

論文 スパイラルトラス筋付きプレキャスト大型合成床板の構造性能に関する実験

新井 勇作^{*1}・筏井 文隆^{*2}・小林 克巳^{*3}

要旨：スパイラルトラス筋をせん断抵抗要素とするプレキャスト大型合成床板の構造性能について実験を行った。スパイラルトラス筋を有する接合面の許容せん断応力度を求め、通常の方法で設計した本合成スラブは床スラブに要求される構造性能を満足することから、スパイラルトラス筋の有効性を実証した。

キーワード：プレキャストコンクリート, 大型合成床板, スパイラルトラス筋, 構造性能

1. はじめに

固定工場等で製造されるプレキャスト部材（以下、PC 板という。）と現場打ちコンクリート（以下、RC という。）との打継ぎ面に界面処理を施し一体化を図る種々のプレキャスト合成床板工法が開発されている。界面のせん断力伝達のためにトラス筋、凹凸コッターあるいは突起物シャー筋等が用いられている。

本プレキャスト大型合成床板工法は、図-1 に示すように小梁をなくした大スパンに対応可能な床スラブ工法であり、2 等辺三角形の閉断面となるスパイラルトラス筋をボイド型枠とともに（薄肉部材である）PC 板に配置し、打継ぎ面のせん断力伝達をスパイラルトラス筋を含む接合面を介して行うことに主な特徴がある。

本工法の特徴は、①スパイラルトラス筋を構成する鉄筋には市場性のある異形鉄筋を使用し、トップ筋およびボトム筋へ結束線を用いて固定工場内にて加工されたスパイラルラチス筋を取り付けるという組立作業方法のため、固定工場内で一連の加工・組立が可能である。②スパイラルラチス筋に異形鉄筋を用いることにより、コンクリートとの付着がますため PC 板と RC 部との打継ぎ面のせん断力伝達性能を高めることが可能である。③スパイラルトラス筋を構成し

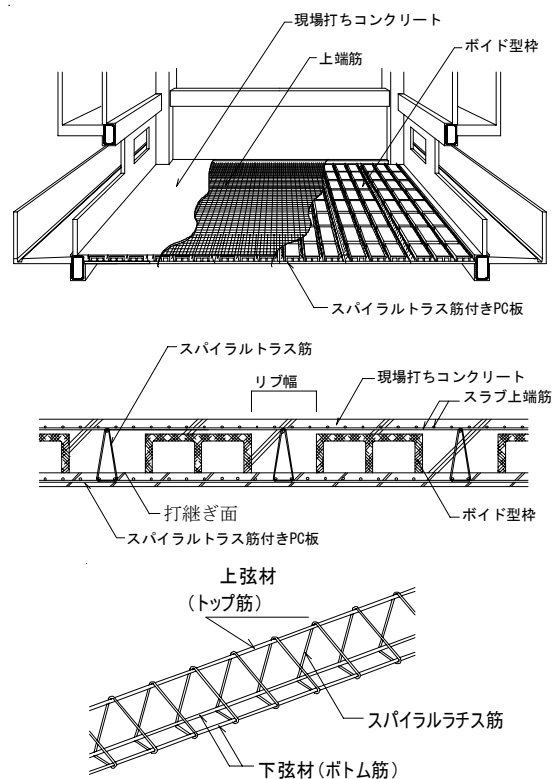


図-1 工法概要とスパイラルトラス筋

ているボトム筋は、床スラブに用いる鉄筋と同種の鉄筋を用いるため、スラブ下端筋に含むことができる。④スパイラルトラス筋は、PC 板と RC 部の一体性をより高め大地震等によりスラブに大変形が生じた場合においても PC 板の剥離、落下防止等の冗長性能の向上が可能である。

*1 木内建設（株）設計本部開発課副部長（正会員）

*2 木内建設（株）設計本部開発課主任 博士(工学)（正会員）

*3 福井大学工学部建築建設工学科 工博（正会員）

(但し、PC 板の補強に対しては積極的には寄与させていない。)

