

大型ハーフPCaスラブ「サイクルスラブ」の開発

小柳 光生 川口 徹

Development of Large Half Precast Slab 「CYCLE SLAB」

Mitsuo Koyanagi Toru Kawaguchi

Abstract

The authors have developed a large half Precast slab [CYCLE SLAB] produced on site for labor availability. They are connected by a cotter on their upper surfaces, and are made from Vacuum processed concrete. This method has the merit that two slabs can be Produced per day on the same bed .

Structural performance were compared with that of whole slabs and composite slabs based on both simple and fixed support tests. Composite slabs were found to be superior in strength and deflection. Long term deflections were measured over 200 days. A shear design strength formula was proposed from the results of shear strength tests.

概要

施工の省力化を目的として、サイトで製造できる大型ハーフPCaスラブを開発した。このPCaスラブは、コッター接合方式であり、真空脱水工法を使うため、1日でスラブ数枚の重ね打ち製造が出来る特長がある。

単純支持・固定支持合成スラブの曲げ破壊試験を行い、最大耐力まで変形性能・構造耐力ともに一体打ちスラブと同等以上の構造性能を有することが確認された。また約200日間にわたる長期たわみ性状を把握した。さらに界面せん断強度に関する実験を行い、せん断設計式を提案した。

1. はじめに

床スラブの施工の省力化とコストダウンを目的として、サイトで製造する2方向性を有する大型ハーフPCaスラブ「サイクルスラブ」を開発した。打継ぎ部の一体性確保は矩形凹形によるコッター方式を採用した。さらに、真空脱水工法を用いて、品質向上と養生の簡便化による生産性向上を図り、1日で多数枚製造が可能であることが特徴である。このようにして製作した合成スラブが、在来の一体打ちスラブと同等以上の曲げ性能を有することを確認するための構造実験を行ったので、その結果を報告する。

サイトでの大型ハーフPCaスラブの製作は、運搬費削減・ピース数の削減による生産性向上などメリットが多いため他社でも実用化され既に多くの実績がある。しかし、広い製作ヤードスペースを必要とするため敷地上の制約があった。そこで真空脱水工法を利用し1日に同一ベッドで多数枚(多サイクル)製造可能な工法を開発した。

「サイクルスラブ」の製造手順を以下に示す。

- ①定盤をサイトに設置する。
- ②スラブ寸法に応じて小口型枠を組み立てる。
- ③下端筋を格子筋などで組立て、所定位置に設置する。
- ④コンクリートを打込み、締固める。
- ⑤木コテ均しを行う。
- ⑥コッター枠を所定の位置にセットする。

2. サイトでのサイクルスラブ製造の概要

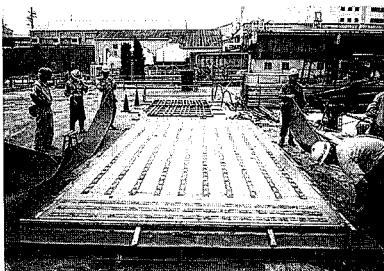


Photo 1 コッター枠設置直後
Setting Cotter Forms

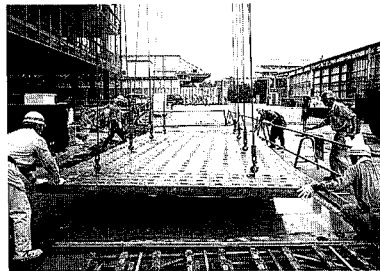


Photo 2 吊り上げ作業状況
Lifting up CYCLE SLAB

- ⑦前養生1時間後、真空脱水を行う(透水シート、導水材、密封シートの順に覆う。真空ポンプからのホースを密封シートに接続して強制脱水を行う)。
- ⑧一連のシート類を除去し、コッター枠も撤去する。
- ⑨合板ベニヤをコンクリート上面に敷き込む。

