

KS スラブ性能確認試験報告

事業開発本部開発課 牛尾亮太  
同上 谷口義則

【キーワード】

KS スラブ 曲げ性能 せん断性能 押抜きせん断性能

1 はじめに

都市再開発にともなうペ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い荷重が作用する場所への適用を前提とし, 上縁, 下縁のそれぞれに高流動コンクリートを使用した薄肉版をトラス筋により結合した図-1 に示す軽量スラブ(以下 KS スラブ)の開発を行ってきた。その KS スラブは図-2 に示す様な2種類を考えている。



図-1 KSスラブ構造概念図

1. KSタイプ: 支間5~15mに適用し, 断面両端のコンクリートウェブと断面中央にトラス筋を有する構造
2. KSLタイプ: 支間10~15mに適用し, 上下床版をトラス筋のみで結合した構造

KS スラブの主なメリットは, 以下の5点である。(図-2, 3参照)

1. 【軽量性】発砲スチロール(以下 EPS)を用いて中空部を大きくしているので軽量で取扱いが容易である。
2. 【経済性】材料費・運搬費・全体工事費の削減に寄与する。
3. 【作業性】高流動コンクリートの使用及び軽量化による作業性の向上が図れる。
4. 【環境負荷低減】産業副産物 PFBC 灰を活用し, 環境負荷低減に貢献する。
5. 【断熱性】EPS を中空型枠としており, 断熱性に優れる。

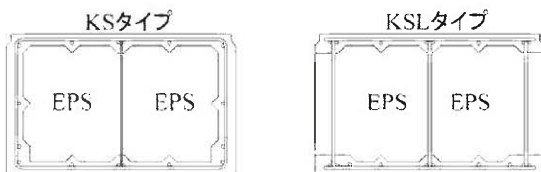


図-2 KSスラブ

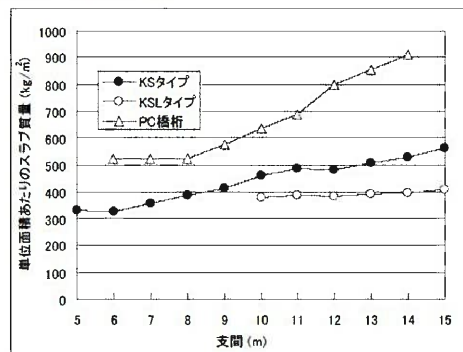


図-3 スパン長とスラブ質量\*

\* PC 桁; 軽荷重 (LS) 桁の適用支間に対して1ランク下げたもの

KS スラブを実用化するには以下の点を確認しなければならない。

1. 高流動コンクリートの流動性, 圧縮強度, ヤング係数, 収縮特性の確認。
2. KS スラブの曲げ性能, せん断性能の確認。
3. 局所的な力が薄肉床版に作用した時の押抜きせん断性能の確認。
4. 構造性能に対する EPS の貢献の確認。
5. 解析による構造挙動の再現性の確認。

そこで, 上記の点を確認するため「高強度コンクリート特性確認」「曲げ試験」「せん断試験」「押抜きせん断試験」を行って上記の性能確認をした。本稿ではその結果を報告する。

## 2 高強度コンクリート特性確認

### 2.1 試験概要

KS スラブは薄肉床版の使用を目指しているため、収縮によるひび割れ抑制や流動性の向上を図らなければならない。そこで、既往の研究<sup>1</sup>を参考に産業副産物 PFBC 灰を混入した高流動コンクリートを使用する事とした。これは、PFBC 灰が膨張特性を有しているため収縮の低減<sup>1</sup>が図れるからである。また更に産業副産物を使用することで環境負荷低減につながるといったメリットも考えられるからである。

そこで、PFBC 灰を混入した高流動コンクリートを KS スラブに使用することを目的に、流動性、圧縮強度、ヤング係数、収縮ひずみの経時変化の確認を行った。

### 2.2 試験結果

設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup> 級の配合例を表-1 に示す。

表-1 配合表

水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤	
		水 W	早強セメント HC	PFBC 灰 P	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )	(B×%)
32.0	50.0	170	371	159	797	821	8.5	1.6

