同様な配筋をした梁型を設けていた。

本報では、床の躯体段差寸法が 15~25cm と比較的大きな場合の合理的な段差部の補強配筋方法を提案し、構造実験により剛性、ひび割れ発生強度、最大耐力などの性能を把握した。また、マクロモデルを仮定して耐力時の抵抗メカニズムを検討した。

## 2. 工法の特徴

本工法の特徴としては、トラス状の鉄筋を有するハーフプレキャスト（以下、PCa と称す）床板を使用し、スラブ軽量化のため矩形の樹脂成型型枠により中空部を設けた比較的厚い床を対象としている。本工法の概要を図-1 に示す。従来、床躯体の段差寸法が 15cm 以上になった場合は、レベルの高い方の床（以下、一般部）と低い方の床（以下、低床部）の接合部分（以下、段差部）を梁とみなして主筋とスターラップを配筋していた。本報で提案した配筋方法は、スラブ主筋と等量以上のへ字形の下端補強筋

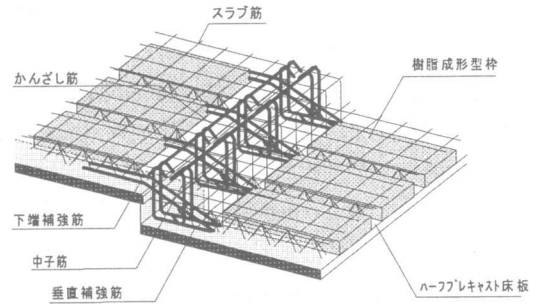


図-1 工法の概要（現場配筋状況）

を樹脂成型型枠間に配し、一般部側からの引張力をコンクリートを介して低床部 PCa 板内のスラブ主筋に伝達する。また、段差部内の梁主筋およびスターラップを配筋しないため、ハーフ PCa 板に埋め込まれたトラス状鉄筋を切断する必要がない。従って段差部内での PCa 板と後打ち部のコンクリートの一体性の向上が図れる。また、従来のスターラップのかわりに垂直方向の鉄筋として、上部先端にフックを設けた垂直補強筋と中子筋を配し、さらに定着力確保のためにそれぞれかんざし筋を配した。

## 3. 構造実験による構造性能の把握

### 3-1 実験概要

\*1 前田建設工業(株) 技術研究所 研究第 2Gr. (正会員)

\*2 前田建設工業(株) 建築部建築技術開発 G 部長 工博 (正会員)

\*3 前田建設工業(株) 技術研究所 研究第 2Gr. 課長

\*4 前田建設工業(株) 関東支店

表-1 試験体諸元

試験体名		No-1	No-2	No-3	No-4	
梁型段差部	配筋					
	補強筋	一般部側	4-D16	4-D16	4-D16	4-D16
		低床部側	4-D16	4-D16	—	—
梁配筋		4-D16 (梁主筋) D13@200 (St.)	—	4-D13 (L型と梁中央に2組)	4-D13 (L型と梁中央に2組)	
共通事項		・試験体形状 全長 4250mm 幅 950mm 床厚 250mm ・段差部形状 長さ 480mm 段差 230mm ・カサ板厚 70mm、エスレボイト厚 100mm、上部シェル厚 80mm ・スラブ配筋 上下共 D13@200mm (主筋) D10@200mm (配力筋)				

3-1 実験概要

(1)試験体

試験体は、実大スケールで4体製作した。試験体の段差寸法は23cm、幅は加力装置の制約から95cmとした。スラブは一般部、低床部とも厚さ25cmで、厚さ7cmのPCa板上にトラス状の鉄筋を2列配し、その間を15cm空けて長さ120cm、厚さ10cmの樹脂成型型枠を設けた。スラブ配筋は、上下とも主方向をD13、配力方向をD10で20cm間隔とした。段差部形状は48×48cmの正方形になるようにした。コンクリートは設計基準強度をPCa板は36N/mm<sup>2</sup>、後打ち部は24N/mm<sup>2</sup>とした。最大粗骨材寸法は20mm、スランプは12cmを目標とした。表-1に試験体諸元、図-2にNo-4試験体の形状および配筋を示す。No-1試験体は、段差部を梁と同様に配筋する従来型試験体で、梁主筋に4-

D16、スターラップにD13を20cm間隔で配した。スラブから段差部への応力は、それぞれ上端筋D13ピッチ20cm、下端筋2-D16を樹脂成型型枠間に2組ずつ配して伝達させる。No-2試