2段目のスラブを製作する場合、スラブ寸法に応じて小口型枠を組み立て

る(2)。再度③～⑧と同じ手順で作業を行う。終了後は初期乾燥を防ぐため、所定の材齢まで養生シートで保護する。

3. 構造性能確認実験

3.1 実験計画

本実験は、開発した合成スラブである「サイクルスラブ」が一体打ちスラブと同等以上の曲げ性能を有することを確認するため以下の内容について比較実験を行う。

- 1) 単純支持曲げ実験 (静的破壊試験)
- 2) 固定支持曲げ実験 (静的破壊試験)
- 3) 長期たわみ試験

なお、構造実験に先立ち、シアーコッターに関する一面せん断実験を行い、合成スラブに使用するコッター率とコッター深さを設定した。

3.2 コッターの一面せん断実験

通常、合成スラブの水平打継ぎ強度はトラス筋等の接合筋で担保しているが、今回のようにコッターで面内せん断強度を負担する場合、PCa材のコッターの設定が重要となる。シアーコッターに関する実験研究は数多く報告されているが、ここでは、金等の研究報告¹⁾を参考に、一面せん断実験をFig.1のように計画した。打継ぎ部のコッター形状は、6.5cm×6.5cm、深さ1.5cm、コッター断面積比 0.094とし、真空脱水工法で表面処理を行い、剥離剤塗布の有無を要因とした。コッター断面積比 0.094の根拠は、合成スラブが一体スラブと同等以上の曲げ性能を確保することを目標に、シアーコッターのみで最大耐力計算値の2倍以上のせん断強度を有するように設定した。剥離剤塗布は油性グリース3回塗りとした。

試験結果をFig.2に示すが、剥離剤塗布無しで 3.34N/mm²、剥離剤塗布有りで0.89N/mm²であった。いずれの破壊もコッター部(後打ちコンクリート)のせん断破壊で、剥離剤塗布の場合でも十分なせん断強度を示した。試験時の後打ちコンクリート圧縮強度は35.1N/mm²であった。なおFig.2中にはコッター深さ1cmの実験結果も示すが、この説明は後述の4.1節で触れる。

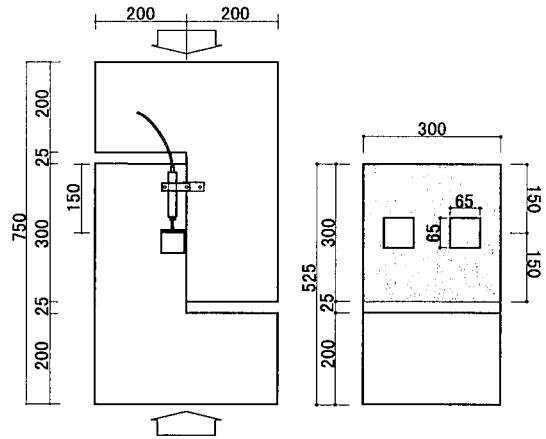


Fig. 1 一面せん断試験体
Specimen of One Face Shear Test

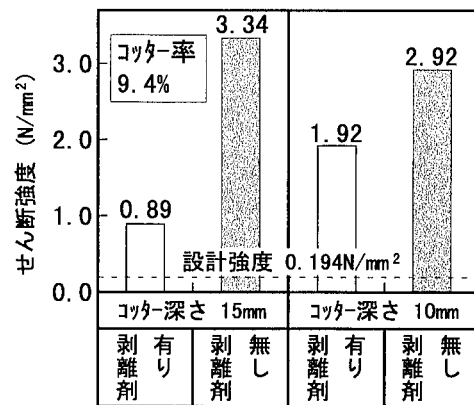


Fig. 2 一面せん断強度試験結果
Result of Shear Strength Test

3.3 合成スラブの曲げ実験

3.3.1 実験概要 コンクリートは生コンクリート(呼び強度27N/mm², W/C=54%)を使用し、PCa材と後打ちコンクリートの間は約2週遅れで打込みを行った。コッター形状は一面せん断実験とほぼ同様に7.5cm×7.5cm、深さ1.5cmとする。コッター断面積比は0.094, 0.125を計画した。供試体の種類はTable 1に示す通り、接着面の付着力除去を狙った剥離剤塗布(有, 無)を組み合わせた合成スラブ3体と比較用一体スラブの計4体とする。試験時のコンクリート圧縮強度は、PCa部で39.2N/mm²であり、後打ち部および比較用一体スラブで33.7N/mm²であった。また弾性係数はそれぞれ3.68, 2.94×10⁴ N/mm²であった。