本論では、このような特徴を有するプレキャスト大型合成床板の接合面のスパイラルトラス筋を含む許容せん断応力度を明らかにし、RC 一体打ちスラブと同様の構造性能を有することを実験によって確認するとともに、スパイラルトラス筋の有効性を実証したものである。

2. プレキャスト大型合成床板の設計

一方向置換梁あるいは、二方向置換格子梁等にて応力解析を行い RC 計算規準¹⁾に則って RC 一体打ちスラブと同様にプレキャスト大型合成床板の設計が行えれば合理的である。そのためには、PC 板と RC 部との打継ぎ面での面内せん断力が完全に伝達され、RC 一体打ちスラブと同様の性能が得られることを確認する必要がある。

3. 一面せん断実験によるスパイラルトラス筋を含む接合面の許容せん断応力度

プレキャスト大型合成床板は、スパイラルトラス筋間隔 600mm 以下、スパイラルトラス筋の重ね長さ 400mm 以上という仕様である。RC 部が PC 板と接するリブ (幅 150mm) を介してせん断力が伝達されることから、リブ部分を抜き出した図-2 に示すような試験体にて一面せん断実験を行い、スパイラルトラス筋を含む接合面の許容せん断応力度求めることとした。

スパイラルトラス筋形状は、トップ筋 1-D13、ボトム筋 2-D13、スパイラルラチス筋 D6 (傾斜角 57°/123°, せん断鉄筋比 0.244%) より構成されており、ボトム幅 100mm (外-外)、トラスせい 100mm (外-外) である。表-1 に試験体一覧、材料強度一覧を表-2 に示す。コンクリートの設計基準強度は RC 部で $F_c=21\text{N/mm}^2$ 、PC 部で $F_c=30\text{N/mm}^2$ である。

試験体は、150mm のリブ幅内にスパイラルトラス筋を配置した PC 部材を先き打ちし、リブ幅内のコンクリート表面を刷毛引きし、両側に型枠を組み、後打ちコンクリートを RC 部として打

表-1 試験体一覧

試験体名	スパイラルトラス筋	打継ぎ面
S1~S6 (6 体製作)	・トップ筋(1-D13) ・ボトム筋(2-D13) ・スパイラルラチス筋(D6)	刷毛引き 処 理

表-2 材料強度一覧 (N/mm²)

コンクリート	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
後打ち RC 部	22.6	2.11	2.23×10^4
先打ち PC 部	36.5	3.11	
鉄筋 (SD295A)	降伏応力度	引張強度	ヤング係数
D6	369	520	1.94×10^5
D10	333	512	1.85×10^5
D13	369	520	1.80×10^5

表-3 各試験体の最大せん断応力度 (N/mm²)

試験体名	最大せん断応力度	平均値
S1	2.47	2.33
S2	2.33	
S3	2.11	
S4	2.40	
S5	2.36	
S6	2.28	

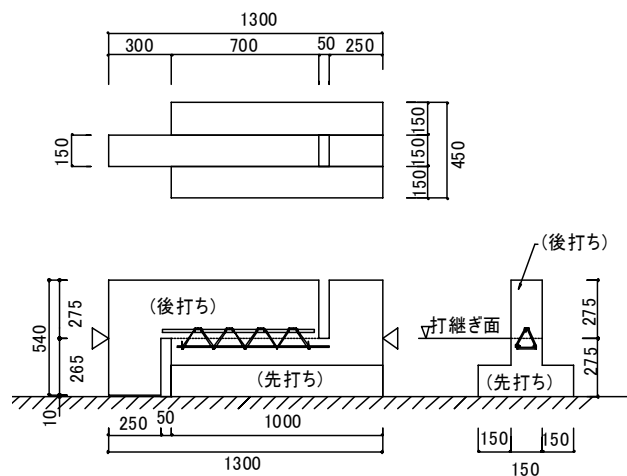


図-2 試験体形状 (単位: mm)

