

トラス筋を有する軽量スラブの開発

技術本部開発課 河金 甲

【キーワード】

トラス筋, 軽量スラブ, 曲げ特性, 押抜きせん断特性, 高強度モルタル

1. はじめに

現在、駅前立体化にともなうペDESTリアンデッキ用床版、歩道橋床板、人工地盤用床板といった比較的小さな荷重が作用する場所への適用を前提とし、上下モルタル板の間に、トラス筋(圧縮鉄筋、引張鉄筋、ラチス筋)を用いてスラブの軽量化を図った製品(写真-1、仮称: サンドイッチパネル)の開発を進めている。ここでは、サンドイッチパネルの特徴や力学的特性を把握するために行った供試体製作と静的荷重試験及びそれに用いるモルタルの開発状況について報告する。

2. 実験概要

図-1に示す床版に適用した場合の全体挙動を検討するはり供試体(幅400×高さ210×長さ4300mm、写真-2)と、図-2に示す上床板の局所的な押抜きせん断に対する耐力を検討する押抜き供試体(幅350×高さ210×長さ500mm、写真-3)により実験を行った。ここで、押抜き供試体は、発泡スチロール(以下、EPS)の有無による影響の確認のため、EPSを取り除いた供試体も実験した。荷重は、はり供試体は2点集中荷重載荷とし、押抜き供試体については支圧板(50×50mm)を介して行った。なお、本実験のモルタル部には、既製品の無収縮モルタルである、「プレユーロックス(太平洋マテリアル製)」を用いている。

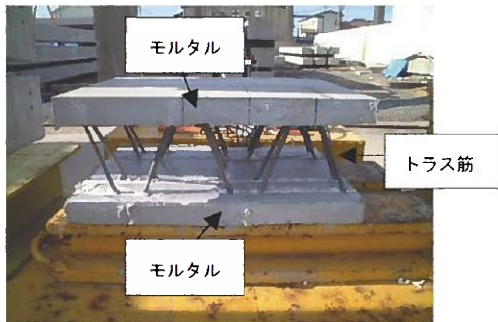


写真-1 サンドイッチパネル



写真-2 はり供試体

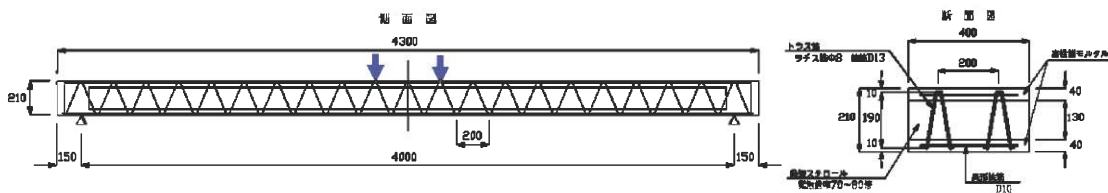


図-1 供試体概要図 (はり供試体)

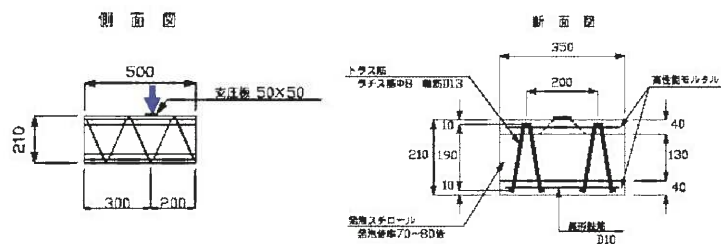


図-2 供試体概要図 (押抜き供試体)



写真-3 押抜き供試体

3. 供試体製作

EPS とトラス筋は地組みをし、型枠内に挿入した(写真-4)。型枠組立後(写真-5)、今回は打設量が少なかったことから、無収縮モルタルをハンドミキサーにより練混ぜ打設した。なお、通常の工場製品と同様の蒸気養生を行った。

打設中、型枠パイブレータの使用開始と同時に、はり供試体において EPS の浮き上がりが発生した(写真-6)。今回はウェブが無く、写真-5のように上から木材パネルを介してEPSを押さえることにより固定したが、再度検討していかなければならない。さらに、サンドイッチ構造は断面に占める EPS の比率が大きく、パイブレータの使用により非常に大きな浮力がEPSに生じてしまうことから、パイブレータを必要としない自己充填性を有するモルタルの採用が望まれる。