3.3.2 単純支持曲げ実験 試験体の形状はFig.3に示す内法スパン250cm(支点間距離264cm)、幅60cm、厚さ15cmとする。鉄筋主筋はスパン中央下端、端部上端ともにD10-@150(Pt=Pc=0.316%)。載荷は、中央曲げ区間80cmの2点載荷とする。試験体のひび割れ状況の一部

Table 1 静的破壊試験体一覧
Specimens of Strength Test

試験体 No.	支持条件	要因① コッター面積比	要因② 剥離剤塗布
1-0	単純支持	一体打ち床版	
1-1N		0.094	無し
1-1S		0.094	有り
1-2S		0.125	有り
2-0	固定支持	一体打ち床版	
2-1N		0.094	無し
2-1S		0.094	有り
2-2S		0.125	有り

を Fig.4に示す。全試験体の荷重～たわみ曲線をまとめて Fig.5に示す。単純支持スラブの実験結果を整理して Table 2に示す。No.1-1N および No.1-2S の初期ひび割れ荷重・降伏荷重などいずれも一体スラブと同等以上の構造性能を有していることが分かる。

3.3.3 固定支持曲げ実験 試験体の形状はFig.6に示す内法スパン 400cm, 幅60cm, 厚さ15cmとする。配筋は単純支持と同じで、載荷方法は中央曲げ区間150cmの2点載荷とする。静的破壊試験の載荷ピッチは1kNピッチとし、鉄筋降伏以降、変形制御しながら、曲げ破壊させる荷重サイクルとする。固定支持スラブの実験結果の一覧を計算値と比較、整理してTable 3に示す。ひび割れ図をFig.7に示す。

計算方法は下式を使用する。

$$\text{降伏モーメント } M_y = at \cdot \sigma_y \cdot 7/8d$$

$$\text{最大モーメント } M_b = at \cdot \sigma_y \cdot 0.9d$$

at: 鉄筋断面積 σ_y : 鉄筋降伏応力度 d: 有効せい

試験体 No.2-1S, 2-1Nの荷重～たわみ試験結果を一体スラブ No.2-0と比較して、Fig.8に示す。最大耐力まで

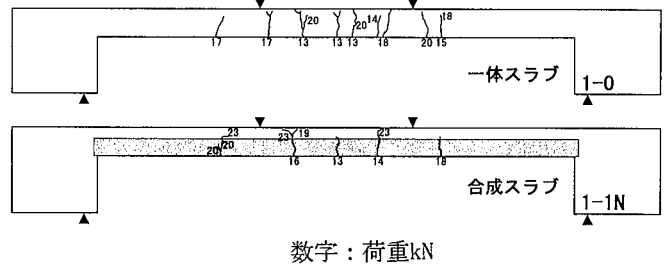


Fig. 4 単純支持試験体 ひび割れ状況
Crack Pattern of Simple Supported Slabs

一体スラブと同等以上の構造性能を有していた。また鉄筋降伏時で計算値の2.0倍以上の強度を有していた。なお試験体 No.2-2Sは載荷試験のための吊り込み時、手違いで、逆方向の荷重を受けて支持端のスラブ下面(圧縮領域)に曲げひび割れを生じてしまった。そのため、初期剛性が低くまた最大耐力が若干低下したものの最大荷重は計算値の2.5倍を示した。