設し、同一種類の試験体を 6 体製作した。加力には、500kN の油圧ジャッキを打継ぎ面の鉛直線上に設置し、純せん断力を一方向に作用させ、打継ぎ面の水平移動量を 4 個の高感度変位形にて測定した。水平移動量は、平均値を採用した。

各試験体の最大せん断応力度を表-3 に、せん断応力度 σ と平均水平移動量 δ の関係を図-3 および図-4 に示す。 $\sigma - \delta$ 図より、各試験体とも平均水平移動量 0.2mm あたりまでほぼ一直線

にせん断応力度が増加して最大となった。その後、急激に耐力が減少し、平均水平移動量 $\delta = 2.2 \sim 3.0\text{mm}$ 近傍でほぼ一定のせん断応力度となり、以降そのままの耐力を維持した。最大せん断応力度までコンクリート強度に依存しながら耐力があがり、限界水平移動量を超えるあたりからスパイラルトラス筋によるダウエル効果に依存し耐力を維持していると思われる。このことから下記のようにスパイラルトラス筋を含む接合面の許容せん断応力度を決める。

表-3 より、6 試験体の最大せん断応力度の平均値(m)は 2.33N/mm^2 、標準偏差値(σ)は 0.122N/mm^2 と求まる。加力開始から、最大せん断応力度に至るまで、コンクリート強度に依存していることから、スパイラルトラス筋を含む接合面の長期および短期許容せん断応力度は、コンクリートの許容応力度に倣い、長期許容せん断応力度は $(m - 3\sigma)/3 = 0.65\text{N/mm}^2$ 、短期許容せん断応力度は $(m - 3\sigma)/2/3 = 1.30\text{N/mm}^2$ とした。実験はコンクリート強度 $\sigma_B = 22.6\text{N/mm}^2$ で行われているが、コンクリート設計基準強度に対してそれほどの変異もないことからコンクリート強度範囲の下限値を $F_c = 21\text{N/mm}^2$ としても本実験で確認するスラブの構造性能は得られると思われる。

4. 曲げ実験による構造性能の確認

プレキャスト大型合成床板（ボイドスラブ）が RC 一体打ちスラブ（中実スラブ）と同様の構造性能を有していることを確認するために、実際のスラブ状態（境界条件）に近い固定梁形式として曲げ実験を行った。