また、載荷時前、はり供試体の1体だけではあるが、支間中央上縁付近にひび割れが発見された(写真-7)。これは、工場内から載荷試験機までのフォークリフトによる供試体移動中に発生したものと考えられ、鉄筋コンクリート構造物でひび割れを許容しているとはいえ、使用前の運搬時に発生するのは美観や耐久性の面からも問題であるので対策が求められる。

4. 載荷試験

4.1 材料特性及び載荷条件

載荷試験時の材料特性、載荷治具重量、自重を以下に示す。

(1) 材料特性

(a)無収縮モルタル

圧縮強度=51.2 (N/mm²)、ヤング係数=20 (kN/mm²)

(b)鋼材

圧縮鉄筋：D13 (SD295A)、降伏強度=334 (N/mm²)

引張鉄筋：D10 (SD295A)、降伏強度=353 (N/mm²)

ラチス筋：φ8 (SWM-B)、引張強度=596 (N/mm²)

(2) 載荷治具重量 (ロードセル及びジャッキ含む)

はり載荷試験：146 (kg)

押抜きせん断試験：18 (kg)

(3) 自重 (押抜き供試体の実測結果より算出)

0.95 (t/m³)

4.2 載荷荷重の計算値

(1) 設計荷重作用時：P=4.4 (kN)



写真-4 EPS組立状況



写真-5 型枠組立完了



写真-6 打設中のEPSの浮き上がり



写真-7 載荷試験前のひび割れ

群集荷重 5.0(kN/m²)が荷重されたときの値である。

(2)はり供試体の終局耐力：17.3 (kN)

コンクリート標準示方書⁹⁾に準拠し算出した。しかし、ラチス筋の影響は考慮していない。

(3)押抜きせん断供試体の耐力：15.6 (kN)

コンクリート標準示方書に準拠し計算した。

4.3 結果及び考察

4.3.1 はり載荷試験

(1)支間中央変位

はり載荷試験状況を写真-8に、荷重開始から終局時までの支間中央における荷重と変位の関係を図-3に示す。今回の実験において、はり載荷試験は2体実施しており、No.1とNo.2としてそれぞれの実験値を示している。ここで、図中の計算値は、下縁のモルタルを無視してモデル化したフレーム解析の値である。

実験値と計算値の比較において、鉄筋降伏時までは計算値とほぼ一致しており、フレーム解析により精度良く挙動を予測することができることがわかる。また、通常のRC構造物の場合、引張鉄筋降伏後、荷重の増大はほとんどみられなくなるが、サンドイッチパネルの場合は引張鉄筋降伏後も耐力が増大している。そして、最終的な耐力は30.8kNと30.4kNであり、示方書に準拠し算出した値(17.3kN)と比較し、約1.8倍の耐力を有していた。これは、耐力の計算時には考慮していないラチス筋の影響が大きいと考えられる。

また、終局時における変位は380mmと337mmであり、写真-8からも確認できるようにトラス構造は非常に靱性に富んだ構造であることがわかった。

なお、最終破壊形態は2体とも写真-9に示すような荷重点内における圧縮破壊であった。

(2) 引張鉄筋ひずみ

支間中央における荷重と鉄筋ひずみの関係を図-4に示す。ここにおける計算値もフレーム解析によるものである。ここで、鉄筋降伏ひずみ ϵ_{sy} は自重と荷重治具の影響をフレーム解析を用いて計算し、以下のようになっている。

$$\epsilon_{sy} = 1765\mu - 289\mu (\text{自重} + \text{荷重治具}) = 1476\mu$$

図より、鉄筋降伏まではフレーム解析と近い値を示しており、引張鉄筋ひずみはフレーム解析によりほぼ評価できるといえる。なお、No.1において7.5kNまでたわみが小さくなっているが、それ以降はほぼNo.2



写真-8 はり載荷試験状況

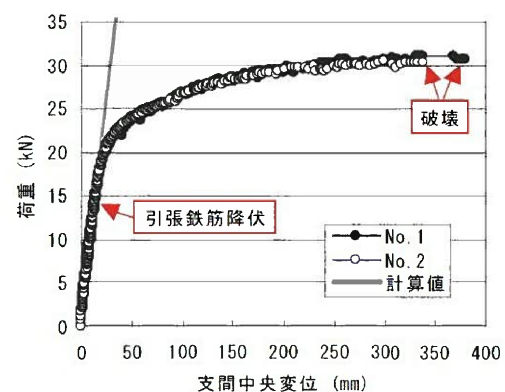


図-3 荷重と支間中央変位の関係



写真-9 破壊状況 (はり載荷試験)

