

# クイックチェンジ工法の開発

## The Development of Quick Change Method

福田 尚弘\*1 宇都本 彰夫\*1 永井 久徳\*1  
Naohiro Fukuda Akio Utsumoto Hisanori Nagai  
内田 博之\*1 為石 昌宏\*1  
Hiroyuki Uchida Masahiro Tameishi

### 要旨

近年、交通量の多い高速道路をはじめとする全国の橋梁において、RC床版の疲労損傷が深刻化しており、損傷の著しいものについては床版の取替えが実施されている。当社では、これまでに上下鋼板と形鋼からなる鋼殻部材に軽量高流動コンクリートを現地で充填するサンドイッチ型複合床版をRC床版の取替えに適用するクイックチェンジ工法を開発してきた。サンドイッチ型複合床版は上下に鋼板を有しているため高い剛性が期待できる反面、プレキャストPC床版や下鋼板のみを有する合成床版と比べ床版重量が重くなるのが短所である。そこで、著者らはサンドイッチ型複合床版に充填しても重量の増加を小さくでき、かつ、鋼殻内に充填するのに十分なフレッシュ性状と強度を有する超軽量高流動コンクリートを開発し、クイックチェンジ工法に適用することで床版の軽量化を実現した。

本報告では、開発した超軽量高流動コンクリートの開発概要、特性試験、頭付きスタッドの押抜き試験および軽量化したサンドイッチ型複合床版の静的載荷試験の結果について報告する。

キーワード：サンドイッチ型複合床版、超軽量高流動コンクリート、EPSビーズ、超軽量粗骨材

## 1. はじめに

近年、交通量の多い高速道路をはじめとする全国の橋梁において、RC床版の損傷劣化が深刻化している。これまで床版増厚工法などの対応策が講じられてきたが、再劣化も生じており、将来に向けて良質なインフラをストックしていくためには、RC床版の更新が必要となってきた。更新技術には、高耐久性に加えて軽量化による下部工への負担低減や、さらに、特に都市部においては工事規制に伴う社会的影響も無視することができないため、工期短縮が可能な急速施工が求められている。

当社と株式会社横河NSエンジニアリングは、工場製作する上下2枚の鋼板と形鋼から構成される床版パネルを、既設床版撤去後の桁上に敷設し、パネル同士および桁間との連結を行った後、軽量高流動コンクリート（軽量1種コンクリート）を充填し、サンドイッチ型複合床版とする「クイックチェンジ工法」を共同開発してきた（図1、2）。サンドイッチ型複合床版は、上下に鋼板を有しているため高い剛性が期待できる反面、プレキャストPC床版や下鋼板のみを有する合成床版と比べ床版重量が重くなるのが短所である。そのため、床版取替え後の重量増加によって生じる下部工への負荷を軽減するために、床版の軽量化が不可欠であると考えられた。

そこで、著者らは床版の重量を低減でき、かつ、鋼殻内

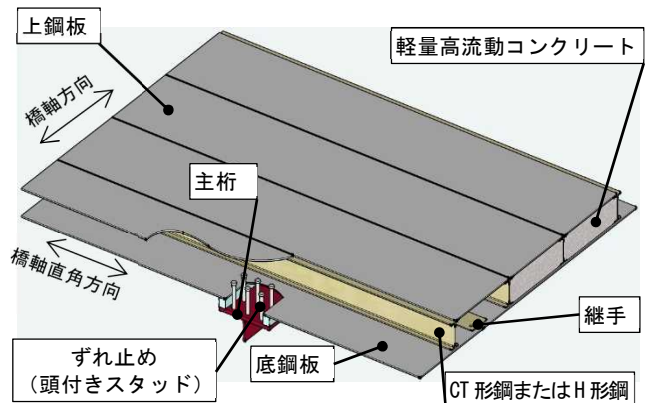
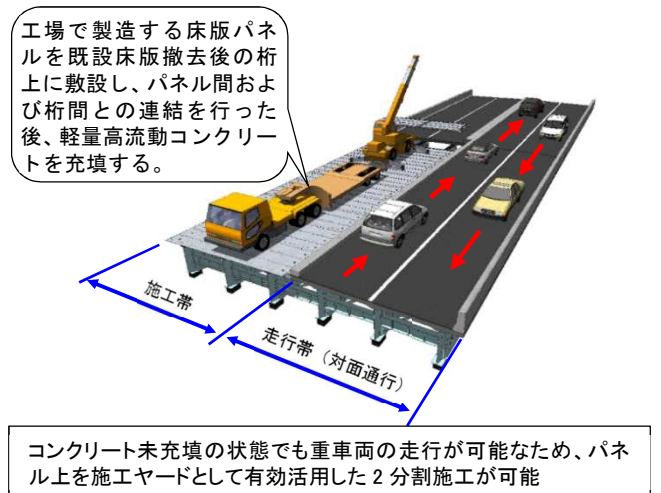