4.1 実験概要

図-5 に示す床スラブの設計にあたって、設計荷重を住宅・事務所等の用途を包含する積載荷重 (3.0kN/m^2) とし、仕上げ荷重を考慮した。

試験体は合計 4 体である。図-5 に 2 体 (VS2, VS4) の試験体をモデル化した位置を示す。

ボイドスラブ VS2 は一般ボイドスラブ部を、ボイドスラブ VS4 はバリアフリー対応等による切り欠きを有する段差ボイドスラブを抜き出し

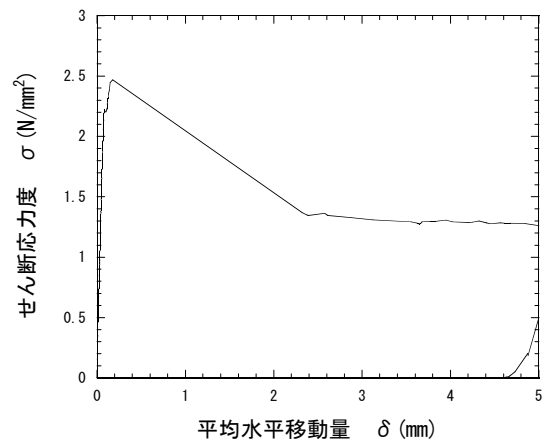


図-3 S1 試験体の $\sigma - \delta$

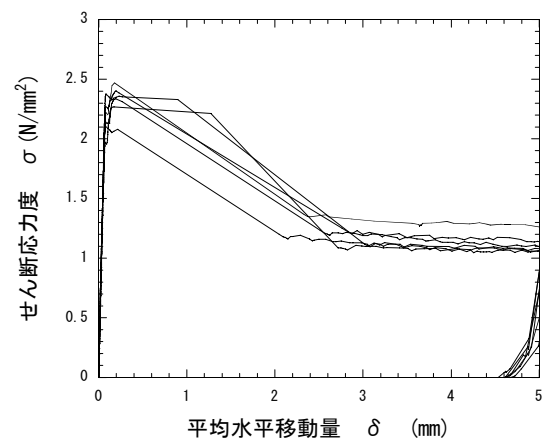


図-4 各試験体の $\sigma - \delta$

表-4 試験体一覧

試験体名	段差	スラブ厚		配筋		
				位置	主筋	直交筋
VS1	無	中実スラブ	280	上端	6-D13, 5-D10	D10@150
				下端	8-D10	D10@200
VS2	無	ボイド部	205	上端	6-D13, 5-D10	D10@150
		PC板	75	下端	(6+4)-D10	D10@200
VS3	無	ボイド部	325	上端	6-D13, 5-D10	D10@150
		PC板	75	下端	(6+4)-D10	D10@200
VS4	有	ボイド部	205	上端 下端	6-D13, 5-D10 (6+4)-D10	D10@150 D10@200
		段差部	105			
		PC板	75			

表-5 コンクリートの材料強度 (N/mm^2)

試験体記号	部位	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
VS1, VS2	先打ち PC 板	39.6	—	—
VS3, VS4	後打ち RC 部	23.8	2.20	22100

ている。

ボイドスラブ VS3 は構造性能をより明確にするために、ボイドスラブ厚を 400mm とし、大き

なせん断力を試験体に導入できるようにした試験体である。試験体 VS1 は、RC 一体打ちスラブであり、VS2 は VS1 と同じスラブ厚とし RC 一体打ちスラブと同様の構造性能を有しているか比較検討できるようにした試験体であり、VS4 は切り欠きを有するボイドスラブとして床スラブに要求される構造性能上不都合が生じるか否かを目的とした試験体である。

試験体の全長（内法長さ）は 6500mm、帯状スラブ幅はボイド型枠およびリブ幅 150mm を考慮して 1100mm とした。標準ボイド型枠は、VS2、VS4 が 1200（長）×400（幅）×120（厚）mm、VS3 は厚さのみ 240mm であり、PC 板形状は全て 6540（長）×1100（幅）×75（厚）mm である。

試験体一覧を表-4 に、試験体形状を図-6 に、コンクリートの材料強度を表-5 に示す。鉄筋の材料強度は表-2 に同じである。加力は図-7 に示すように 4 点集中荷重による一方向漸増繰返し載荷とした。鉄筋が長期許容応力度に達する荷重を長期設計荷重とし、長期設計荷重が持続して作用した場合の安定性を確認するために、長期設計荷重を複数回繰返して載荷するものとし、本実験では 5 回繰返した。なお、長期設計荷重が持続して作用する場合については、別途長期載荷実験を行うものとした。

以降の加力サイクルは弾性たわみ制限目標値 δ ($Lx/4000=1.60\text{mm}$) の 2δ , 3δ , ..., 19δ ($=30.4\text{mm}$) と、たわみ制御の載荷とした。荷重は油圧センサーで測定し、変位は中央部 2 点、端部 2 点、計 4 点を高感度変位形で測定した。PC 板と RC 部との接合面の開き、ずれをコンタクトゲージとパイ型変位形で測定し、鉄筋の歪みは歪みゲージを用いて測定した。

4.2 実験結果

1)破壊性状 VS1 は、端部上端に曲げひび割れが発生し、次に中央部から等間隔に曲げひび割れが入る曲げ破壊性状を示した。切り欠き部を有する VS4 においてスラブ厚が変化する箇所に曲げひび割れが集中した以外は、各試験体とも曲げひび割れが打継ぎ面でずれることなく RC