この時の PFBC 灰の置換量はセメントの 30%であった。なお、コンクリートの品質はスランブフロー65cm であり、材料分離は見られなかった。

圧縮強度の強度発現特性を図-4 に示す。なお図中には W/B=35.5%、PFBC 灰置換率 30%の試験データも併記している。W/B=32%の試験結果に着目すると、材齢 1 日で約 50N/mm<sup>2</sup>、材齢 28 日で約 65N/mm<sup>2</sup>にまで達しており文献<sup>ii</sup>のプレストレス導入強度 35N/mm<sup>2</sup>を材齢 1 日で満足した。

ヤング係数と圧縮強度の関係を図-5 に示す。なお、一般的なコンクリートとの比較のため文献<sup>iii</sup>に準拠した設計値も併記している。図によると、実測値は多少のばらつきはあるが通常のコンクリートのヤング係数の計算値と同程度であった。

次に無拘束試験体から測定したコンクリートの収縮ひずみの経時変化を図-6 に示す。PFBC 灰を混入したコンクリートの収縮ひずみは、若材齢時における膨張により明らかに通常コンクリートより小さくなっていることが解る。そして、材齢約 600 日では収縮量に約 200×10<sup>-6</sup>の差がみられた。従って、セメントの 30%を PFBC 灰で置換することで収縮によるひび割れ発生を抑制できるものと考えられる。

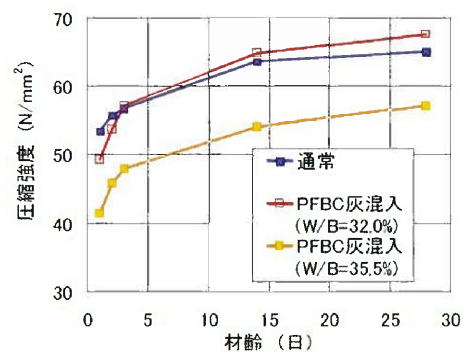


図-4 圧縮強度発現

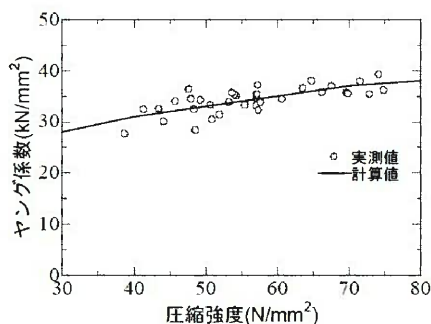


図-5 圧縮強度とヤング係数の関

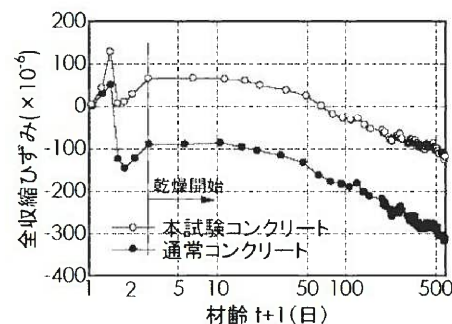


図-6 収縮ひずみの経時変化

### 3 KSスラブの施工

施工状況を写真-1, 2, 3, 4, 5, 6に示す。施工は以下の手順で行った。

- ①；予めEPSの中にトラス筋をセットした。(写真-1)
- ②；PC鋼線をセットした後、EPS、トラス筋、鉄筋の組み立てを行った。(写真-2)
- ③；側枠を立てた後、EPSの浮き上がりを防止する処理を施した。(写真-3)
- ④；コンクリートは表-1の高流動コンクリートを使用してスランプフロー65cm±5cmで管理した。(写真-4)
- ⑤；蒸気養生を行った後、型枠を外してプレストレスを導入した。(写真-5)
- ⑥；製作した試験体をクレーンにより搬出した。(写真-6)

なお、プレストレス導入後に目視観察を行ったがひび割れは見られなかった。



写真-1 トラス筋と EPS



写真-2 配筋状況



写真-3 型枠建て込み後



写真-4 コンクリート品質管理



写真-5 脱型状況



写真-6 搬出状況

### 4 KSスラブ載荷試験

試験結果の検討には文献<sup>iv)</sup>に準拠した表-4 の設計荷重を使用した。

表-4 設計荷重

コンクリート 単位重量 (kN/m <sup>3</sup> )	舗装荷重 (設計舗装厚100mm) (kN/m <sup>2</sup> )	群集荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	雪荷重 (kN/m <sup>2</sup> )
24.5	2.3	3.5	1.0