図1 クイックチェンジ工法の構造概要



コンクリート未充填の状態でも重車両の走行が可能のため、パネル上を施工ヤードとして有効活用した2分割施工が可能

図2 クイックチェンジ工法の概要

\*1 技術本部 土木技術部

に充填するのに十分なフレッシュ性状と強度を有する超軽量高流動コンクリートを開発・適用することで本工法の床版の軽量化を実現した。

本報告では、開発した超軽量高流動コンクリートの概要、特性試験、頭付きスタッドの押抜き試験および本コンクリートを充填することで軽量化したサンドイッチ型複合床版の静的載荷試験の結果について報告する。

## 2. 超軽量高流動コンクリートの開発

### 2.1 充填コンクリートの軽量化

クイックチェンジ工法では、充填コンクリートには軽量1種コンクリートを使用していた。今回床版重量の低減を図るため、更に軽量のコンクリートを開発することとした。充填コンクリートの軽量化においては、今後の重交通道路での取替え等、急速施工のニーズにも対応できるように、現場打ちのみではなくプレキャスト（工場打設）施工をも見据えて開発した。

本開発においては、人工軽量骨材を粗骨材のみでなく細骨材にも用いた軽量2種コンクリートとするだけでは不十分であると考えられたことから、発泡ポリスチレンビーズ（以下、EPSビーズと称す）や超軽量粗骨材を用いることにより更に軽量化を実施することとした。

#### 2.1.1 現場打ち用配合

現場打ち用配合は、軽量2種コンクリートの細骨材の一部を直径約1mmのEPSビーズ（写真1）によって置換することで、軽量1種コンクリートと比較して18%程度の軽量化を図った。EPSビーズは以下に示す特徴を有する。

- ・軽量性に優れる（密度0.02～0.10t/m<sup>3</sup>）
- ・耐吸水性が高い（含水量0.05vol%以下）
- ・真球状態で混練時の分散性が良い

なお、後述する超軽量粗骨材（低含水量品）は、プレウェットングによる吸水が行われていないことから、現場でポンプ圧送すると、骨材が吸水してしまい品質低下や配管閉塞を生じる懸念があるため、現場打ち用配合には使用しなかった。

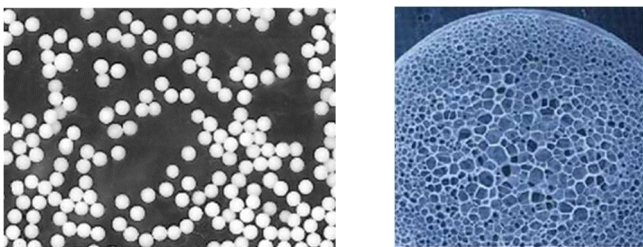


写真1 EPSビーズ（右は拡大写真）

#### 2.1.2 プレキャスト用配合

プレキャスト用配合は、軽量2種コンクリートの粗骨材に超軽量粗骨材（低含水量品）（写真2）を使用し、軽量1種コンクリートと比較して25%程度の軽量化を図った。



写真2 超軽量粗骨材（低含水量品）

超軽量粗骨材は、通常の軽量粗骨材に比べて密度が約90%と小さく、プレウェットングによる吸水を行っていない状態で使用することで、密度がさらに小さくなり表乾密度1.4g/cm<sup>3</sup>に対して絶乾密度1.07g/cm<sup>3</sup>となる。本工法において、プレキャスト用充填コンクリートの打設は工場内等でパネルを立てた状態でのバケツ打設等を想定しており、コンクリートポンプは使用しないため前述の懸念はなく、超軽量粗骨材（低含水量品）の使用は可能であると考えている。