表-2 コンクリートの力学的性質

試験体名	材令(日)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度(N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )
No-1	30	26.7	2.23	1.96×10 <sup>4</sup>
No-2	43	27.8	2.73	2.14×10 <sup>4</sup>
No-3,4	20	38.0	3.19	2.07×10 <sup>4</sup>
PC板*1	44	48.2	3.81	3.00×10 <sup>4</sup>
PC板*2	24	44.2	3.60	2.67×10 <sup>4</sup>

\*1: No-1,2 試験体 \*2: No-3,4 試験体

表-3 鋼材の力学的性質

種別	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪(×10 <sup>-5</sup> )
D10	353	505	1.91×10 <sup>5</sup>	1840
D13*1	357	526	1.92×10 <sup>5</sup>	1860
D13*2	360	527	1.91×10 <sup>5</sup>	1880
D16	356	526	1.97×10 <sup>5</sup>	1800

\*1: PCa板主筋 \*2: 後打ち部

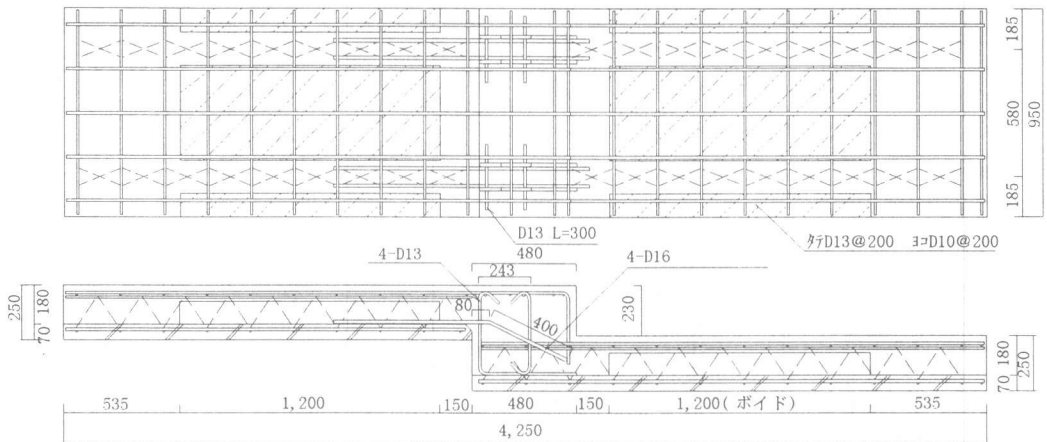


図-2 試験体の形状および配筋 (No-4 試験体)

験体は、下端補強筋、垂直補強筋をそれぞれトラス状鉄筋部に4-D16で2列ずつ配し、上端筋については一般部の主筋を曲げ下げた。また、トラス状の鉄筋が段差部内まで配されている。

No-3,4 試験体は、No-2 試験体の下端補強筋の折り曲げ部を段差部内に5d (d:鉄筋径) 呑み込ませ、垂直補強筋と中子筋に4-D13を用いた。またかんざし筋として長さ30cmのD13を配した。No-3 試験体のみ一般部のPCa板を段差部に3cm呑み込ませた。表-2にコンクリート、表-3に鋼材の力学的性状を示す。

### (2)加力方法

加力は、100tf アムスラーに試験体をピン、ローラー支持し、2点集中荷重により変位制御で一方向繰り返し荷重を行った。支点間距離は3,750mmとし、支点間距離を三等分するように加力点を設けた。図-3に加力装置と変位計の取り付け位置を示す。

### (3)計測方法

荷重 (P) は加力点2箇所の合計とし、アムスラーの油圧を油圧変換器により測定した。変位は、制御用変位( $\delta$ )として梁型中央部の垂直方向変位を測定し、一般部PCa板と段差部の目開き量( $\delta 1$ )を電気式変位計により測定した。また鉄筋のひずみについては、補強筋の主要な位置で鉄筋の上下面に貼付したひずみゲージにより測定した。

## 3-2 実験結果

図-4に各試験体の最終破壊状況、図-5に荷重-変位の関係を示す。

### ①No-1 試験体

P=0.81tf で一般部のPCa板の先端が後打ち部と剥離し、P=0.97tf で垂直方向に曲げひび割れが発生、その後左右のPCa板での曲げひび割れが徐々に進展していった。P=7.65tf、 $\delta$ =42.4mm で一般部の上端筋位置から段差部入り隅まで一気に斜めひび割れが発生して急激に耐力が低下した。