#### 4.1 KSスラブ曲げ試験

##### 4.1.1(i) 短支間 KS タイプ試験概要

図-7に示すKSタイプを製作し曲げ性能の確認を行った。載荷試験状況を写真-7に示す。

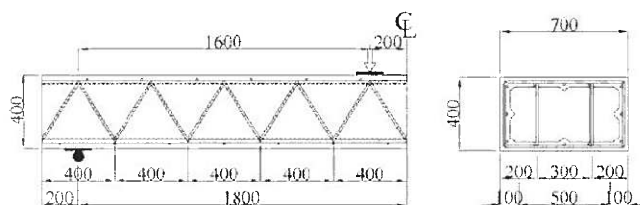


図-7 試験体概要 (unit:mm)



写真-7 載荷試験状況

##### 4.1.1(ii)短支間 KS タイプ試験結果

支間中央における荷重とたわみの関係を図-8に示す。たわみの値は全断面有効時の計算値と同等の値を示しながら推移し、約140kNにおいてスラブ下面にひびわれの発生と同時に計算値から徐々に離れた。約300kNで最大荷重に達したあとも急激な荷重の減少や変位の増大を見ることがなく上板上面のコンクリートの圧壊に

より破壊に至った（写真-8）。最大値は荷重 296kN、たわみ 50mm、上縁コンクリートひずみは約 $3000 \times 10^{-6}$ であった。

弾性範囲内での計算結果との比較については、トラスを無視した RC 計算による計算値に実測値はよく一致していることから、断面に対して中空断面が大きいにもかかわらず一体性を保っていたと考えられる。一方、実測値はフレーム解析の結果から離れており、計算時に無視したウェブの影響が大きかったと考えられる。

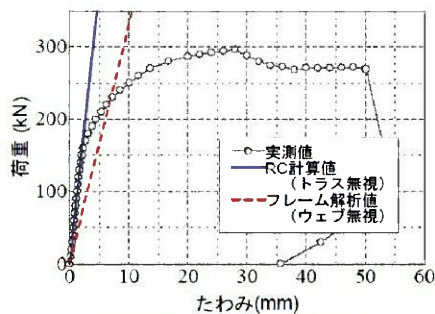


図-8 荷重とたわみ関係



写真-8 破壊状況

#### 4.1.2 (i) 長支間 KSL タイプ曲げ試験概要

長支間でウェブが無くトラス筋のみによって上下薄肉床版が結合される KSL タイプの曲げ試験を行って曲げ性能、トラス筋の挙動を確認した。試験体概要を図-9 に、載荷状況を写真-9 に示す。

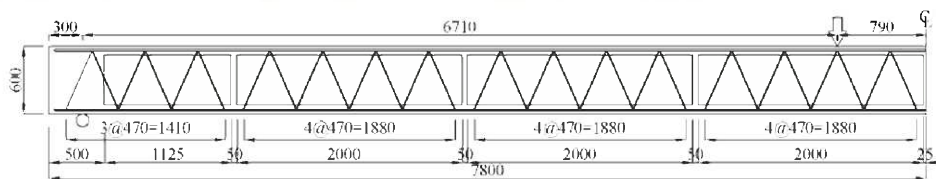


図-9 (i) 曲げ試験体 (unit:mm)

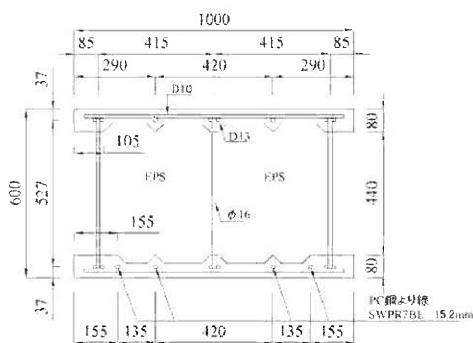


図-9 (ii) 試験体断面 (unit:mm)



写真-9 載荷試験状況

#### 4.1.2 (ii) 長支間 KSL タイプ曲げ試験結果

載荷開始から終局時までの支間中央における荷重とたわみの関係を図-10 に示す。

たわみの実測値とフレーム解析値を比較すると、長支間の KSL タイプはフレーム解析により引張鉄筋降伏荷重付近まで精度良く挙動を予測することが可能であった。

表-4 より算出した設計荷重相当より低い荷重レベルで隔壁付け根部分にひび割れが軸方向に発生した。これは、図-9 に示す様に隔壁部分と薄肉床版が垂直になっていることから応力集中が起きたと考えられる。従って、低荷重レベルで隔壁付け根に部分にひび割れを発生させないためにハンチ等を設けて応力緩和を図る必要がある。