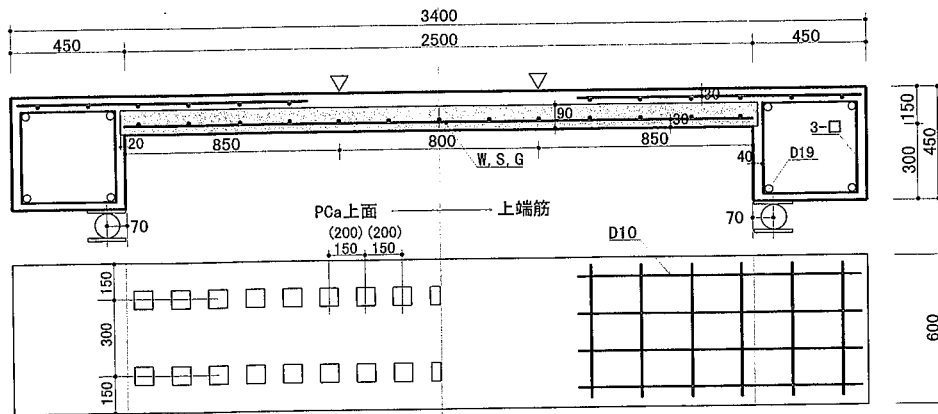


Fig. 3 単純支持合成スラブの形状
Form of Simple Supported Composite Slab

Table 2 単純支持スラブ強度実験値と計算値
Experimented and Calculated Strength of Simple Supported Slabs

試験体名称	荷重実験値 (kN) ①			計算値 (kN) ②			計算値に対する実験値の比率①/②		
	ひび割れ時	鉄筋降伏時	最大耐力時	ひび割れ時	鉄筋降伏時	最大耐力時	ひび割れ時	鉄筋降伏時	最大耐力時
1-0	14.7	21.6	26.0	11.7	16.7	17.3	1.26	1.29	1.50
1-1S	14.8	24.4	29.5				1.26	1.46	1.71
1-1N	14.7	24.3	33.2				1.26	1.46	1.92
1-2S	16.4	24.5	28.4				1.40	1.47	1.64

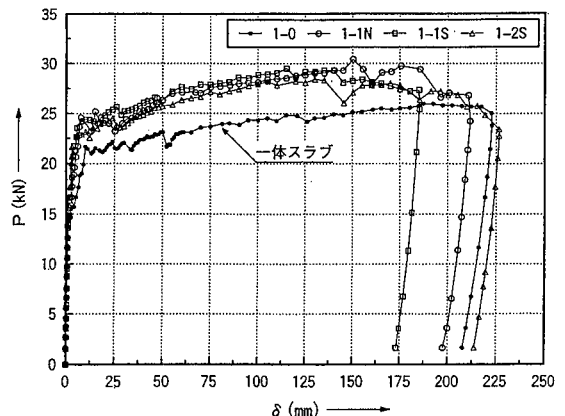


Fig. 5 単純支持試験体 荷重たわみ曲線
Load - Deflection Curve of Simple Supported Specimens

3.4 長期たわみ実験

試験体の形状およびコンクリート特性は 3.3.2と同じ単純支持である。供試体の種類は、合成スラブ（コッター面積比 0.094, 剥離剤塗布無し）と一体打ちスラブの計2体とする。長期積載荷重は後打ち部の材齢4週で加力し、鋼製塊による等分布荷重とする。曲げひび割れ荷重 ($M_{cr}=1.8\sqrt{f_c}\cdot Z=7.02\text{KN}\cdot\text{m}$) の1.25倍の80N/cm (8kgf/cm) を積載荷重として作用させた。

合成スラブ (No. 3-1) と一体スラブ (No. 3-0) の持続荷重に対する長期たわみ挙動を比較するため、約 200日間にわたり測定し、その中央たわみ測定結果を Fig.9に示す。合成スラブと一体スラブの加力直後の弾性たわみは、それぞれ 0.89mm, 0.81mmであり、弾性たわみ計算値 (1.07mm) に比べてやや小さかった。載荷直後には曲げひび割れの発生は認められなかったが、翌日以降いずれ