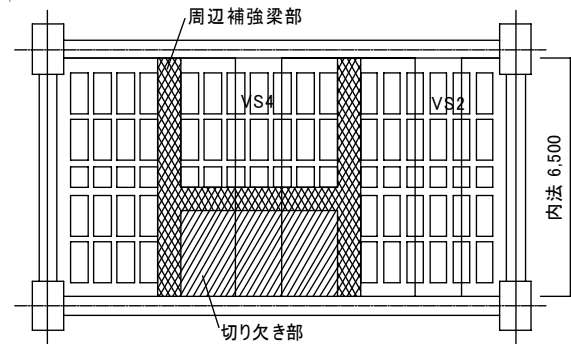
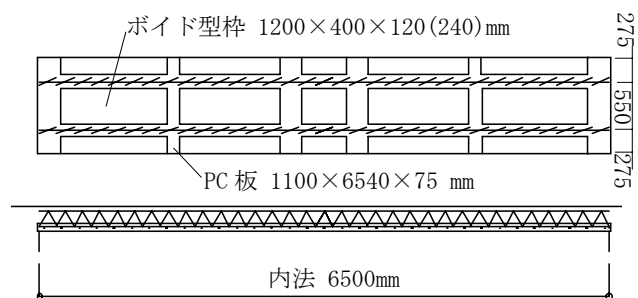
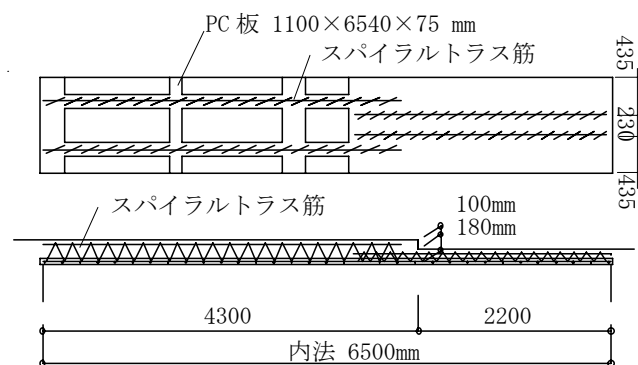


図-5 試験体位置図



VS2 (VS3) 試験体



VS4 試験体

図-6 試験体形状

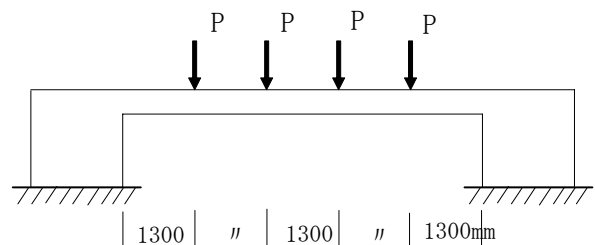


図-7 加力概要図

一体打ちスラブ（中実スラブ）の試験体 VS1 と同様の破壊性状を示した。また、長期設計荷重を 5 回繰返し載荷したが、各試験体ともこの載荷による新たな曲げひび割れの発生はみられなかった。

2) 曲げ剛性の評価 長期設計荷重時における各試験体の性能を表-6 に、VS3 以外の各試験体の P- δ 包絡線図を図-8 に、試験体 VS3 の包絡線図を図-9 に示す。各試験体とも曲げひび割れ発生により剛性低下し、鉄筋降伏後耐力を維持したまま変形が進み大変形に至るといった典型的な曲げ破壊の挙動を示した。

試験体 VS1 (中実スラブ) と試験体 VS2 (ボイドスラブ) の弾性剛性は、断面形状の差異を考慮すれば殆ど同程度と考えて差し支えないと思われる。長期設計荷重時におけるたわみも、弾性たわみ制限目標値 $Lx/4000$ 以下となっている。また、各試験体の最大耐力も試験体 VS1 を上回っているか同程度の値を示している。

両端固定スラブとしたため、水平方向における変形が拘束され軸力が生じた結果、耐力が上昇したと考えられるが、スラブのせん断破壊が生じるほどの大きさではなかった。

3) 打ち継ぎ面でのずれ、開き 表-6 に示すように、長期設計荷重時における接合面のずれおよび開きも殆ど生じていない。また、スラブ厚 400mm とした試験体 VS3 を含む各試験体とも中央部のたわみが 30.4mm ($=Lx/214$) のときでも 0.01mm 以下であり、殆ど無視できるほどの小さな値であった。