### ②No-2 試験体

P=0.81tf で一般部のPCa板の先端が後打ち

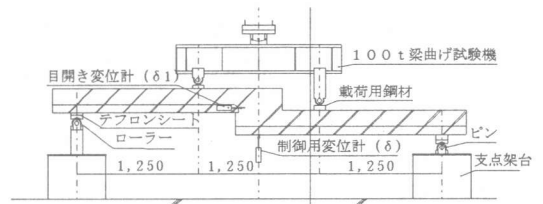


図-3 加力装置及び変位計位置

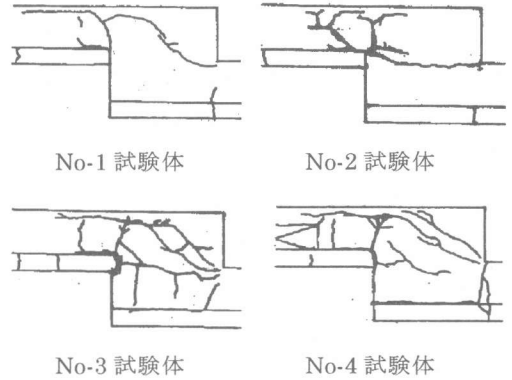


図-4 最終破壊状況

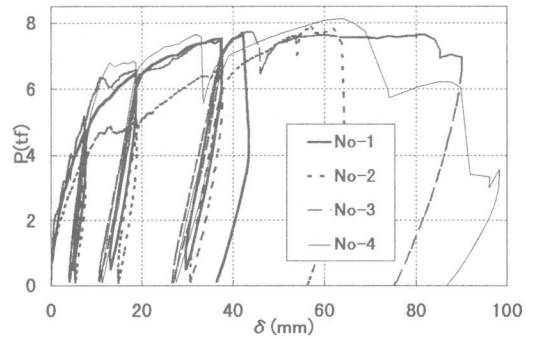


図-5 荷重-変位関係

部と剥離し、P=1.56tf で垂直方向に曲げひび割れが発生した。また、一般部PCa板と後打ち部の剥離および左右のPCa板での曲げひび割れが徐々に進展していった。P=7.88tf、 $\delta$ =57.1mm で段差部中央に水平方向にひび割れが発生し急激に耐力が低下した。

### ③No-3 試験体

P=2.12tf で一般部端部から垂直方向に曲げひび割れが発生し、その後左右のPCa板から発生した曲げひび割れが徐々に進展していった。P=6.19tf で段差部中央に水平方向にひび割れが発生、進展していった。P=7.33tf、 $\delta$ =47.1mm

で段差部に斜めひび割れが発生し急激な耐力低下が見られた。その後、荷重は再度上昇したが、中子筋上端と低床部入り隅にかけ斜めひび割れが発生し、荷重が急激に低下した。

④No-4 試験体

P=0.73tf で一般部側の PCa 板の先端が後打ち部と剥離し、P=1.23tf で垂直方向に曲げひび割れが発生した。その後左右の PCa 板から発生した曲げひび割れが徐々に進展していった。P=6.60tf、 $\delta=13.1\text{mm}$  で段差部に水平ひび割れが発生し耐力低下が見られたが、その後荷重は再度上昇し、P=7.77tf、 $\delta=33.6\text{mm}$  で中子筋位置から低床部入り隅にかけ斜めひび割れが発生し、最後は段差部内の PCa 板と後打ち部の接合面が滑って荷重が急激に低下した。

3-3 結果の検討

(1) 初期剛性

表-4 に各実験結果と計算値の比較を示す。曲げひび割れと最大耐力の実験値には、試験体の自重により中央に発生するモーメントを、アムスラーの荷重に換算 ( $P_{ini}=1.73\text{tf}$ ) して加えた。図-6 に自重による荷重と変位の補正方法を示す。自重による変位は、 $P_{ini}$  を各試験体の計算による初期剛性で除した値とした。初期剛性の計算値は、段差部を剛体と考えスラブの弾性曲げ変形のみを考慮して算出した。実験値/計算値の値は、1.24~0.89 であった。図-6 中の細い垂直線は、弾性たわみ限界とされる支持スパン L の 1/4000 の変位  $\delta e(e=0.94\text{mm})$  を示す。No-3 試験体のみ  $\delta e$  を超えても剛性の低下が少なくなっている。これは、No-3 試験体が一般部側の PCa 板を段差部に 3cm 呑込ませることによる PCa 板と後打ち部の剥離の抑制効果と考えられる。図-7 の一般部 PCa 板と段差部の目開き量と試験体中央変位との関係を見ても、No-1,2,4 試験体に比べ No-3 試験体では、目開き量が小さくなっていた。