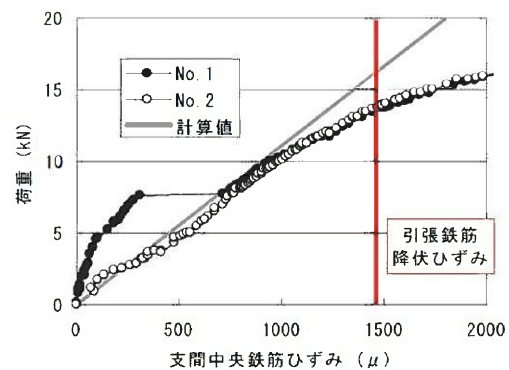


図-4 荷重と支間中央鉄筋ひずみの関係

と同様の値を示していることから、鉄筋ひずみゲージ貼付位置と7.5kNまでに発生したひび割れ位置がずれていたためであると思われる。

(3) 下縁モルタルひずみ

図-5に荷重と支間中央下縁モルタルひずみの関係を示す。弾性変形する場合、荷重増加に伴い、モルタル下縁におけるひずみは引張側に増大するが、本実験では荷重が1kNの時点で増加しなくなった。これは、その時点でひび割れが発生したためであり、1kNという設計荷重(4.4kN)に対して極めて小さな荷重段階で下縁にひび割れが生じてしまうことがわかった。

(4) 上縁モルタルひずみ

荷重と支間中央上縁のモルタルひずみの終局時までの関係を図-6に示す。モルタルを用いた本実験において、コンクリートの場合と同様3500 μ で圧縮破壊するとし終局時の耐力を計算したが、実験時は約5500 μ 程度まで圧縮ひずみが増大し破壊に至っている。この圧縮破壊時のひずみはモルタル特有のものであるか、さらに検討していく必要がある。

4.3.2 押抜き載荷試験結果

押抜き載荷試験状況を写真-10に、EPSの有無による支間中央変位の比較を行った結果を図-7に示す。

どちらの供試体もせん断ひび割れが発生し破壊に至ったが、その最大荷重はEPSありの場合34.7kN、なしの場合23.6kNと、EPSの影響により約1.5倍耐力が増大した。ただし、EPSなしの場合も計算値(15.6kN)を下回ることはなかった。

また、EPSがある場合はない場合と比べて、せん断ひび割れ発生までのたわみが小さくなっている。そして、最大荷重まで達した後の挙動は、EPSがない場合は写真-11に示すような脆性的な破壊に至っているが、EPSがある場合は急激に破壊することなく、変位が5mmに達するまでは緩やかに耐力が減少し破壊した。