## 2.2 配合試験

### 2.2.1 配合条件

表1に配合条件を示す。上鋼板を有するサンドイッチ型複合床版では、その高い剛性を生かし合成桁構造や少数主桁構造のような長支間の場合でも構造が成立するように、充填コンクリートの設計基準強度を通常の合成床版よりも大きい35N/mm<sup>2</sup>（通常の合成床版は30N/mm<sup>2</sup>）とすることが多い。したがって、本開発においても設計基準強度は35N/mm<sup>2</sup>に設定した。単位体積重量は、サンドイッチ型複合床版に充填したときの床版重量がPCプレキャスト床版と同等以下となるように、17kN/m<sup>3</sup>程度以下とした。自己充填性のランクは、コンクリート標準示方書において「鋼材の最小あきが60～200mm程度の鉄筋コンクリート構造物または部材に自重のみで均質に充填できるレベル」と規定されているランク2に設定した。スランプフローは所要の流動性と材料分離抵抗性を確保できるように600±50mmとした。空気量は通常の軽量コンクリートと同等の5.0±1.5%を目標とした。

表1 配合条件

項目		条件
設計基準強度		35N/mm <sup>2</sup>
単位体積重量	現場打ち用	17kN/m <sup>3</sup> 程度
	プレキャスト用	16kN/m <sup>3</sup> 程度
スランプフロー		600±50mm
空気量		5±1.5%
自己充填性		ランク2

### 2.2.2 使用材料および配合

表2に配合一覧を、表3に使用材料の一覧を示す。

表 2 配合一覧

配合種別	No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	
				W	C	EB	S1	S2	G1		G2
現場打ち用配合 [軽量 2 種+ビーズ]	1	31.0	42.1	175	565	1,699	393	-	563	-	1,698
	2	35.0	44.0	175	500	1,102	461	-	563	-	1,700
	3	39.0	45.4	175	449	0,756	510	-	563	-	1,698
プレキャスト用配合 [軽量 2 種 (超軽量粗骨材 (低含水品))]	1	31.0	45.8	155	500	-	-	540	-	385	1,580
	2	35.0	47.3	155	443	-	-	573	-	385	1,556
	3	39.0	48.4	155	397	-	-	599	-	385	1,536

表 3 使用材料一覧

項目	記号	種類	物性等
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	軽量細骨材 (A 社製)	表乾密度 1.92g/cm <sup>3</sup>
	S2	軽量細骨材 (B 社製)	表乾密度 1.86g/cm <sup>3</sup>
EPS ビーズ	EB	—	発泡倍率 45 倍 密度 0.0376g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	軽量粗骨材	表乾密度 1.66g/cm <sup>3</sup>
	G2	超軽量 G (低含水)	絶乾密度 1.07g/cm <sup>3</sup>
混和剤	-	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸 エーテル系化合物

表 4 試験項目および試験方法一覧

試験項目	試験方法
スランプフロー試験	JIS A 1150 「コンクリートのスランプフロー試験方法」
500mm フロー到達時間試験	JIS A 1150 附属書 JA 「コンクリートの 500mm フロー到達時間の測定方法」
空気量試験	JIS A 1116 「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法」
充填性試験	JSCE-F 511 「高流動コンクリートの充填試験方法 (案)」
圧縮強度試験	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」
静弾性係数試験	JIS A 1149 「コンクリートの静弾性係数試験方法」
割裂引張強度試験	JIS A 1113 「コンクリートの割裂引張強度試験方法」

2.2.3 試験方法

図 3 に配合試験実施フローを示す。各配合において単位水量を一定とした水セメント比 31.0%、35.0%、39.0%の 3 配合を設定し、所要のフレッシュ性状が得られる混和剤の添加量を定めた。3 水準の水セメント比で練り上げたコンクリートで作製した供試体について圧縮強度試験、静弾性係数試験および割裂引張強度試験を実施した。圧縮強度試験によって得られたセメント水比と圧縮強度の関係から、設計基準強度が確保できる水セメント比を算定し、充填コンクリートの配合を決定した。なお、フレッシュ性状試験、各種強度試験および静弾性係数試験は表 4 に示す各規格の試験方法に準拠して実施した。