(2) ひび割れ発生荷重

表-4 の実験値は、一般部側の後打ち部に発生した曲げひび割れ発生時の荷重を示している。

表-4 実験値と計算値の比較

試験体名		No-1	No-2	No-3	No-4
初期剛性 (tf/mm)	実験値	3.21	2.66	3.51	2.81
	計算値	2.59	2.74	3.16	3.16
	実/計	1.24	0.97	1.11	0.89
一般部曲げ ひび割れ荷重 (tf)	実験値	2.70	3.29	3.85	2.96
	計算値	3.08	3.22	3.34	3.34
	実/計	0.88	1.02	1.15	0.89
最大耐力(tf)	実験値	9.38	9.61	9.48	9.86
	[一般部] 計算値	7.02	7.02	6.82	6.82
	実/計	1.34	1.37	1.39	1.45
[低床部]	計算値	7.36	7.36	7.36	7.36
	実/計	1.27	1.31	1.29	1.34

\* ひび割れ発生荷重と最大耐力の実験値には、試験体自重による初期荷重を加えている

○初期剛性

$$K_e = P / \delta$$

$$\delta = 0b / 48EI (3L^2 - 4b^2) \times 2$$

$K_e$ : 初期剛性

$E$ : コンクリートのヤング係数

$Q$ : セン断力

$I$ : 断面二次モーメント

$P$ : 荷重 (=2Q)

$b$ : 加力点距離

○一般部曲げひび割れ発生荷重

$$M_{cr} = 1.8 \sqrt{\sigma_c} \cdot Z$$

$M_{cr}$ : ひび割れ発生モーメント

$\sigma_c$ : 後打ち部コンクリート圧縮強度

$Z$ : スラブの全断面係数 (鉄筋は無視)

○最大 (曲げ) 耐力

$$M_u = 0.9 a_s \sigma_s d$$

$M_u$ : 曲げ耐力時モーメント

$a_s$ : 下端筋の断面積

$\sigma_s$ : 下端筋の降伏強度

$d$ : 下端筋中心から圧縮縁までの距離

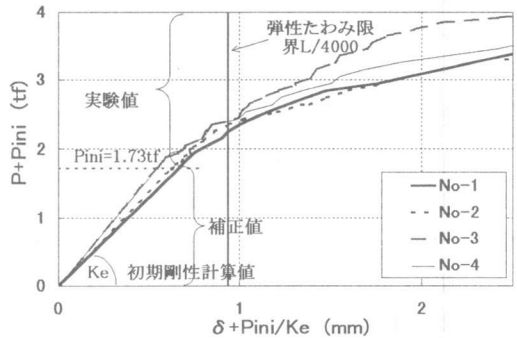


図-6 自重の影響による荷重-変位の補正

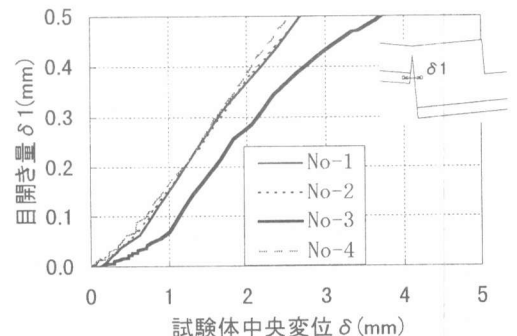


図-7 一般部の目開き量

No-3 試験体では、PCa 板を 3cm 段差部内に吞込ませたため、他の 3 体よりひび割れ発生荷重が高くなっていた。

### (3)最大耐力

表-4 の最大耐力計算値は、段差部と一般部、低床部それぞれの境界断面で、梁曲げ耐力略算式を適用したものである。一般部と低床部のスラブの曲げ耐力計算値を比較すると、一般部側の方がスラブ下端主筋を PCa 板の先端で止めているため少し小さくなっている。本報で提案した補強配筋方法は、すべての試験体で実験値/計算値は 1.27~1.45 で実験値が計算値を上まわっていた。