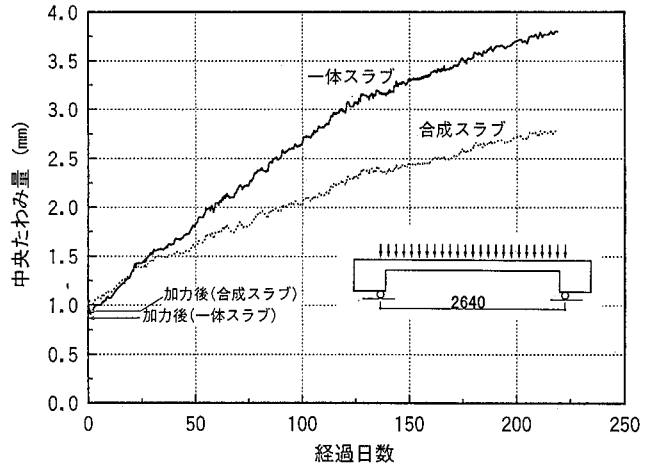


Fig. 9 長期たわみ試験 (単純支持)
Long Term Deflection of Simple Supported Specimens

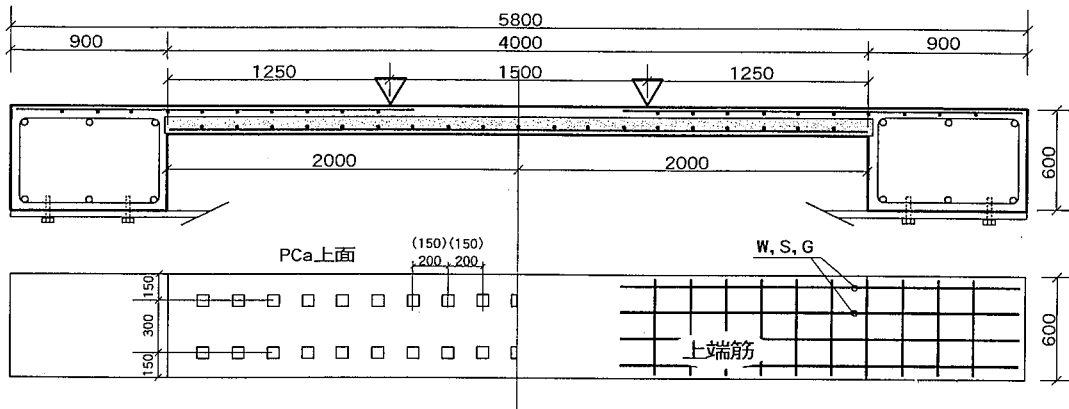


Fig. 6 固定支持合成スラブの形状
Form of Fixed Supported Composite Slab

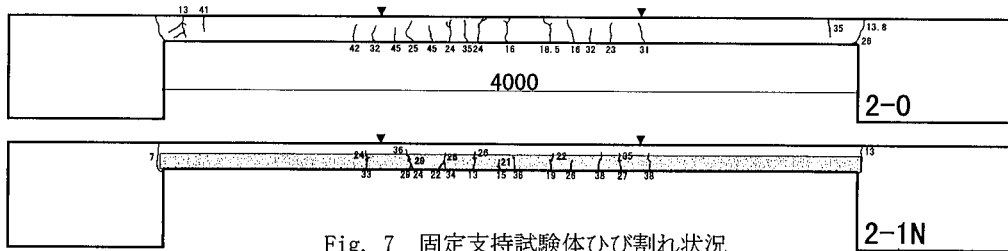


Fig. 7 固定支持試験体ひび割れ状況
Crack Pattern of Fix Supported Slabs

Table 3 固定支持スラブ強度実験値と計算値
Experimented and Calculated Strength
of Fix Supported Slabs

試験体 名称	荷重実験値 (kN) ①			計算値 (kN) ②			計算値に対する実験 値の比率①/②		
	ひび割 れ時	鉄筋降 伏時	最大耐 力時	ひび割 れ時	鉄筋降 伏時	最大耐 力時	ひび割 れ時	鉄筋降 伏時	最大耐 力時
2-0	13.0	40.9	48.0	10.2	15.6	16.2	1.27	2.62	2.96
2-1S	15.0	35.7	50.2				1.47	2.29	3.10
2-1N	7.0	44.2	49.9				0.69	2.83	3.08
2-2S	—	34.6	41.2				—	2.22	2.54

