

# プレストレストコンクリート合成中空スラブに関する実験研究

南 伊三男\*

## 1. はじめに

建築において、PC工場で製造したハーフPC板を型枠兼用に梁に架設し、現場で上端配筋を施した後、場所打ちコンクリートを打設して一体化する合成スラブ工法には、プレキャスト部分にプレストレスを導入したものと、プレストレスを導入していないものがある。このうちプレストレスを導入したものは耐ひび割れ性能に優れ、支保工なしで長スパン化が可能である。型枠が不要で、支保工がないために施工面でも大幅な工期短縮を可能とする。このPC合成スラブ工法は各社により競って開発され、1990年までにはそのほとんどが評価を取り工法開発を完了している。これらPC合成スラブのプレキャスト部の形状は、空洞板型、リップ付き平板型（T型）、チャンネル型、 $\pi$ 型等に分類できる。上記したPCの特性により事務所、倉庫や駐車場など大スパンまたは大荷重の構造物に使用されることが多く、高層建築物の施工においても工期短縮の目的でPC合成スラブ工法を採用することは一般的なものといえるようになった。

近年、集合住宅のスラブは大スパン化の傾向にある。SI（スケルトン・インフィル）住宅を代表とする小梁のない大空間、遮音性能をうたい文句とするものが増えてきた。そこでPC合成スラブ工法の使用が考えられる。しかしながら集合住宅のスラブに要求される条件としては、他に固定荷重の減量を図りながら階高をおさえること、天井をフラットにすることなどが挙げられる。これら諸条件、ニーズを満足できる、PC合成スラブ工法は意外と少ない。下面がフラットである条件でそのほとんどの工法が使用できないのである。空洞板型もしくはリップ付き平板型やチャンネル型の逆形状となる。空洞板型の製造には特殊な設備が必要となるために、当社が保有している逆りブ型を選択し、住宅対応のPC合成スラブ工法の再開発に着手した。その開発概要と、諸性能を確認するために行った実験の結果について報告する。

## 2. PC 合成スラブの概要

図-1および図-2に今回再開発したPC合成スラブの姿図および基本断面形状図を、表-1に基本断面表を示す。

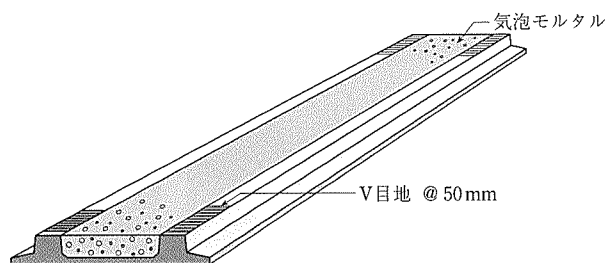


図-1 姿図

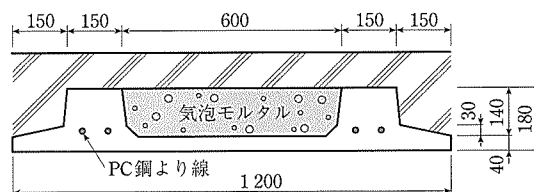


図-2 基本断面形状

表-1 基本断面表

項目	PC単体	合成スラブ
断面積 (cm <sup>2</sup> )	981	2 568
ボイド断面積 (cm <sup>2</sup> )	792	-
自重 (kg/m <sup>2</sup> )	237	568
単位長さ重量 (t/m)	0.29	0.67
平均スラブ厚 (cm)	8.18	21.40

型枠兼用のハーフPCa板は従来保有の大型板のボリュームを思い切ってスリム化した。2本の上付きリップを有しており、リップ間に今回初めて採用する気泡モルタルを流し込みボイド部を形成した。この気泡モルタルによるボイドについては後述することとする。架設および現場打ちコンクリート打設時には中央1列（スパンにより2列）の支保工が必要となる。基本断面は住宅の仕上げおよび積載荷重を仮定し、スパン9m前後の構造断面計算と遮音性能の観点から決定した。断面計算による耐荷重曲線を図-3に示す。遮音（特に重量衝撃音対策）については、住宅性能評価の重要なファクターになりつつあり、最近の集合住宅の設計では、スラブ厚の決定が構造ではなく遮音によって決定す