ひずみゲージの位置、荷重とトラス筋のひずみの関係を図-11 に示す。ひずみゲージは隔壁を剛結としたフレーム解析結果から応力が卓越するトラス筋に貼り付けた。

まず、表-4 より算出した設計荷重相当の荷重において降伏や座屈するトラス筋は無かった。そして、設計荷重相当時のトラス筋ひずみのフレーム解析値は最大約 $-273 \times 10^{-6}$ (圧縮)と $276 \times 10^{-6}$ (引張)であり、実測ひずみはフレーム解析値とほぼ一致していた。このことから設計荷重相当時のトラス筋のひずみはフレーム解析で評価できると言える。

次に終局時のトラス筋に関して破壊と同時にトラス筋⑧が座屈し、更にひずみゲージを貼っていないトラス筋でも座屈は起こっていた。これは、図-10, 11 から解るように曲げひび割れの発生に共なって構造挙動、トラス筋のひずみ挙動が非線形的に変化していることから、曲げひび割れに発生により構造形態に変化が起こり、フレーム解析では表現出来ない応力がひずみゲージを貼っていないトラス筋に発生したためと推察される。

破壊状況は写真-11 のように支点から約 1.3m 付近でせん断破壊が起こった。この時の荷重は約 150kN であった。文献<sup>6)</sup>の終局荷重時の設計曲げモーメントから算出した荷重は約 117kN、設計せん断力から算出した荷重は約 210kN であり、実測値と比較すると終局時のせん断力を満たしていなかった。

前述の KS タイプの試験結果と比較すると、破壊形態が大きく異なっている。これは、KSL タイプはウェブを配置していないのでせん断抵抗が減少しせん断破壊に至ったと考えられる。

## 4.2 KS スラブせん断試験

### 4.2.1(i)短支間 KSL タイプせん断試験概要

図-12 に示す短いスパンの KSL タイプを製作しせん断性能の確認を行った。また、KSL のせん断性能は何か決め手となるかを確認した。試験状況を写真-12 に示す。なお、せん断試験体においてはトラス筋の性状を確認するために EPS を除去した。

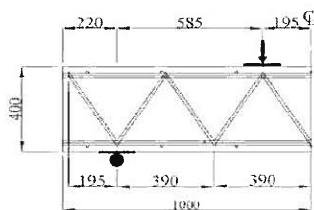


図-12 試験体概要 (unit:mm)

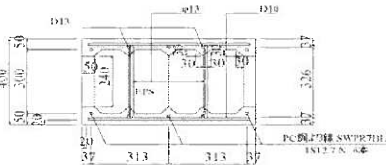


写真-12 試験状況

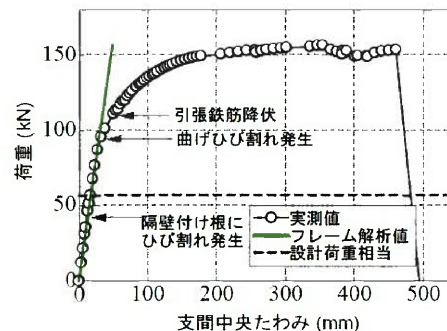


図-10 荷重とたわみ関係

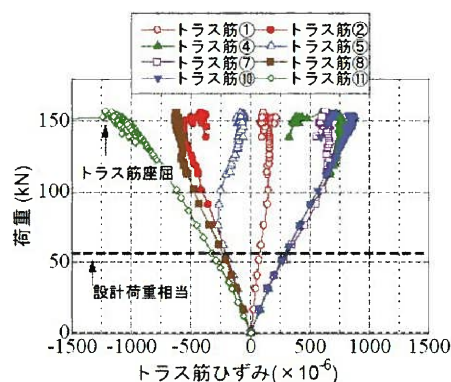


図-11 荷重とトラス筋のひずみ関係



写真-11 破壊状況

#### 4.2.1(ii)短支間 KSL タイプせん断試験結果

荷重と支間中央のたわみの関係を図-13 に示す。

たわみは終局に至るまでほぼ線形を保ったまま推移しており、曲げやせん断力によるひび割れがほとんど無かったことが考えられる。これは実験中に行った目視による観察の結果とも一致している。そしてフレーム解析による計算ではほぼ同等な値が得られた。