### (4)各補強筋のひずみ

図-8 に一般部側の PCa 板内のスラブ主筋から引張力を伝達するように設置した下端補強筋の最大耐力時のひずみ分布を示す。No-3, 4 試験体では、5d だけ折り曲げ部を段差内に移動させることにより、No-1,2 試験体に比べ軸方向ひずみを示す上下のひずみ平均値が大きくなっており、引張鉄筋としての効果が向上していることが分かる。図-9 に垂直補強筋の PCa 板近傍での軸方向引張ひずみ履歴を示す。No-1 試験体以外の 3 体では、段差部に水平方向のひび割れが発生していた。No-2 試験体では、ひずみ測定位置でひび割れが大きく開き耐力低下していたにも関わらず  $1000 \times 10^6$  に達していなかった。No-3, 4 試験体は、先端に 135 度フックとかんざし筋を設けたために定着力が向上し、ひび割れの拡大防止に効果を発揮していた。

### (5)段差部上部に発生する斜めひび割れ発生メカニズムに対する検討

No-1,3,4 試験体では、段差部の上部から低床部の入り隅部に向かって、最終段階で斜めにひび割れが発生していた。No-1 試験体は、ひび割れ発生と同時に急激に耐力が低下した。段差部中央に中子筋を配した No-3, 4 試験体では、中子筋の効果により脆性破壊を防止し変形性能を向上させることができたが、最大耐力は段差部の斜めひび割れ発生後は増加しなかった。図-

10 に段差部内の曲げ抵抗機構のモデルを示す。一般部の危険断面での有効効が水平線から角度  $\theta$  だけ傾きながら、段差部内でも形成されると仮定する。このときの検討断面で平面保持を仮定して応力分布を図-11 のようなストレスブロックでモデル化すると、

$$X_n = \frac{\epsilon_c \cdot d \cdot \cos \theta}{\epsilon_c + \epsilon_t} \quad (1)$$

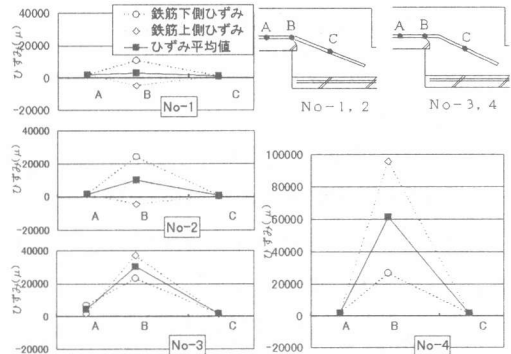


図-8 耐力時の下端補強筋のひずみ分布

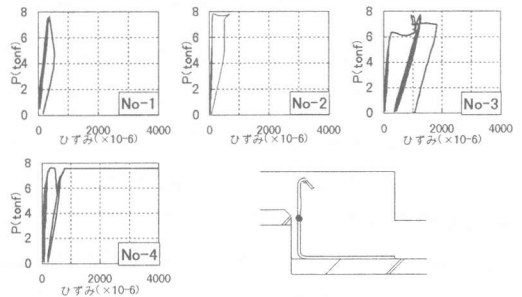


図-9 垂直補強筋のひずみ

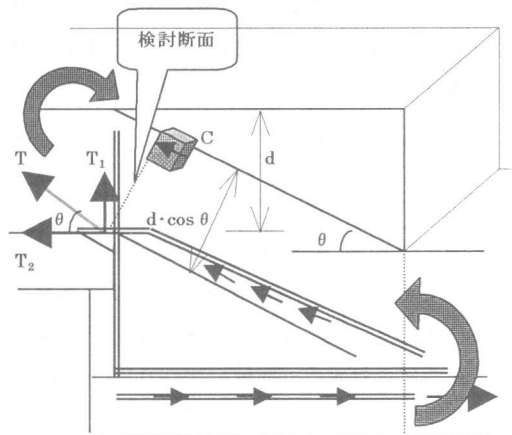


図-10 段差部内の抵抗機構モデル

また、垂直補強筋および下端補強筋方向成分の引張力を  $T_1$ 、 $T_2$  とすると、引張合力は、

$$T = T_1 \sin \theta + T_2 \cos \theta$$

$$\begin{cases} T_1 = A_1 E_{s1} \varepsilon_t \sin \theta & (\leq A_1 \cdot \sigma_{y1}) \\ T_2 = A_2 E_{s2} \varepsilon_t \cos \theta & (\leq A_2 \cdot \sigma_{y2}) \end{cases} \quad (2)$$

$A_i$ : 鉄筋の断面積     $E_{si}$ : 鉄筋のヤング率  
 $\sigma_{yi}$ : 鉄筋の降伏点    ( $i=1,2$ )