\* Isao MINAMI

フドウ建研(株) PC事業本部 設計部

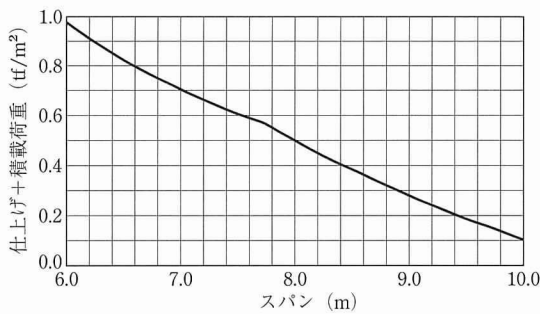


図-3 耐荷重-スパン関係

ることが多いようである。

### 3. 新しいボイド材の考案

住宅のスラブ厚が遮音で決定すると述べたが、たとえば品確法の性能評価でいうと重量床衝撃音対策等級5は相当スラブ厚27cm以上である。都市基盤整備公団の標準スラブ厚は28cmとしている。このクラスになると、重量軽減のために必ずボイド(中空)スラブとするのが通常である。

ボイドスラブは図-4に示すようにおおそ2つに分かれる。穴あきプレキャスト板と、薄肉プレキャスト板の上にEPS(ポリスチレンフォームの中空基板)ボイドを敷き並べて合成ボイドスラブを形成するものである。今回のよ

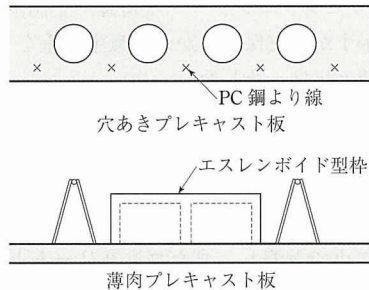


図-4 ボイドスラブの種類

うなり付きスラブの場合は、EPS等の成型材をリブ間にはめ込むか、リブ間を薄パネルにより蓋をして、中空部を形成する方法が通常である。現に当社でも大型PCスラブの施工において軽量コンクリートパネルにより蓋をした実績がある。しかし、この方法はコスト高につながった。EPSの場合も、型枠内部への滞水問題や解体時の環境問題に不安があり、今回の形状の場合はタイコ現象による遮音性能の低下のおそれもある。そこでこれらの問題を解消でき、かつコストのかからない新しいボイド材を模索した。

今回、EPSの代替品として目をつけたのは気泡モルタルである。土木の分野では擁壁やトンネルの裏込めに使用し荷重や土圧の軽減に利用するが、建築ではあまり使用しない材料である。また、最近の耐火金庫には発泡スチロールの代わりに気泡モルタルが使われているようである。

気泡モルタルをボイドとして転用するにあたっては、比

重およびコストをなるべく抑えるために、モルタル部分を骨材のないセメントミルクとした。これを2本の上付きリブ間に流し込むことによりボイドを形成した。気泡モルタルの特性およびボイドとして使用することの長所、短所を以下に挙げる。

特 性・気泡は独立気泡で吸水性は小さい

- ・アルカリ性：pH 13
- ・無機材料で耐火性が良好
- ・流動性に優れ、500m程度のポンプ圧送も可能

長 所・PCa工場での一貫製造が可能

- ・セメントと気泡剤のみで低コストである。
- ・形状は自由で配管・設備の埋め込みも可能
- ・型枠のストックを必要としない
- ・コンクリート系材料であり解体時に分離が不要
- ・型枠内の滞水の心配がなく、腐食もしない。

短 所・従来品(EPS)に比べ重い。比重0.5~0.6

- ・製造設備が必要

### 4. ボイド製造実験

ボイド製造の流れを図-5に示す。実験を行うにあたり、比重をなるべく軽くし、かつ施工上必要な最低強度を2MPa程度と仮定し、これを確保できるような配合を選定した。表-2にこれを示す。製造の流れとしては、はじめにミキサーにセメントと水を投入しセメントミルクを製造する。これとは別に起泡剤に圧縮空気を送り込み20倍となっ