これらは、EPSが荷重に対する変形を拘束していることに起因しており、EPSにより押抜きせん断特性が大きく向上することがわかった。

5. 高強度モルタルの開発

5.1 開発概要

今回の供試体製作時のモルタルは、既製品のプレユロックスを用いたが、製品コスト削減のためには、

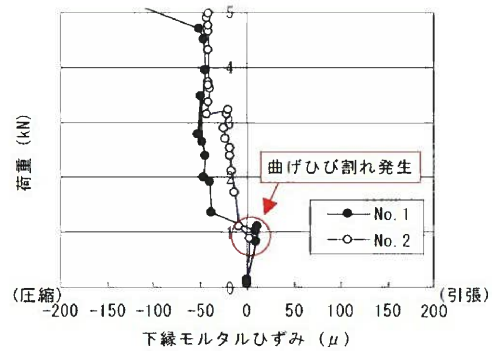


図-5 荷重と下縁モルタルひずみの関係

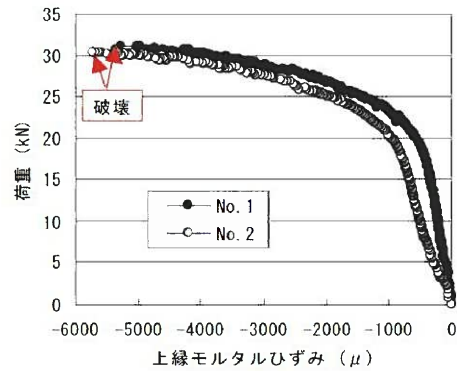


図-6 荷重と上縁モルタルひずみの関係



写真-10 押抜き載荷試験状況

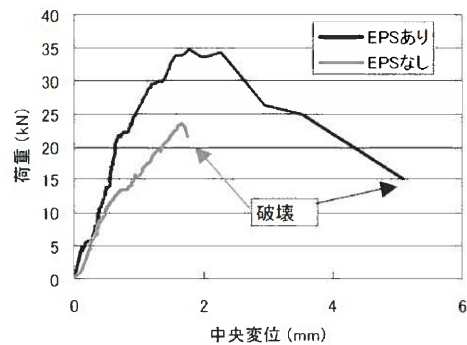


図-7 荷重と中央変位の関係

より安価なモルタルの使用が不可欠になってくる。そこで、モルタルを自社開発することを目的とし、強度特性や収縮特性及び打設性能の検討を行った。

なお、モルタルの高強度化にあたり、水セメント比を小さくする必要があり、自己収縮量が大きくなってしまう。そのため、膨張特性のある PFBC 灰を混入することにより、無収縮モルタルと同等の性質を有するモルタルの開発を試みた。

5.2 配合と強度及び収縮特性

表-1 に試験に用いた配合を示すが、過去に施工実績のあるモルタルの配合(P0)を基本とし、PFBC 灰をセメントの 30%置換(P30)及び 50%置換(P50)した配合の 3 種類とした。

強度発現特性を図-8 に示す。なお、供試体は蒸気養生をしている。PFBC 灰でセメントを置換することによって圧縮強度の低下はみられるものの、P50 においても、材齢 1 日で約 40N/mm² の強度発現性を有しており、材齢 28 日には 70N/mm² にまで達している。

また、ひずみゲージを貼付した鉄筋をφ100×200mm の供試体中に入れ計測した、打設直後からのひずみの経時変化を図-9 に示す。計測は P0 と P30 のみしか行っていないが、P0 においては、打設直後から自己収縮と思われる収縮ひずみが発生し、材齢 7 日においてそれは約 180μ にまで達しているのに対し、P30 は PFBC 灰の混入により初期に膨張挙動を示し、ほぼ自己収縮補償となっている。

5.3. 打設性能試験

自社開発しているモルタルの自己充填性の検討のため、高さ 2000mm(断面 210×1000mm)の供試体を打設した。なお、モルタル部の厚さは 40mm であり、今回の試験に用いたモルタルは P30 である。

最初はパイプレータを使用しないということで供試体の下面からポンプ圧送により、充填させる予定であったが、用いたモルタルのワーカビリティが良好であったことから、写真-12,13 に示すよう直接上面からモルタル投入した。脱枠後の供試体を写真-14 に示すが、未充填部はみられず、気泡も通常のコンクリート製品と同程度であった。よって、今回開発したモルタルは、パイプレータの使用なしで 2000mm の高さまでの供試体は打設可能であると判断できる。



写真-11 破壊状況 (EPSなし)

表-1 モルタル配合

配合名	水結合材比 W/B (%)	単用量(kg/m ³)				高性能AE 減水剤	
		水 W	早強セメント HC	PFBC灰 P	細骨材 S	(kg/m ³)	(B×%)
P0	30	300	1000	0	996	9.00	0.90
P30	30	300	700	300	945	10.00	1.00
P50	30	300	500	500	911	10.00	1.00

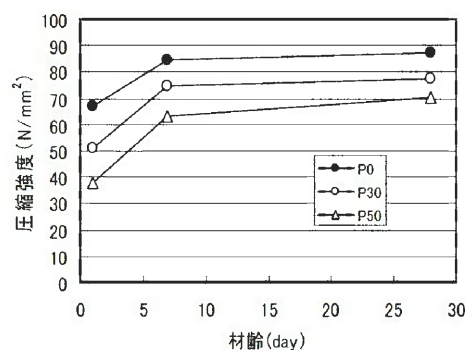


図-8 強度発現特性

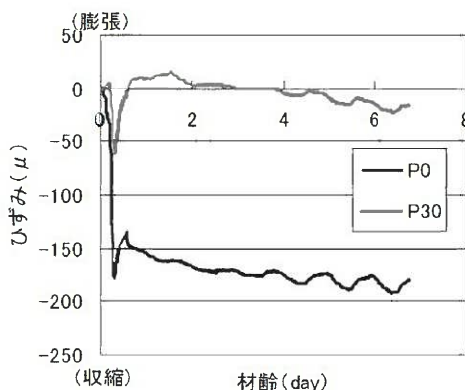


図-9 収縮特性

6. まとめ

これまでのサンドイッチパネルに関する検討結果を以下にまとめる。

- (1)現在の工場における設備で製品製作は十分可能である。しかし、モルタル厚が非常に小さいことから、高精度の施工性が要求され、EPSの固定方法等再検討していかねばならない。
- (2)運搬中やほぼ自重程度でひび割れが発生してしまうため、その対策が必要である。
- (2)荷重に対する耐力は引張鉄筋降伏時まではほぼフレーム解析によって評価できる。
- (3)トラス筋を有することにより、引張鉄筋降伏後も耐力が増大し、非常に靱性に優れた構造となる。
- (4)押抜きせん断力に対する耐力や変形状の向上に、EPSは大きく寄与している。
- (5)自社においても、自己充填性があり無収縮の特性を持つ高強度モルタルを製作することは、十分可能である。