となる。圧縮側のコンクリートが弾性であると近似できる範囲であれば、圧縮合力  $C$  は、

$$C = b \cdot 0.85 \cdot E_c \cdot \varepsilon_c \cdot 0.85 X_n$$

$b$ : 試験体の幅  
 $E_c$ : コンクリートのヤング率

従って、検断断面での力の釣り合いから

$$0.7225 b \cdot E_c \varepsilon_c X_n$$

$$= (A_1 E_{s1} \sin^2 \theta + A_2 E_{s2} \cos^2 \theta) \varepsilon_t \quad (4)$$

式(1)~(4)より、検断断面におけるモーメント  $M_{max}$  は  $\varepsilon_c$  のみの関数で表され

$$M_{max} = \left( \frac{1.445 b d E_c \cos \theta}{3 + \sqrt{1 + 4K}} \right) \varepsilon_c \quad (5)$$

$$K = \frac{0.7225 b E_c}{A_1 E_{s1} \sin^2 \theta + A_2 E_{s2} \cos^2 \theta}$$

となる。式(5)が段差部の最大耐力評価式である。No-1,3,4 試験体では、図-12 のように、 $T_2$  降伏後に段差部に斜めひび割れが発生して耐力が決まっていた。式(5)による  $\varepsilon_c$  の値と  $M_{max}$  を  $P$  に換算した理論値と実験値の最大耐力の比較を表-5 に示す。 $E_c \cdot \varepsilon_c$  はコンクリート圧縮強度の 1/3 以下であり、(3)式で弾性と近似できる範囲と言える。なお、斜めひび割れ発生時の圧縮合力  $C$  は、圧縮ストラット内では 1 軸圧縮応力  $\sigma_c$  のみが作用しているとし、弾性論から  $\sigma_c$  と垂直方向に発生するひずみ  $\varepsilon_t$  を

$$\varepsilon_t = -\frac{\nu}{E_c} \sigma_c \quad (6)$$

$\nu (=1/6)$ : ボアソン比

とした。この  $\varepsilon_t$  が表-2 の割裂強度を弾性係数で除した値に達したときに斜めひび割れが発生すると仮定し、式(5)により最大耐力を算出した。理論値に対する実験値の比は 0.96~1.21 となっており非常に良く対応している。

#### 4. まとめ

(1) ハーフ PCa 床板を用いた床段差部分に、従来の梁配筋より簡易な補強方法を提案し、構造実験により初期剛性、ひび割れ発生荷重、最大耐力などの構造性能を把握した。また、ひび割れ発生荷重、最大耐力、変形性能は、従来工法と同等以上であることを確認した。

(2) 段差部の耐力を補強筋の降伏による場合と、圧縮ストラット領域に発生する斜めひび割れによる場合として耐力評価式を提案した。提案式による理論値は実験値と良く対応していた。

#### 参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、1991
- 2) カイザーボイドスラブ設計・製造・施工要項、日本カイザー、1997

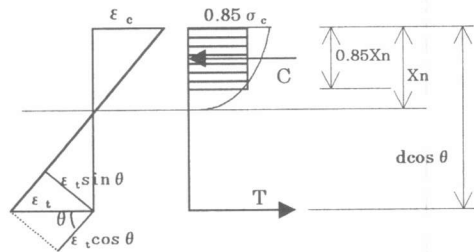


図-11 検断断面における応力分布

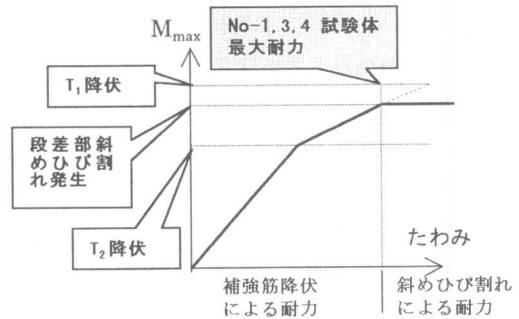


図-12 式(5)による最大耐力模式図

表-5 理論値と実験最大荷重の比較

	No-1	No-2	No-3	No-4
(5)式の $\varepsilon_c (\times 10^{-6})$	625	791	638	638
$E_c \cdot \varepsilon_c / \sigma_B$	0.217	0.178	0.302	0.302
$P_{理論値}$ (tf)	6.34	7.96	8.04	8.04
$P_{実験値}$ (tf)	7.65	7.88	7.75	8.13
$P_{実験値} / P_{理論値}$	1.01	1.21	0.99	0.96

\*  $P = 2M/1.25$  により、荷重  $P$  に換算した。