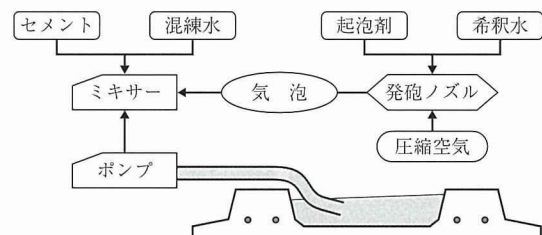


図-5 ボイド製造の流れ

表-2 気泡ボイド配合表

生比重 (kg/l)	セメント (kg/m³)	起泡量 (l/m³)	原液重量 (kg/m³)	水 (l/m³)	水セメント比
0.64	400	633	1.32	240	60.0%

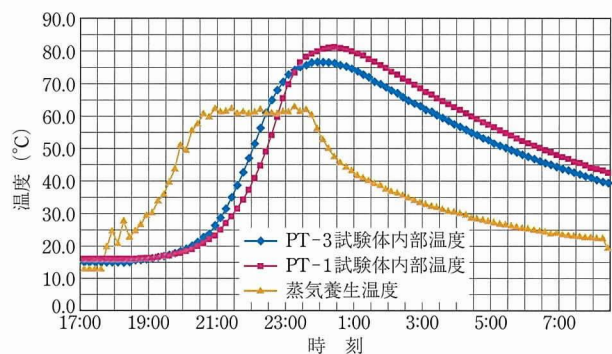


図-6 蒸気養生時試験体温度履歴

た気泡をミキサー内に順次送り込みセメントミルクに混ぜ合わせる。この混合合わせの際、ミキサーの回転速度と時間の調整がポイントとなる。ミキサーには回転速度を調整できるようにインバータが付いている。写真 - 1 に予備実験に使用したこれらの機器類を示す。数回の予備実験によりボイドの比重、強度、蒸気養生の温度計画と蒸気養生下の

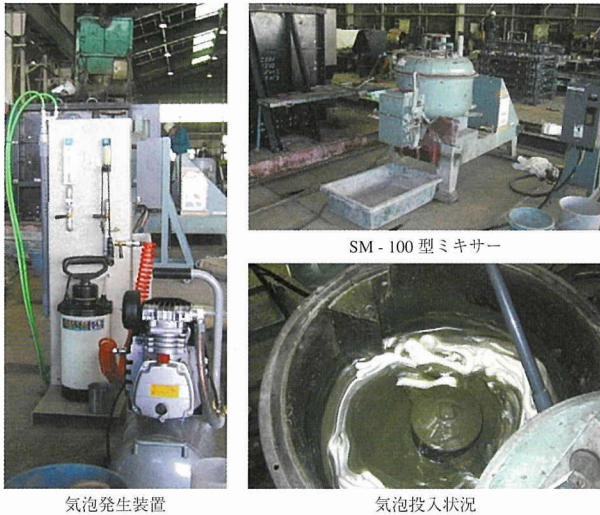


写真 - 1 ボイド製造機器



写真 - 2 製造予備実験



写真 - 3 実大製造実験

安定性等の基本物性と本体コンクリートのボイド流込みによる影響等を確認した。図 - 6 に蒸気養生時における試験体の内部温度履歴を示す。PT - 3 試験体は蒸気養生の前置き時間が3時間、PT - 1 試験体は1時間である。前置きが短いPT - 1 試験体のほうが内部最高温度が高くなるが、出来上がりに差は見られなかった。脱型翌日の比重は0.52～0.60、圧縮強度は1週強度で1.8 MPa、4週強度で2.2 MPaであった。予備実験の状況を写真 - 2 に示す。予備実験により得たデータを元に長さ7.5 mの実大スラブのリップ間に気泡モルタルを流し込む実物大製造実験を行った。写真 - 3 にこれを示す。

## 5. 性能確認実験

PC 合成スラブとしての性能を確認するために、静的曲げ載荷実験および長期載荷実験を計画し、実施した。試験体はいずれも先に図 - 1 に示した基本断面形状で全長7.5 mのものを使用した。

### 5.1 静的曲げ載荷実験

合成スラブの中央曲げ性能を確認するために、静的繰り返し載荷試験を行った。(写真 - 4) 試験体は、合成スラブのボイド部を気泡モルタルで形成した試験体(合成V)とリップ間にも現場打ちコンクリートを打設したボイド無しの試験体(合成C)の2体とした。両試験体の断面性能を表 - 3 に示す。