7. おわりに

今回の実験結果をふまえ、初期におけるひび割れ対策として、プレストレスを導入した供試体を製作し実験をしている(写真-15)。そして、鋼材の防錆処理方法やかぶり厚さの妥当性等、商品としての最終的な仕様を決定するため継続的に検討を行っている。

高強度モルタル開発においては、経済性や耐久性の観点から、現在の 1000kg/m^3 の結合材量(セメント+PFBC灰)を減らす等し、製品配合の決定に向けて試験練りを実施している。また全国展開していくためには、より一般的な材料の使用が求められ、混和材としてフライアッシュや高炉スラグを用いたり、収縮による内部応力の緩和のための膨張材の使用を考えている。

そして、今回製作した供試体の単位質量が $0.95(\text{t/m}^3)$ と小さいことによるポーンツーンへの適用や、EPSの振動減衰効果を利用した防振壁への適用等も視野に入れ、市場拡大に向けた調査をしている。

なお、サンドイッチパネルは積水化成工業株式会社と共同で開発を進めている。

【参考文献】

- 1) 土木学会:2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.3



写真-12 打設性能試験状況 (その1)



写真-13 打設性能試験状況 (その2)



写真-14 打設性能試験供試体 (脱枠後)



写真-15 プレストレス導入供試体製作状況

トラス筋を有する軽量スラブの曲げ及び押抜きせん断特性

極東工業（株） 正会員 ○江良 和徳
 積水化成品工業（株） 正会員 緒方 広泰
 中央大学 フェロー 田澤 榮一

1. はじめに

駅前立体化にともなうペDESTリアンデッキ用床版、歩道橋床版、人工地盤用床版といった比較的小さな荷重が作用する場所への適用を前提とし、上下モルタル板の間に、トラス筋（圧縮鉄筋、引張鉄筋、ラチス筋）を用いてスラブの軽量化を図った製品（呼称；KS スラブ、写真-1）の開発を進めている。ここでは、その力学的特性を明らかにするため行った、静的曲げ試験と押抜きせん断試験の結果を報告する。

2. 実験概要

図-1 に示す床版に適用した場合の全体挙動を検討するはり供試体（幅 400×高さ 210×長さ 4300mm）と、図-2 に示す上床版の局所的な押抜きせん断に対する耐力を検討する押抜き供試体（幅 350×高さ 210×長さ 500mm）により実験を行った。ここで、押抜き供試体は、発泡スチロール（以下、EPS）の有無の影響を調査するため、EPS を取り除いた供試体も実験した（写真-2）。荷重は、はり供試体については 2 点集中荷重載荷とし、押抜き供試体については支圧板（50×50mm）を介して行った。

3. 実験結果

実験に用いた材料の特性を表-1 に、コンクリート標準示方書¹⁾に準拠し算出した最大耐力の計算値を表-2 に示す。なお、計算時にラチス筋の影響は考慮していない。

3.1 曲げ特性（はり載荷試験）

一般的な RC 部材の使用状態である、引張鉄筋降伏付近までの支間中央における荷重と変位の関係を図-3 に示す。はり載荷試験は 2 体実施しており、No.1 と No.2 としてそれぞれの実験値を示している。ここで、図中の計算値は、下側のモルタル版の剛性を無視する