図-14 にトラス筋に貼り付けたひずみゲージ位置、荷重とトラス筋のひずみ関係を示す。トラス筋に関しても終局に至るまで線形を保って推移している。最終的には荷重 143kN において“トラス①”が座屈に至った(写真-13)。従って、KSL タイプのせん断性能はトラス筋の座屈が決め手と考えられる。

KS スラブにおけるトラス筋の細長比は限界細長比以下であり非弾性座屈領域にある。そして非弾性座屈に対する計算手法は非常に煩雑であり、また不確実な要素が多いことによるバラツキが大きいことが知られているので、実験結果から設計ではトラス筋の応力は終局時まで降伏点以下に制限すると決定した。

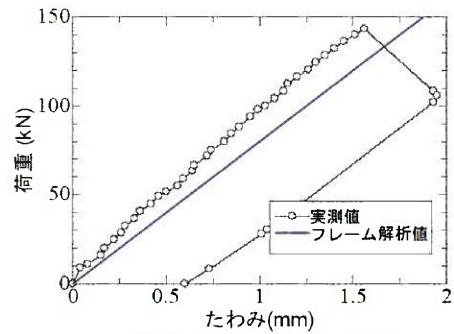


図-13 荷重とたわみ関係

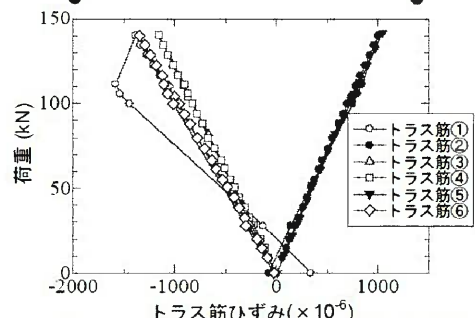
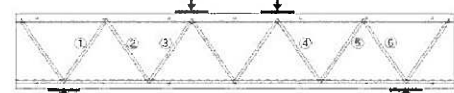


図-14 荷重とトラス筋のひずみの関係



写真-13 破壊状況

#### 4.2.2(i)長支間 KSL タイプせん断試験概要

前述の決定をもとに図-9 の断面を使用した図-15 に示すせん断試験体を製作してせん断性能、トラス筋の挙動の確認を再度行った。ここでもトラス筋の性状を確認するために EPS を除去した。載荷試験状況を写真-14 に示す。

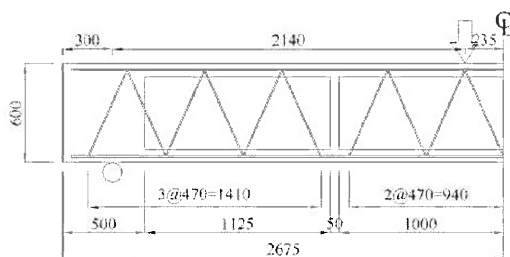


図-15 試験体概要 (unit:mm)



写真-14 試験状況

#### 4.2.2 (ii) 長支間 KSL タイプせん断試験結果

支間中央における荷重とたわみの関係を図-16 に示す。

荷重 90kN で隔壁付け根にひび割れが発生したが最大荷重まで大きな変化はなく、およそ荷重 140kN 付近までフレーム解析値とほぼ一致した。

図-17 にトラス筋に貼り付けたひずみゲージ位置、荷重とトラス筋のひずみの関係を示す。

まず、設計荷重相当において降伏や座屈するトラス筋は無かった。そして、設計荷重相当時のトラス筋ひずみのフレーム解析値は最大約 $-646 \times 10^{-6}$ (圧縮)と  $598 \times 10^{-6}$ (引張)であり、実測ひずみはほぼフレーム解析値と一致した。

次に終局時において荷重 181.2kN で載荷点下のトラス筋②が座屈を起こした。ここで、前述した様にトラス筋は終局時まで降伏点以下に制限するようにしていたが、トラス筋は降伏する前に座屈を起こす現象が起こった。この原因は偏心やプレストレス等の影響が考えられるが解明には至っていない。