合成試験体の製作時には、図 - 7 に示すように中央支保工の先端にロードセルを設置し、支保工が分担する荷重(自重及びトッピングコンクリート荷重)を測定した。結果を表 - 4 に示すが、支保工にかかる集中荷重を  $P = 5/8 WL$  とした計算値とほぼ一致した。

曲げ載荷実験は合成されたスラブ試験体を両端でピン支持し、200 kN ジャッキにより2線集中載荷で正方向(鉛直下方向)の繰り返し載荷を行った。変位測定はスラブ中央、両支点の底面各2点に中央純曲げ区間の相対たわみ用1点を加えた計7点で計測し、またコンクリート上面および両側面のひずみ測定も行った。

実験結果を表 - 5 に、荷重-変位関係の履歴曲線を図 - 8 に、最終ひび割れ図を図 - 9 に示す。なお、表 - 5 中の終局荷重実験値は、最終変位計をはずして荷重のみを計った値である。曲げひび割れは、コンクリートの曲げ引張強度を  $\sigma_b = 1.8\sqrt{f_c}$  とした計算値によく一致した。図 - 9 からわかるように最終までPC部分と現場打ち部分は一体として挙動していた。

曲げ耐力については、仕上げと積載荷重の合計を2.5 kN/m<sup>2</sup>とし、これと同等の中央曲げモーメントを与える設計荷重11.6 kNに対して、合成Vおよび合成C試験体はいずれも、ひび割れ耐力で2倍以上、最終荷重で4倍以上を示した。

以上曲げ試験の結果から、今回のPC合成スラブはボイドの有り無し両タイプにおいて十分実用に供し得ることが検証された。

### 5.2 長期載荷実験

スラブに要求される性能のうち最も直接的なのがたわみ



写真 - 4 静的曲げ載荷実験

表 - 3 試験体断面性能

項目	PC 単体時	合成スラブ	
		合成 V	合成 C
断面積 (cm <sup>2</sup> )	939.2	2 539.6	3 360
ボイド断面積 (cm <sup>2</sup> )	820.4	—	—
単位幅重量	0.28	0.66	0.82
図心距離 h1 (cm)	11.70	14.07	14.90
図心距離 h2 (cm)	6.30	13.93	13.10
断面係数 Z1 (cm <sup>3</sup> )	2 248	11 940	12 224
断面係数 Z2 (cm <sup>3</sup> )	4 173	12 055	13 909
	打継ぎ部	41 298	37 155
断面 1 次モーメント (cm <sup>3</sup> )	2 244	8 426	9 148
	打継ぎ部	7 995	8 054
断面 2 次モーメント (cm <sup>4</sup> )	26 299	167 960	182 166

表 - 4 支保工応力測定結果

	計算値 (kg)		実測値 (kg)	
	合成 V	合成 C	合成 V	合成 C
PC 自重	1 305	1 079	1 254	(831)
現場打設	1 764	2 706	1 675	2 641

表 - 5 曲げ載荷試験結果

試験体	曲げひび割れ荷重 (kN)		終局荷重 (kN)	
	計算値	実験値	計算値	実験値
合成 V	24.0	23.4	47.0	52.8
合成 C	25.0	26.0	40.8	48.2