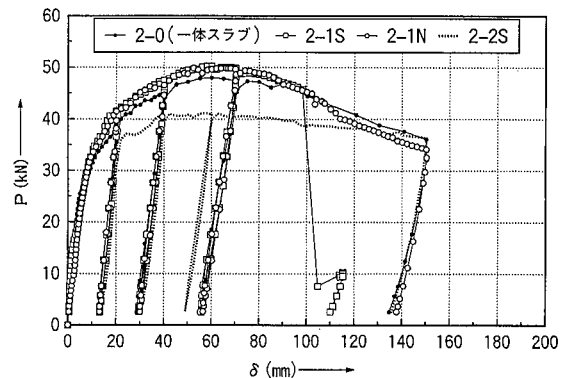


Fig. 8 固定支持試験体 荷重たわみ曲線
Load - Deflection Curve of Fix Supported Specimens

の試験体もスパン中央付近に幅 0.1mm程度の小さな曲げひび割れが発見された。合成スラブのたわみ進行は一体スラブに比べてやや遅い傾向にある。これはPCa材の圧縮強度が後打ちコンクリートよりも多少高かったためと思われる。材齢 200日では一体スラブは、弾性たわみの約 4.5倍のたわみ量に増加したが、合成スラブは弾性たわみの 3.0倍程度であった。

4. 実験結果の考察

4.1 コッター接合面のせん断許容応力度の検討

コッター部のせん断強度は、支圧破壊かコッター部せん断破壊のいずれかで決まる (Fig. 10参照)。ここでは実験結果を参考に、合成スラブにおけるコッター接合面の許容せん断応力度算定式を提案する。

算定式を提案する前に、コッター深さ10mm以上ではせん断強度の増加は小さいという報告¹⁾も参考にコッター深さ 10mmの一面せん断試験を追加し、その試験結果を前述のFig. 2に示す。剥離剤塗布無しで2.92N/mm²、塗布有りで1.92N/mm²であった。いずれもコッター部せん断破壊であった。なお試験時の後打ちコンクリート圧縮強度は 32.8N/mm²であった。

以上の結果からコッター深さ15mm, 10mmの違いがせん断強度に及ぼす影響は殆ど無いと判断された。なお剥離剤塗布有りで 1.92N/mm²でと前述の値の2倍以上と高くなったがこの理由は不明であるが追加実験の塗布量が多少少なかった可能性があり、この影響ではないかと思われる。

せん断強度は、界面付着だけでも担保出来ると判断されるが、許容応力度の算定に当たり、界面付着によるせん断強度は余力と考え、あくまでコッター部で最低のせん断強度を確保することとした。

①コッター支圧破壊によるせん断強度の検討

単位面積1m²当たりコッター個数をnとするとコッター支圧面積：Apは下式となる。

$$A_p = n \times \text{コッター長} \times \text{コッター厚} \quad \dots\dots\dots (1)$$

設計用圧縮応力度を 2/3・Fc (この時 Fc:圧縮強度) とすると、支圧で決まるせん断設計強度：Qpは、下式となる。

$$Q_p = 2/3 \cdot F_c \cdot A_p \quad (\text{N/mm}^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

今回の場合、コッター断面積比をp(%)とすると、単位面積1m²当たりのコッター個数 n=100・p/(7.5²)=1.78pである。p=9.4を代入して n=16.7となる。コッター厚をここで1cmとすると支圧面積Ap=125cm²/m²=0.0125cm²/cm²となる。またFc=30N/mm²を代入するとせん断設計強度は Qp= 2/3 × 30 × 0.0125=0.25N/mm²となる。

②コッター部せん断破壊によるせん断強度の検討

コッター断面積：Acは下式となる。

$$A_c = n \times \text{コッター長} \times \text{コッター長} \quad \dots\dots\dots (3)$$

設計用せん断応力度を1/15・Fcとすると、コッター部せん断破壊で決まるせん断設計強度：Qcは下式となる。

$$Q_c = 1/15 \cdot F_c \cdot A_c \quad (\text{N/mm}^2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

コッター断面積はAc=0.094cm²/cm²であるので

$$Q_c = 1/15 \times 30 \times 0.094 = 0.188\text{N/mm}^2 < 0.25\text{N/mm}^2$$

となる。

以上の結果からせん断強度は、コッター部せん断破壊で決まり、せん断許容応力度は 0.188N/mm²となる。

なお、前述の一面せん断実験での実験値 0.89N/mm² (剥離剤有り)はこの許容応力度の 4.7倍、同じく実験値 3.34N/mm² (剥離剤無し)は設計強度の18倍とかなり高い安全率の設定である。