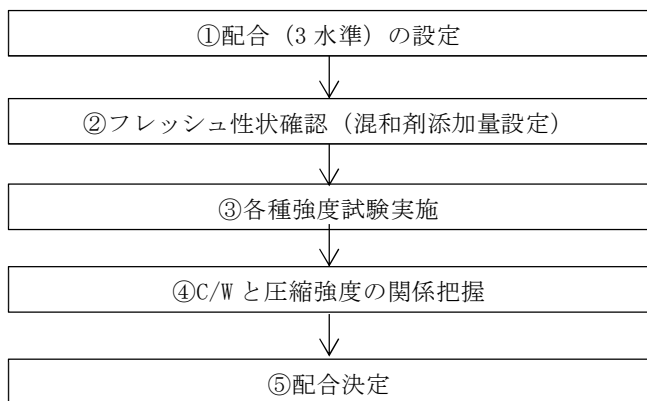
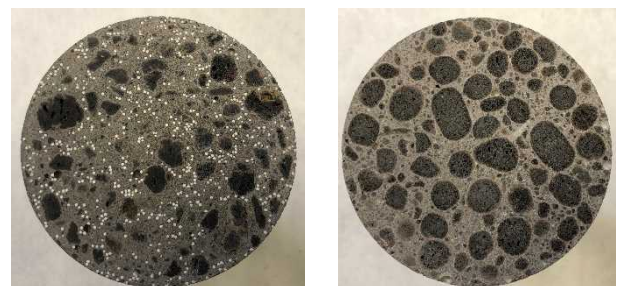


図 3 配合試験実施フロー

2.2.4 試験結果

スランプフロー試験、500mm フロー到達時間試験、空気量試験および充填性試験では、現場打ち用配合とプレキャスト用配合ともに目標値を満足する結果が得られた。また、フレッシュ時の目視および写真 3 に示すテストピースの断面観察により、材料の分離や偏りが生じていないことを確認した。

図 4 に圧縮強度とセメント水比との関係を示す。現場打ち用配合とプレキャスト用配合ともにセメント水比の増加に伴い、圧縮強度も増加する傾向の結果が得られた。また、両配合ともに設計基準強度の 35N/mm<sup>2</sup> 以上の強度発現を確