各ボイドスラブ試験体は、スパイラルトラス筋により PC 板と RC 部は終局時においても一体性が失われておらず試験体 VS1 (RC 一体打ちスラブ) と同様の構造性能を有しているとみられる。

4) ひび割れ幅 各試験体の曲げモーメントと試験体側面で計測したひび割れ幅との関係を図-10 に示す。各試験体とも長期設計許容曲げモーメント時において、ひび割れ幅 0.10mm 以下となっており殆ど無視できるひび割れ幅となっていることがわかる。

5. PC 板短辺方向の曲げ応力の伝達

PC 部材を運搬する際、部材幅が制限される PC 板において、PC 板長辺方向では合成床板 (ボイ

表-6 長期設計荷重時の性能

試験体 記 号	剛 性 (kN/m)	中 央 たわみ	接合面の 最大ずれ	接合面の 最大開き
VS1	12.76	0.731	—	—
VS2	11.37	1.310	0.004	—
VS3	23.04	0.886	0.003	—
VS4	8.04	1.530	0.005	0.001

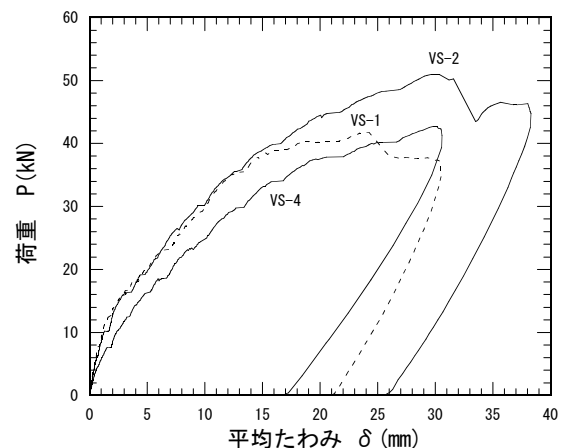


図-8 P- δ 包絡線図

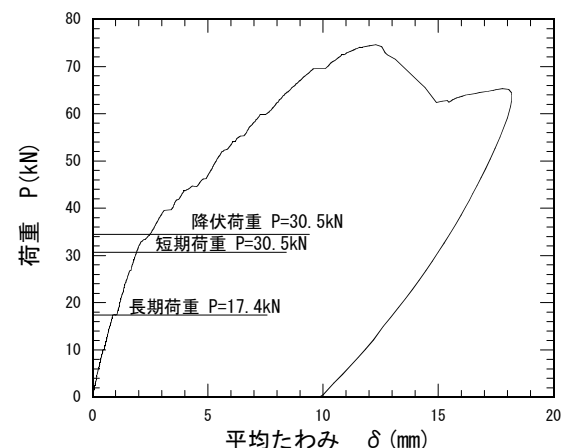


図-9 VS3 試験体 P- δ 包絡線図

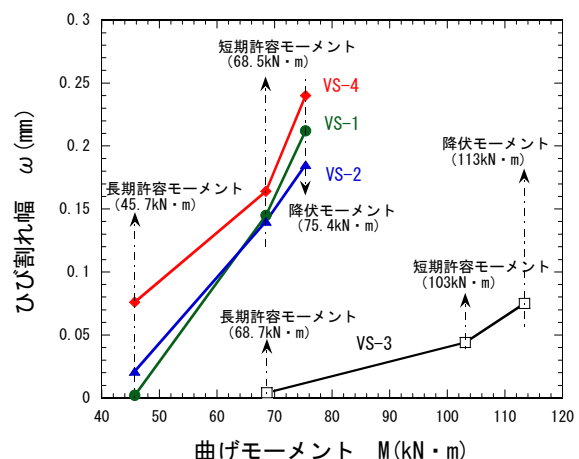


図-10 M- ω 図

ドスラブ)の全断面で応力を伝達できるが、直角方向にあるPC板短辺方向では、PC板内の直交筋(配力筋)が連続しないため、RC部に下端筋を配筋し、PC板内の直交筋とのあき重ね継ぎ手を設け応力伝達を行う。その時の必要あき重ね継ぎ手長さを検討する。