4.2 スラブの曲げ性能と弾塑性解析結果

4.2.1 解析概要

3章に述べた計算値と実験値はあまり良い対応関係ではなかった。特に固定支持の場合、鉄筋降伏時の実験値と計算値の比は2倍を越えていた。これは計算値では面内軸力やモーメント再配分を無視しているためと思われる。そこで精解な曲げ弾塑性解析を行い、実験結果と比較する。解析法は、「床スラブの長期たわみに関する研究」²⁾で開発した解析プログラムを使用する。

解析の仮定と基本条件を以下に述べるが、基本仮定は、RC規準付20の梁および柱の曲げ終局強度と適合している。

- 1) 平面保持が成り立つとする。
- 2) 断面の厚さ方向に1cm毎に層分割する。曲げひび割れの考慮は、引張り限度歪みを 1×10⁻⁴とする。
- 3) 鉄筋およびコンクリートの応力度～歪み関係は、それぞれ弾塑性モデルで仮定する。弾塑性の解法には反復法を用いる。
- 4) 固定支持スラブの場合、ひび割れによる剛性変動に伴うモーメント再配分を考慮する。再配分の解法には反復法を用いる。
- 5) 固定支持スラブの場合、ひび割れによる端部鉄筋抜け出しの影響を考慮する。
- 6) 面内軸力を考慮するが、その軸力の設定はあらかじめ

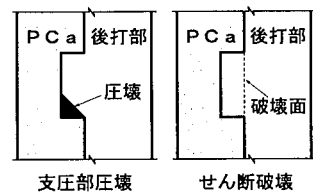


Fig. 10 打継ぎ部の破壊パターン Destruction Pattern of Joints

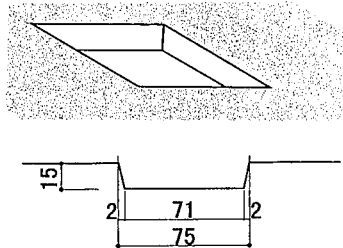


Fig. 11 コッター形状の詳細 Detail of Cotter Form

外力として一定値を与える。この時の軸力は今回、拘束の程度を考慮して0.5, 1.0, 1.5N/mm²と設定する(完全拘束時の約1/4, 1/2, 3/4の圧縮軸力に相当)。

4.2.2 断面力の解析 作用する曲げモーメント:Mに対して、曲率値:φは下式のように表される。

$$\phi = \frac{\int E_c \cdot y \cdot d\text{ac} + M}{\int E_c \cdot y^2 \cdot d\text{ac} + \int E_s \cdot y^2 \cdot d\text{as}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

E_c:コンクリート弾性係数 E_s:鉄筋弾性係数
 y:中立軸から任意要素までの距離
 dac:コンクリート要素断面積 das:鉄筋要素断面積
 また層分割された任意位置 y' の断面歪み:ε y' は下式のように表される。

$$\varepsilon y' = (X_n - y') \times \phi \times \frac{N}{\int E_c \cdot d\text{ac} + \int E_s \cdot d\text{as}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

N:軸力 X_n:中立軸までの距離(上端からの)
 y':上端から任意要素までの距離

コンクリートと鉄筋の応力度～歪み曲線は弾塑性時まで考慮する。コンクリート応力度～歪みモデル図をFig. 12に示すが、弾性係数はセメントモルタル弾性係数を入力する。また鉄筋の降伏後の歪み勾配は、弾性時の1/100とする。

4.2.3 実験結果と解析結果の比較検討 上述の弾塑性解析法を用いて実験結果(No. 1-0, 2-0)と比較を行った。その結果をTable 4およびFig. 13, 14に示す。弾塑性法では単純支持の場合、降伏時まで良く近似している。固定支持の場合、モーメント再配分しているため、良好な近似が得られた。面内軸力を0.5～1.0N/mm²程度考慮すると、さらに対応が良くなることが分かった。