写真-15 に破壊面の破壊状況を示す。破壊はトラス筋が降伏した後、下床版に斜めひび割れが発生した。



写真-15 破壊状況

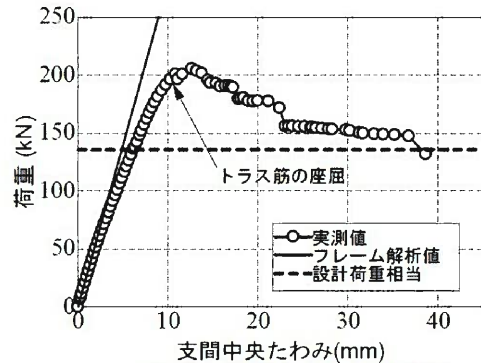


図-16 荷重とたわみの関係

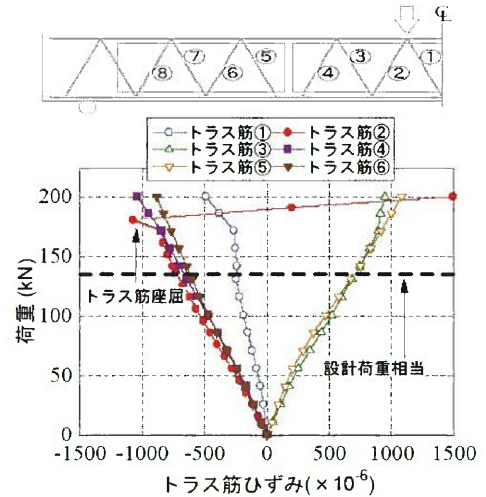


図-17 荷重とトラス筋のひずみ関係

#### 4.3 押抜きせん断試験

##### 4.3.1 押抜きせん断試験概要

局所的な力が作用した場合の薄肉床版の性能確認として図-18 に示す試験体を製作し押抜きせん断試験を行った。また、EPSの有無による構造性能の違いも確認した。

荷重は支圧板(50×50mm)を介して与えた。載荷試験状況を写真-16 に示す。

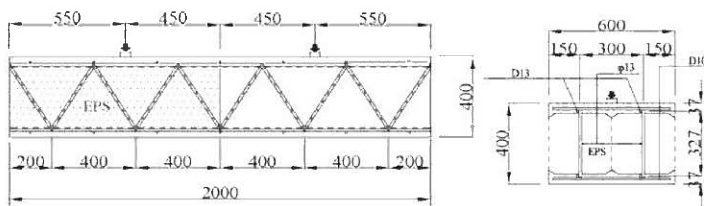


図-18 試験体概要



写真-16 試験状況

#### 4.3.2 押抜きせん断試験結果

載荷点中央変位を図-19に、破壊状況を写真-17に示す。なお図-19中には文献<sup>iii</sup>を参照して算出した設計耐力も併記している。

図より荷重約40kNまでEPSの有無によることなくほぼ同様な経過を辿り、これ以降EPS有りでは依然として荷重の伸びが見られ、最大荷重を比較するとEPSなしの場合約50kN、EPSありの場合約55kNと約1割程度の差が現れた。

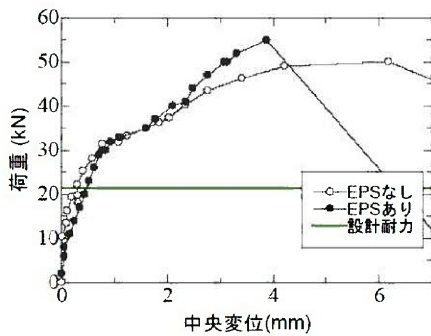


図-19 荷重と変位関係



写真-17 破壊状況 (EPSなし)

## 5 結論

本実験結果から得られた結論を以下に記す。

1. PFBC 灰をセメントの30%置換することで収縮が低減され、薄肉床版にひび割れ等は見られなかった。
2. KS タイプは構造性能に関してウェブが支配的であった。
3. KSL タイプの場合、低荷重レベルで隔壁付け根にひび割れを発生させないためにハンチを設ける等の改善が必要である。
4. 構造挙動に関して KS タイプはトラス筋を無視した RC 計算、KSL タイプはフレーム解析でおよそ評価・再現できることが解かった。
5. KSL タイプの実測破壊荷重は、文献<sup>iv</sup>を参考に算出した終局荷重以下であった。実用化には更に検証が必要であると考えられる。また、設計でのトラス筋の照査に関しては安全係数を掛ける等の処置を施す必要がある。
6. 押抜きせん断耐力は設計計算による耐力以上を有し、EPS が押抜きせん断耐力を向上させることが解かった。

## 6 おわりに

2006年7月に島根県の新技术活用支援制度「しまね・ハツ・建設ブランド」に登録されフィールド実証工事対象指定となりました。官の公認を頂きましたので今後更に技術営業に力を注いでいく所存であります。