5.1 実験概要

試験体配筋図を図-11に、コンクリートの材料強度を表-7に示す。あき重ね継ぎ手長さは参考文献²⁾より、鉄筋径(d)の $60d$ とした試験体一体とした。試験体形状は、 $550(\text{全幅}) \times 2900(\text{全長}) \times 280(\text{厚})\text{mm}$ で、全幅の中心にリブ幅 150mm を一本配置した。但し、リブ幅内にはスパイラルトラス筋は配置されていない。鉄筋の材料強度は、表-2と同じである。

加力は両端単純支持とし、2点集中荷重による一方向漸増繰返し荷重とした。また、加力サイクルは曲げ実験と同様に長期設計荷重を5回繰返し荷重を行い、たわみ量 $Lx/200$ ($\delta=12.5\text{mm}$)を確認後、荷重を終えた。

5.2 実験結果

参考文献²⁾では、板-板ジョイント筋にD10を使用した。本実験ではD13を使用した。

図-12に示すP- δ 包絡線図より、長期設計荷重時の荷重伝達も問題なく行われており、大変形時においても耐力低下せず一体性を保っていることが確認できた。また、曲げ実験と同様に5回繰返し荷重を行ったが構造的変化は確認されなかった。

6. まとめ

スパイラルトラス筋付きプレキャスト大型合成床板の接合面の許容せん断応力度を適切に定めることにより、PC板とRC部は終局時においても一体性が失われておらずRC一体打ちスラブ(中実スラブ)と同様の構造性能を有していることが確認でき、スパイラルトラス筋の有効性も実証できた。また、短辺方向のPC板同士のジョイント部はあき重ね継ぎ手 $60d$ を確保すれば二方向スラブとしての設計も可能であること

表-7 コンクリートの材料強度 (N/mm^2)

試験体	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
後打ちRC (Fc21)	21.7	2.2	2.19×10^4
先打ちPC (Fc30)	39.6	—	—

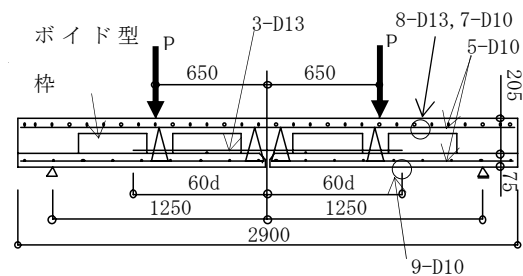


図-11 試験体配筋図 (単位: mm)

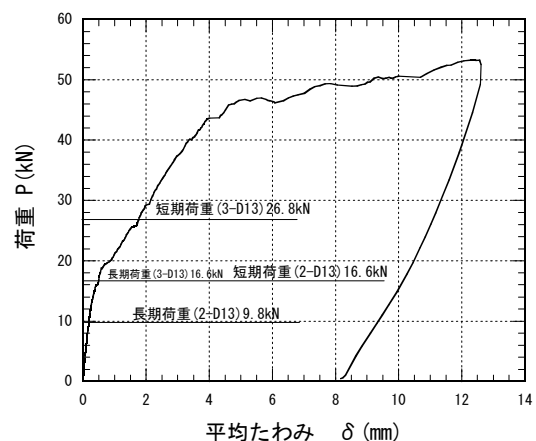


図-12 P- δ 包絡線図

がわかった。したがって、適切なモデル化により応力解析を行いRC計算規準¹⁾に則ってRC一体打ちスラブと同様にプレキャスト大型合成床板の設計が行えることがわかった。

なお、長期持続荷重が作用した時の構造性能についても、長期荷重実験より確認されている。

参考文献

- 1) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 2) 新井勇作, 筏井文隆, 松本芳紀, 小李克巳:ユニット化したコッターを設けたプレキャスト合成床板の構造性能に関する実験, コンクリート工学年次論文集, vol.25, No.2, pp.799-804, 2003