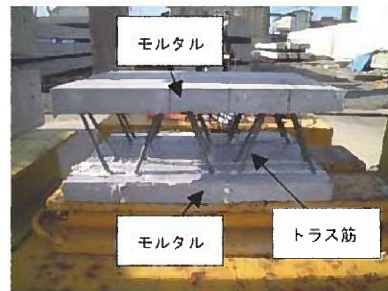


写真-1 KSスラブ

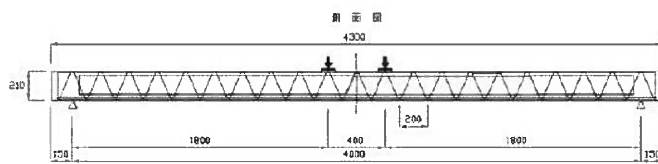


図-1 供試体概要図（はり供試体）

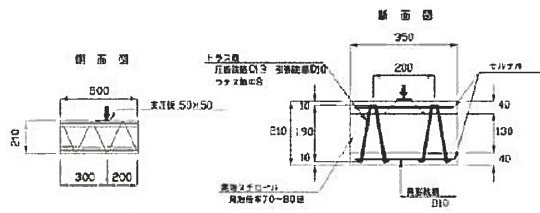
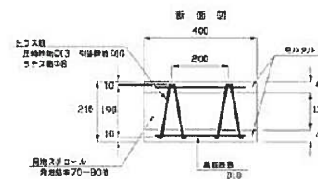


図-2 供試体概要図（押抜き供試体）



写真-2 押抜き供試体

表-1 材料特性

モルタル	載荷時	圧縮強度	51.2 N/mm ²
		ヤング係数	20.0 kN/mm ²
トラス筋			
圧縮鉄筋	D13(SD295A)	降伏強度	334 N/mm ²
引張鉄筋	D10(SD295A)	降伏強度	353 N/mm ²
ラチス筋	φ8(SWM-B)	引張強度	598 N/mm ²

表-2 耐力計算値

曲げ	17.3 kN
押抜きせん断	13.0 kN

キーワード トラス筋、軽量スラブ、曲げ特性、押抜きせん断特性

連絡先 〒732-0052 広島県広島市東区光町2丁目6-31 極東工業（株） TEL 082-261-1204

ことで、曲げひび割れ後発生後の断面をモデル化したフレーム解析の値である。また、曲げひび割れ発生が目視により確認された荷重と、支間中央の引張鉄筋に貼付したひずみゲージの計測値が鉄筋降伏ひずみに達したときの荷重も図中に示す。

図より、曲げひび割れ発生から引張鉄筋降伏時まで、実験値は計算値とほぼ一致しており、フレーム解析によって部材の挙動を十分に予測できるといえる。

また、図-4 に終局時までの荷重と変位の関係を、写真-3 に終局直前における載荷状況を示す。

通常の RC 構造物の場合、引張鉄筋降伏後、荷重の増大はほとんどみられなくなるが、本実験では引張鉄筋降伏後も荷重が増大している。そして、最終的な耐力は 30.8kN と 30.4kN であり、示方書に準拠し算出した値（17.3kN）と比較し、約 1.8 倍の耐力を有していた。これは、耐力の計算時には考慮していないラチス筋が引張鉄筋としても作用したためと考えられる。また、終局時における変位は 380mm と 337mm であり、写真-3 からも確認できるように、本製品は非常に靱性に富んでいることがわかった。

3.2 押抜きせん断特性

荷重と支圧板位置における変位の関係を図-5 に示す。EPS の有無にかかわらず、どちらの供試体もせん断ひび割れが発生し破壊に至ったが、その最大荷重は EPS ありの場合 34.7kN、なしの場合 23.6kN と、EPS の影響により約 1.5 倍耐力が増大した。ただし、EPS なしの場合も計算値（13.0kN）の 1.8 倍になった。また、EPS がある場合はない場合と比べて、最大荷重に至るまでの同一荷重のたわみが小さくなっている。そして、最大荷重に達した後の挙動は、EPS がない場合、脆性的な破壊に至るのに対し、EPS がある場合は変位が 5mm に達するまでは緩やかに耐力が減少し破壊した。

これらは、EPS が荷重に対する変形を拘束していることに起因していると考えられ、EPS により押抜きせん断特性の向上を図ることが期待される。

4. おわりに

本製品は、床版への使用を前提とし開発したものであるが、その軽量であるという特徴を生かしたポーンツーへの適用や、EPS の振動減衰効果を利用した防振壁への適用も可能であると考えている。