最後になりましたが、KSスラブの製作・載荷試験にご協力頂いた関係各位に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- <sup>i</sup> 溝垣道男：小川尻橋における産業廃棄物有効活用，極東工業技報 No22，2005.10.31
- <sup>ii</sup> 日本工業標準調査会 JIS A 5373
- <sup>iii</sup> (社)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
- <sup>iv</sup> (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成14年3月



トラス鉄筋を用いた軽量スラブの力学特性

極東工業（株） 正会員 ○谷口 義則  
 極東工業（株） 正会員 河金 甲  
 極東工業（株） 藤田 修  
 積水化成工業（株） 正会員 前 育弘

1. はじめに

現在、歩道橋など比較的小さな荷重に対応するKSスラブの開発を行っている。

KSスラブの基本構造は図-1に示すように厚さ約5cm程度のコンクリート版を上下に配置し、これらをトラス筋によって一体化した構造であり、以下のような特徴を有する。

- 超薄肉のコンクリート断面にすることで従来のPC桁に対して約30%以上重量を軽減。（歩道橋での比較）
- 密実なコンクリートを作るため、混和材にPFBC灰などの産業副産物を積極的に活用することにより環境負荷を低減。

KSスラブはこれまでに上下床版にモルタルを使用して、耐荷特性の確認を行っているが<sup>1)</sup>、より適用用途の拡大を目指すため上下の版にコンクリートを採用して開発を進めている。本稿ではコンクリート製のKSスラブの耐荷性能を確認するために行った曲げ載荷実験、せん断載荷実験および押抜きせん断実験の結果を紹介するものとする。

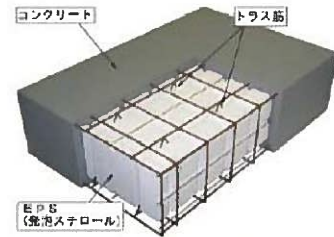


図-1 KSスラブの概念図

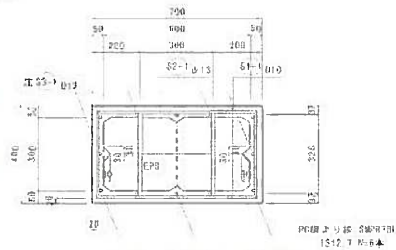


図-2 試験体の断面図

2. 曲げ載荷試験

2.1 実験の概要

曲げ載荷試験の試験体の断面図を図-2に、実験の概要図を図-3に示す。

2.2 結果

荷重と支間中央のたわみの関係を図-4に示す。

たわみは全断面有効時の計算値と同等の値を示しながら推移し、約140kNにおいてKSスラブ下面でのひびわれの発生と同時に計算値から徐々に離れていることがわかる。その後、約300kNで最大荷重に達したあとも急激な荷重の減少を見ることなく上側の版のコンクリートの圧壊により試験体は破壊に至った。最大値は荷重296kN、たわみ50mmであった。

弾性範囲内での計算結果との比較では、トラスを無視した計算値で実験値によく対応していることから、断面に対して中空断面が大きいにもかかわらず一体性を保っていたと思われる。一方、フレーム解析の結果が実験に対して離れており、その原因としては、計算時に無視したウェブの影響が非常に大きかったことが予想される。

一方、終局時ではいずれの計算値でも精度良かった。フレーム解析とトラスを無視した計算値との差は約40kN程度あるが、この差がトラスを配置していることによる影響と考えられる。

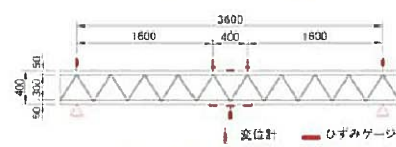


図-3 曲げ載荷試験の概要図

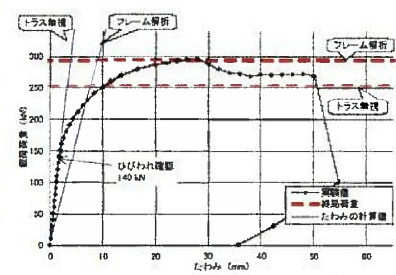


図-4 荷重と支間中央のたわみの関係

3. せん断載荷試験

3.1 実験の概要

せん断載荷試験の試験体の断面図を図-5に、実験の概要図を図-6に示す。

キーワード トラス筋、軽量スラブ、曲げ特性、せん断特性、押抜きせん断  
 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） TEL082-261-1204