(現場打ち用配合) (プレキャスト用配合)  
写真 3 テストピース断面

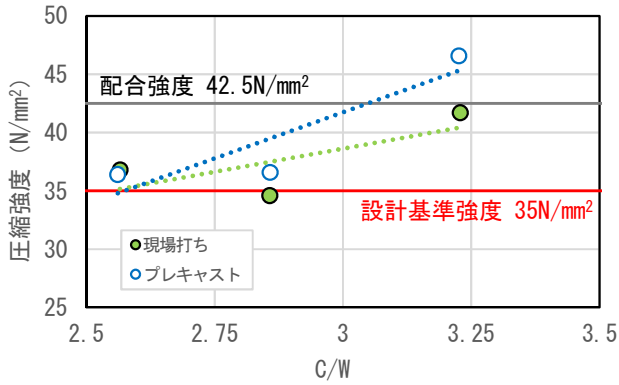


図4 圧縮強度-セメント水比関係

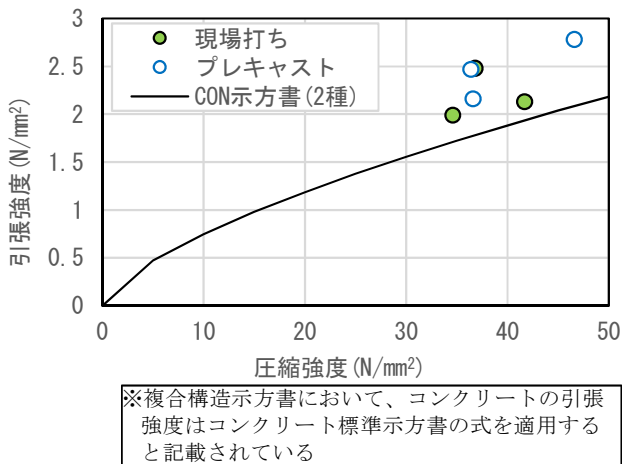


図5 引張強度-圧縮強度関係

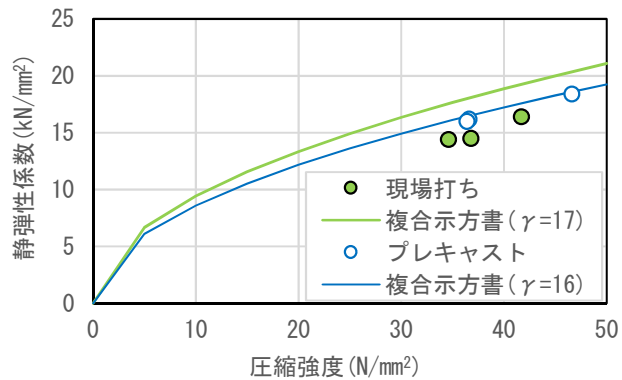


図6 静弾性係数-圧縮強度関係

認した。

図5に割裂引張強度と圧縮強度の関係を示す。コンクリート標準示方書（設計編）では、軽量2種コンクリートの

圧縮強度に対する引張強度の値は、普通コンクリートの70%程度とされており、全ての配合においてこれを上回る結果が得られた。

図6に静弾性係数と圧縮強度との関係を示す。現場打ち用配合とプレキャスト用配合ともに、圧縮強度に対する静弾性係数の値は複合構造標準示方書（設計編）の示す式（ $\gamma=16$  または  $17\text{kN/m}^3$ ）と同等あるいは下回る結果となった。特に、現場打ち用配合では全ての供試体で下回っており、EPS ビーズを混合することで静弾性係数が通常の軽量コンクリートよりも低下することを確認した。以上のように、超軽量高流動コンクリートの静弾性係数は通常の軽量コンクリートの場合に比べ小さくなる傾向にあることから、その影響を考慮して各種パラメータを設定し、設計する必要があると考えられる。

表5に本試験によって決定した配合を示す。本開発においては強度の変動係数を10%と想定し、割増係数を1.214、配合強度を  $42.5\text{N/mm}^2 (=1.214 \times 35\text{N/mm}^2)$  として配合を決定した。なお、次章以降において、決定配合と軽量1種コンクリート（以下、標準配合と称す）の試験結果との比較を示す場合があるが、表5には比較対象の標準配合の配合も併せて示した。

### 3. 特性試験

決定した配合のコンクリートに対して、サンドイッチ型複合床版の充填コンクリートに適用するにあたり、ブリーディング、変形特性、長期耐久性および加熱の影響について、各種試験を実施した。

#### 3.1 ブリーディング

ブリーディングの発生が大きい場合、鋼殻とコンクリートとの間に空隙を生じさせる原因となることもあるため JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠してブリーディング試験を実施した。

ブリーディング試験の結果を表6に示す。ブリーディング率は、現場打ち用配合 0.00%、プレキャスト用配合 0.04%、標準配合 0.64%という結果になった。現場打ち用配合、プ

表5 決定配合

配合種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)								単位容積質量 (kg/m³)
			W	C	EB	S1	S2	S3	G1	G2	
現場打ち用配合 [軽量2種+ビーズ]	28.7	40.7	175	610	2.226	339	-	-	573	-	1,699
プレキャスト用配合 [軽量2種 {超軽量粗骨材 (低含水品)}]	32.8	46.5	155	473	-	-	558	-	-	385	1,571
標準配合 [軽量1種]	42.3	51.2	175	414	-	-	-	861	512	-	1,962

※S3は混合砕砂で表乾密度は  $2.61\text{g/cm}^3$  である



表6 ブリーディング試験結果

配合	ブリーディング率 (%)
現場打ち用配合	0.00
プレキャスト用配合	0.04
標準配合	0.64

レキャスト用配合ともに、標準配合に比べブリーディングが極めて小さいという結果になった。これは標準配合に比べ両者の水セメント比が小さいことによるものと考えられる。また、プレキャスト用配合のブリーディング率を実施工において0.00%とする場合は、別途ブリーディング低減剤の添加等の対策を講じる必要がある。