参考文献 1)土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002.3

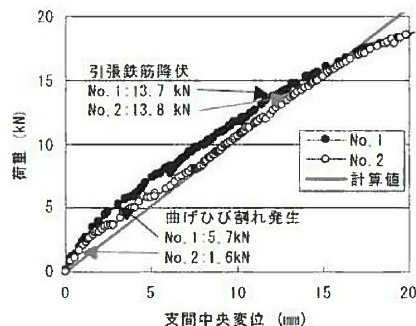


図-3 荷重と変位の関係（使用状態）

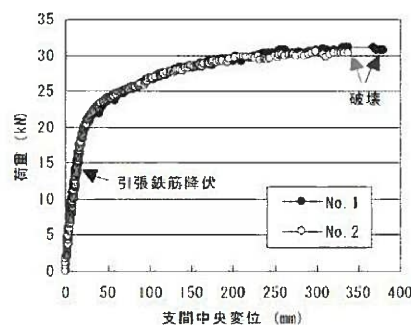


図-4 荷重と変位の関係（終局まで）



写真-3 はり載荷試験状況

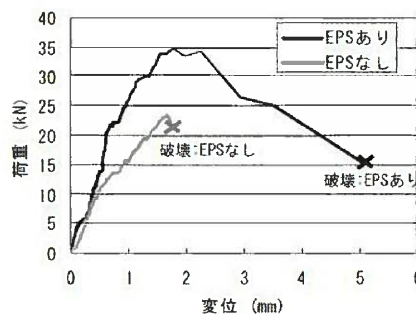


図-5 荷重と変位の関係（押抜きせん断）

プレストレスを導入したトラス筋を有する軽量スラブの検討

極東工業（株） 正会員 ○河金 甲
 積水化成工業（株） 正会員 前 育弘
 中央大学 フェロー 田澤 榮一

1. はじめに

現在、上下面のモルタル版をトラス筋により結合した軽量スラブ（呼称；KS スラブ）の実用化に向けた検討を行っている。ここでは、より長支間部材への適用拡大やモルタル版の更なる軽量化を図るため、プレストレスを導入したトラス筋を有するスラブについての検討結果を報告する。

2. コンクリートとモルタルの特性

PC 製品としての実用化に向けて、プレストレス導入強度の早期確保は不可欠である。ここで、JIS-A 5373（プレキャスト PC 製品）では、スラブ橋桁について、設計基準強度 50N/mm^2 以上、プレストレス導入強度 35N/mm^2 以上と規定している。また、高強度化により水結合材比が小さくなることに起因して自己収縮が大きくなり、それに伴う拘束応力が懸念される。そこで、モルタルの圧縮強度発現及び収縮特性を検討した。なお、断面形状によっては、コンクリートの使用も考えられるため、コンクリートについても実験を行った。

(1) 配合

実験に用いたコンクリートとモルタルの配合を表1に示す。ここで、細骨材は混合砂を、粗骨材は砕石を用いた。また、環境負荷低減のため、加圧流動床形式の火力発電所から電力供給に伴い発生する石炭灰（以下、PFBC 灰）を混入している。なお、その置換率は早強セメントの30%とした。

(2) 強度特性

図-1に圧縮強度発現性を示す。測定は材齢1・7・28日で行った。また、材齢1日までに蒸気養生をしている。今回の結果より、モルタルとコンクリートどちらも、材齢1日でプレストレス導入強度 35N/mm^2 を満足しており、材齢7日では 50N/mm^2 に達している。

(3) 収縮特性

JIS A 6202-1997（コンクリート用膨張材）に準拠し計測した、コンクリート及びモルタルの収縮ひずみの経時変化を図-2に示す。また、熱電対により計測した外気温も示している。PFBC 灰はフライアッシュに比べ、CaO

表-1 配合

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位数(kg/m ³)					添加量(B×%) 混和剤 AD
			水 W	セメント C	PFBC灰 P	細骨材 S	粗骨材 G	
コンクリート	34	45.0	180	371	159	706	889	1.30
モルタル	33.75	-	270	560	240	1094	-	1.00