Table 4 たわみ実験値と弾塑性解析値
 Experimented and Calculated Deflections

試験体名称	弾塑性解析値 (kN)			実験値/解析値			軸力の有無
	ひび割れ時	鉄筋降伏時	最大耐力時	ひび割れ時	鉄筋降伏時	最大耐力時	
1-0	13.5	19.0	19.5	1.09	1.14	1.33	無し
2-0	13.5	23.5	29.5	1.15	1.74	1.63	無し
	15.5	30.5	36.0	1.00	1.34	1.33	

(実験値はTable 2, 3を参照)

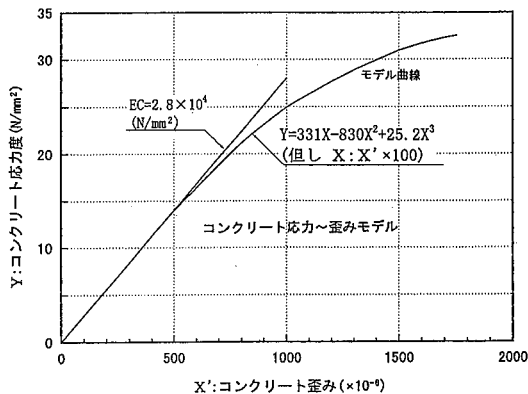


Fig. 12 コンクリート応力～歪み関係式
 Stress ~ Strain Relation of Concrete

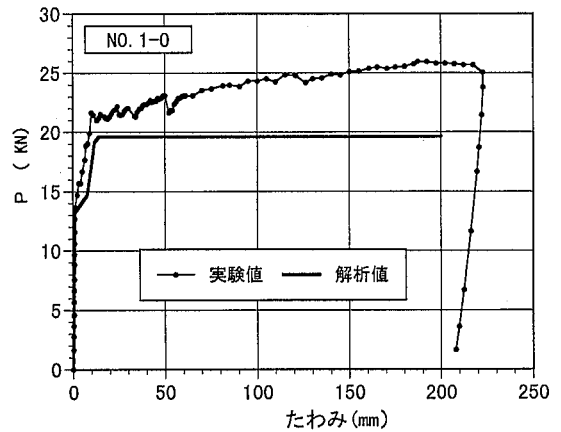


Fig. 13 単純支持スラブたわみ実験値と解析値
 Experimented and Calculated Deflections of Simple Supported Slabs

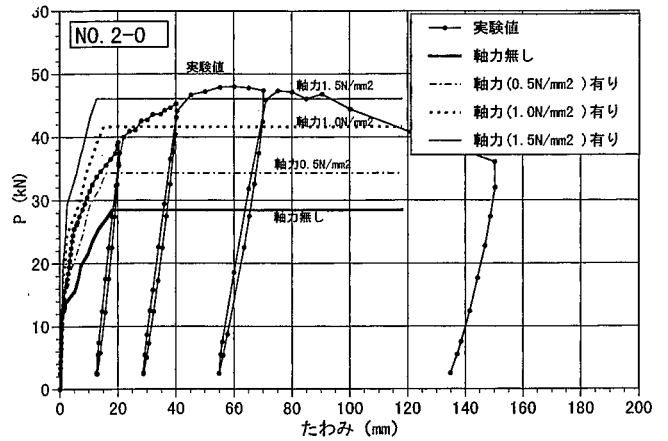


Fig. 14 固定支持スラブたわみ実験値と解析値
 Experimented and Calculated deflections of Fixed Supported Slabs

5. まとめ

施工の省力化・ローコスト化を目的として、サイトで製造できる合成スラブを開発した。このPCaスラブは大型化が可能、コッター接合方式である、真空脱水工法を使うため1日でスラブ数枚の重ね打ちができる、製造が簡易、製造スペースを取らないなどの特長がある。曲げ破壊検証試験の結果、単純支持・固定支持ともに最大耐力まで打継ぎ部の滑り変形もなく、変形性能・構造耐力ともに一体打ちスラブと同等以上の構造性能を有することが確認された。

参考文献

- 1) 金, 鈴木, 大野, 鳥居: コンクリート合成床板シャーコッターのせん断強度に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, No. 2, 1993
- 2) 武田, 高橋, 小柳: 床スラブの長期たわみに関する研究, コンクリート工学論文, No. 9, Sept. 1983