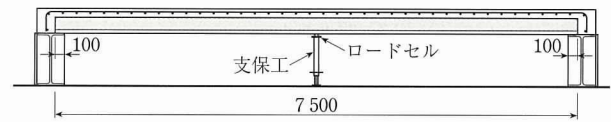


図 - 7 中央支保工の荷重測定

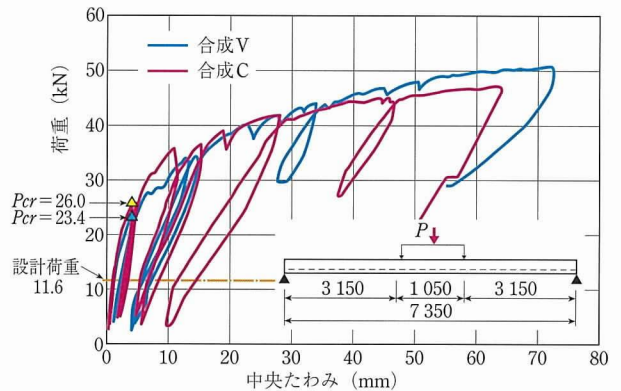


図 - 8 荷重-変位関係の履歴曲線

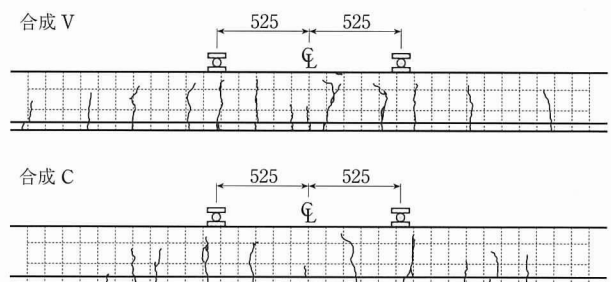


図 - 9 最終ひび割れ図

による床の傾斜である。住宅品確法の住宅紛争処理の参考となるべき技術的基準として床の傾斜に関しては、レベル 1 (不具合事象が発生した場合の瑕疵の存する可能性レベルで、1 は低い) では、3/1000 未満の傾斜となっており、これはスパンに対するたわみ比率に換算すると、概略 1/667 となる。これは告示に示される 1/250 と比較するとかなり厳しい値である。このために、設計に使用するたわみ倍率を実験により確認し、設定することが重要となる。このたわみ倍率を予測することを目的として、ボイドスラブの主方向について長期載荷実験を行った。(写真 - 5) 平成 13 年 7 月より載荷を始め、現在も継続中である。本論では載荷後 240 日までの結果について報告する。

試験体の製作はハーフ PC 板を製造 5 週間後に土台となる両端の梁にかかり代 4 cm で架設した。この際、中央部には支保工をレベル調整して設けている。所要の上端配筋を行った後、現場打ちコンクリート 100 mm を打設して固定端を確保した。なお、梁間には厚さ 400 mm のスタブを設け梁と一体とした。試験体の形状配筋図を図 - 10 に示す。

コンクリート材料試験結果を表 - 6 に示す。コンクリートの圧縮強度は PC 部、現場打ち部とも 4 週強度と載荷開始から 6 週および 36 週の値を示した。

○ 研究報告 ○

荷重方法は積載荷重を 2.5 kN/m<sup>2</sup> として、所要の重量になるよう鉄筋を束ねて試験体上面に荷重した。ちなみに D 13 で 280 本使用した。荷重は現場打ちコンクリートの材齢 4 週 (28 日) 目に、支保工を撤去することにより開始した。変位測定もここから開始している。まず支保工撤去により自重によるたわみを計測した後、鉄筋により積載荷重を加え、荷重終了後に積載によるたわみを計測した。

荷重後 240 日経過した実験結果として、弾性たわみ計算



写真 - 5 長期荷重実験

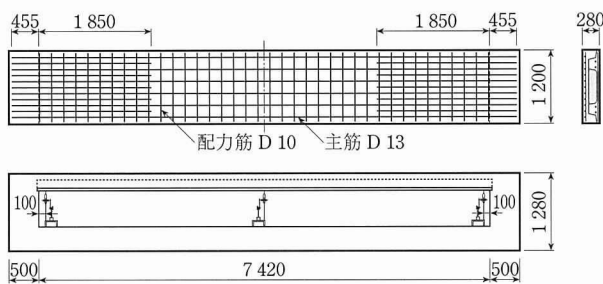


図 - 10 長期荷重実験試験体

表 - 6 コンクリート材料試験結果

	材齢 (W)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
			実測値	計算値
PC 部	4	49.0	40.3	37.6
	15	53.5	41.2	38.7
	45	57.5	—	39.6
現場部	4	32.9	33.4	32.9
	10	33.6	33.8	33.8
	40	38.2	—	34.6

値、たわみ実測値およびたわみ倍率を併せ表 - 7 に示す。

また図 - 11 に中央たわみの履歴を示す。長期たわみ倍率の算定のため弾性たわみ計算値は両端固定梁として求めた。また弾性係数は表 - 6 中 PC 部の 4 週強度の計算値を用いた。曲げ剛性は PC 部と現場打ち部コンクリートの弾性係数比により等価断面で計算している。