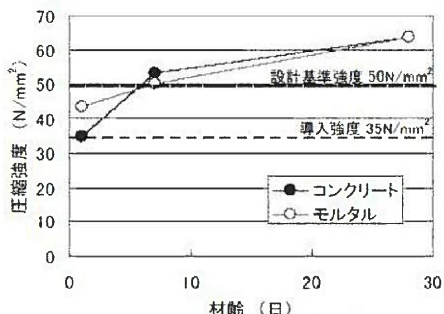


図-1 圧縮強度発現特性

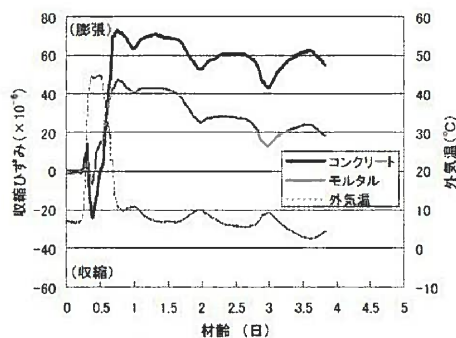


図-2 収縮ひずみの経時変化

キーワード トラス筋、軽量スラブ、プレストレス、環境負荷低減、曲げ特性

連絡先 〒732-0052 広島県広島市東区光町2丁目6-31 極東工業（株） TEL 082-261-1204

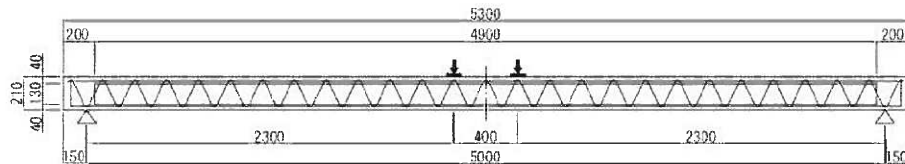


図-3 載荷概要図

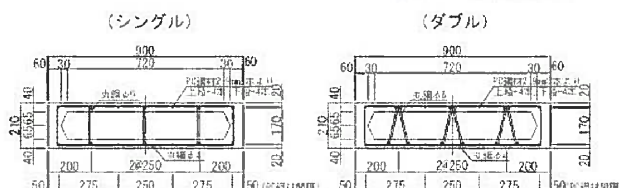


図-4 供試体断面図

表-2 使用材料

PC鋼材	SWPD3L	降伏強度	1912 N/mm ²
	2.9mm 3本より		
トラス筋			
圧縮鉄筋	φ6(SWM-B)	引張強度	596 N/mm ²
引張鉄筋	φ6(SWM-B)	引張強度	596 N/mm ²
ラチス筋	φ6(SWM-B)	引張強度	596 N/mm ²

及びSO₃を多く含有しており、それに起因し水和反応時に膨張性を有することは知られているが、本検討でも約材齢0.5日から膨張挙動を示した。

3. 曲げ特性

(1) 実験概要

トラス筋を有するPCスラブの曲げ特性の検討を、図-3に示すような2点集中荷重による静的載荷試験により行った。なお、トラス筋をシングルで配置した供試体（以下、シングル）と、ダブルで配置した供試体（以下、ダブル）の2種類により実験した。図-4に供試体断面図を、表-2に製作に用いた材料の特性を示す。なお、供試体の製作にはモルタルを用いた。

(2) 実験結果

使用状態での支間中央における荷重と変位の関係を図-5に示す。図中には2種類の供試体の曲げひび割れ発生時の実験値に加え、トラス筋の影響を無視し平面保持を仮定した上で、モルタルの引張強度を3.0N/mm²として求めた曲げひび割れ発生時の計算値も図示している。これより、実験値は計算値を上回っており、安全側に評価できている。

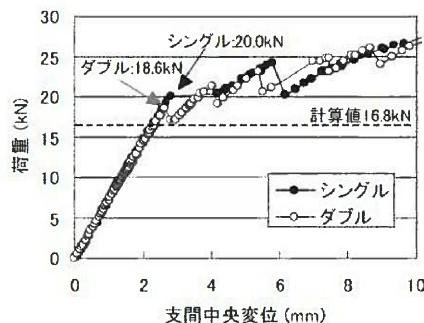


図-5 荷重と変位の関係（使用状態）

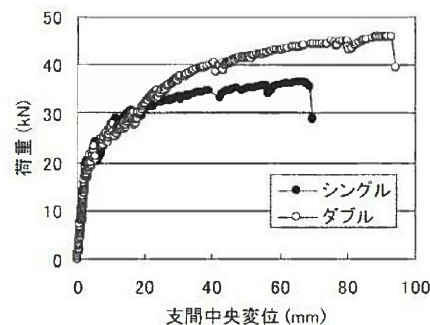


図-6 荷重と変位の関係（終局まで）

また、終局時までの荷重と変位の関係を図-6に示すが、最大荷重に至るまでシングルもダブルも急激な変状はみられない。

よって、トラス筋をシングルにしても、終局時まで十分に構造系を保持できるといえる。なお、2種類の実験での耐力の違いは、ダブルの方がシングルの2倍の引張鉄筋が配置されていることに起因している。

4. まとめ

本検討から、プレストレスを導入したトラス筋を有する軽量スラブの実用化及び耐力評価は可能であることがわかった。また、PFBC灰を混入したコンクリート及びモルタルは、PC製品として必要な強度を早期に発現することも確認でき、加えて若材齢時の膨張がひび割れ防止につながるものと期待される。

参考文献 1) 江良和徳他：トラス筋を有する軽量スラブの曲げ及び押抜きせん断特性，土木学会第60回年次学術講演会概要集，2005