3.2 結果

荷重と支間中央のたわみの関係を図-7 にトラス鉄筋のひずみの関係を図-8 に示す。

図-7 によるとたわみは終局に至るまでほぼ線形を保っており、目視による観察からもひびわれは確認されていない。計算値との比較では曲げ載荷の時とは異なりフレーム解析による結果に近くなっている。これはコンクリートウェブを無くしたことで全ての伝達力をトラス鉄筋が受け持つトラス構造になっていると言える。実際にはこうしたことを考慮し計算手法およびコンクリートウェブやトラス鉄筋の配置など吟味する必要がある。さらに、図-8 よりトラス鉄筋のひずみにおいても終局に至るまで線形が保たれていた。このことは終局に至るまでトラスの格点には異常が見られなかったことを意味している。最終的には「トラス-1」が降伏点に達したことによる変形の増大により実験を終了している。

4. 押抜きせん断試験

4.1 実験の概要

実験は図-9 に示すように試験体の半分のEPSを除去しEPSの有無による耐力の違いを検査している。荷重位置は鉄筋間隔の中央とし、荷重版には50×50mmの鉄板を使用した。

4.2 結果

荷重点での変位を図-10 に示す。

図-10によると設計耐力付近である約25kNでひびわれが発生したと思われる亀裂音が確認されており、さらに約30kNを超えたところから一時変位の伸びに対して荷重の増加が停滞し、変位が20mm付近で再度荷重の増加が始まっている。その後EPSの有無により曲線の勾配に差が見られ始め最終的にはEPS有りでは55kN、EPS無しでは50kNで破壊に至った。

設計値(27.7kN)との比はEPS有で1.99、EPS無では1.81となっており、幾分EPSを内包していることによる効果はあるものと思われる。

5. まとめ

KS スラブは現在までのところ歩道橋への適用に対して整理検討を進めている。今後、コンクリートウェブを配置しないものやT-10程度の輪荷重への対応を目指しており、また超軽量である利点を生かして浮体構造物など多方面への適用も視野に入れて開発を進めている。

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回年次学術講演会講演概要集，2005.9

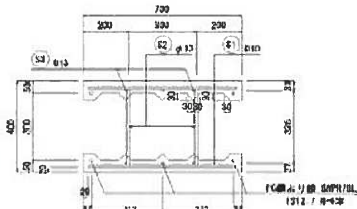


図-5 試験体の断面図

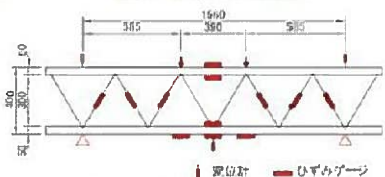


図-6 せん断載荷試験の概要図

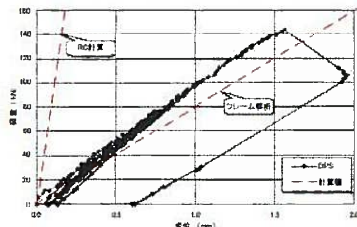


図-7 荷重と支間中央のたわみの関係

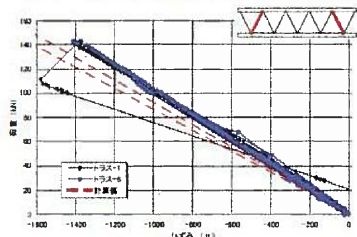


図-8 荷重とトラス鉄筋のひずみの関係

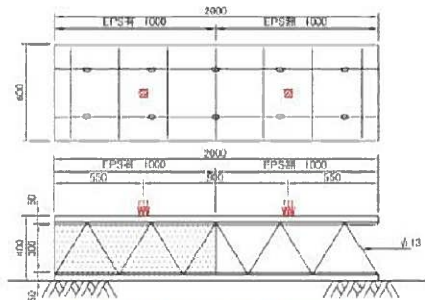


図-9 押抜きせん断試験の概要図

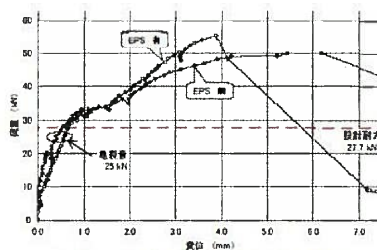


図-10 荷重と荷重点の変位の関係