240 日までの長期たわみ倍率の計測結果を図 - 12 に示す。この計測結果から最小自乗法により、双曲線関数および自然対数関数の近似式 1, 2 を求め図中に示す。また、両式より 10 年後、50 年後のたわみ倍率を推定した結果を表 - 8 に示す。50 年後の推定たわみ倍率は、たわみ倍率の推定によく用いられる式 1 において 2.47 倍、自然対数近似式では 3.7 倍という結果を得た。

なお上端コンクリート端部には両端とも 0.1 mm~0.2 mm

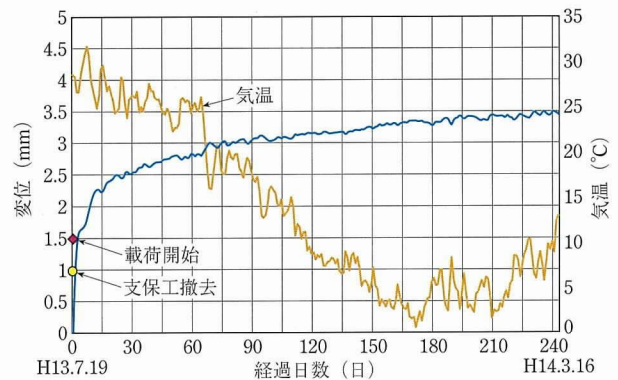


図 - 11 中央たわみ履歴

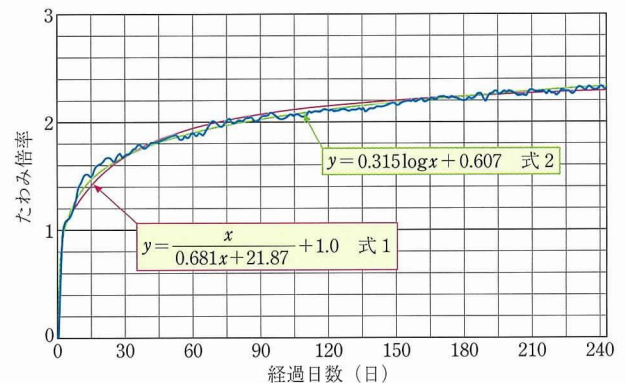


図 - 12 たわみ倍率

表 - 7 長期荷重試験結果

支保工撤去時	荷重時	100 日	150 日	200 日	240 日
弾性たわみ (mm)		長期たわみ (mm)			
0.99	1.50	3.09	3.26	3.38	3.46
計算値 (mm)		たわみ倍率			
1.05	1.43	2.16	2.28	2.36	2.42

表 - 8 長期たわみ倍率の推定

	240 (日)	10 (年)	50 (年)
式 1 (双曲線関数)	2.29	2.45	2.47
式 2 (自然対数関数)	2.33	3.18	3.70

程度のひび割れが現時点までに発生しているが、ひび割れ近傍の鉄筋歪みは100~200 $\mu$ と小さい値である。

## 6. 今後の課題

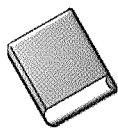
今後の予定としては、公的試験場における遮音実験を計画中である。曲げ載荷実験、長期載荷実験の結果とあわせて床板としての性能実験はこれで最小限クリアされるが、残された課題はまだ多い。今後は残された課題を一つ一つクリアしながら、設計・製造・施工のフィードバックによ

る改良等を重ねつつ、各種資料を蓄積し、設計施工マニュアルに反映しこれを完備していくつもりである。

## 7. おわりに

気泡ボイド材の開発は日本カイザー株式会社、宝通商株式会社との共同研究により行った。本論のボイド製造予備実験においても多大な協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

【平成14年4月18日受付】



刊行物案内

# 第 8 回 プレストレストコンクリートの 発展に関するシンポジウム 論 文 集

(平成10年10月)

本書は、平成10年10月に松山で開催された標記シンポジウムの講演論文集です。

頒布価格：会員特価 10 000 円〈非会員価格 12 000 円〉(送料はいずれも 600 円)  
体 裁：B5判，箱入り