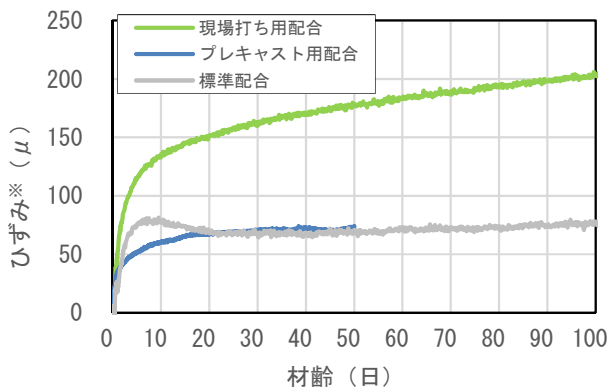
### 3.2 変形特性

#### 3.2.1 自己収縮試験

充填コンクリートに生じる自己収縮が大きい場合、鋼殻とコンクリートとの間に空隙を生じさせる原因となることもある。そのため、JCI-SAS-2「コンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法」に準拠して自己収縮試験を実施した。

図7に自己収縮試験結果を示す。全配合の供試体において収縮ではなく膨張するという結果になった。経過日数91日（プレキャスト用配合は50日）におけるひずみは、現場打ち用配合で199 $\mu$ 、プレキャスト用配合で74 $\mu$ 、標準配合74 $\mu$ となった。

人工軽量骨材コンクリートは軽量骨材中に多量の水を含んでおり、この骨材中の含水が水和反応時にセメントペースト部へ供給され、自己乾燥を低減する効果（セルフキュアリング効果）や自己収縮の主要因の一つとされる毛管圧力の上昇抑制効果が期待できる。そのため、自己収縮は普通コンクリートに比べ小さい、あるいは収縮ではなく膨張する傾向があるとされている<sup>1)</sup>。本試験においても、同様の効果によって全ての試験ケースにおいて膨張傾向を示す



※ひずみは、膨張をプラス、収縮をマイナスとする

図7 自己収縮試験結果

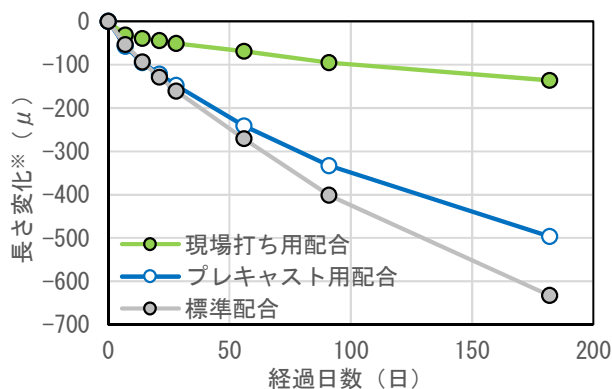
結果が得られたと考えられる。

以上のことから、本コンクリートの適用において、自己収縮が問題になることはないと考えられる。

#### 3.2.2 乾燥収縮（長さ変化）試験

サンドイッチ型複合床版の充填コンクリートは、周囲を鋼殻で覆われているため厳しい乾燥環境に曝されることはないと考えられるが、コンクリート単体での収縮特性を確認するため、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に準拠して長さ変化試験を実施した。

図8に長さ変化試験の結果を示す。経過日数182日の時点での長さ変化は、現場打ち用配合-136 $\mu$ 、プレキャスト用配合-496 $\mu$ 、標準配合-633 $\mu$ となった。これらの結果は一般的なコンクリート（平均値:679 $\mu$ 、分布幅:300~1,200 $\mu$ ）<sup>2)</sup>と比較しても同程度かあるいは小さい値であり、本コンクリートの適用において、乾燥収縮が問題になることはないと考えられる。



※長さ変化は、膨張をプラス、収縮をマイナスとする

図8 長さ変化試験結果

### 3.3 長期耐久性

長期耐久性の確認試験として、凍結融解試験、促進中性化試験および塩分浸透性試験を実施した。

#### 3.3.1 凍結融解試験

軽量コンクリートは、一般に、人工軽量骨材が多数の空隙を有し、その空隙中に多量の水を含んでいるため、普通コンクリートに比べて凍結融解抵抗性が小さいといわれている<sup>3)</sup>。そこで、超軽量高流動コンクリートの凍結融解抵抗性を確認するため、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠して凍結融解試験を実施した。

図9に相対動弾性係数の変化、図10に各配合の耐久性指数を示す。現場打ち用配合と標準配合は初期のサイクル数において相対動弾性係数が大きく低下し、30サイクル経過時点で50%未満になる結果となった。プレキャスト用配合は300サイクルにおいて相対動弾性係数が88%であった。

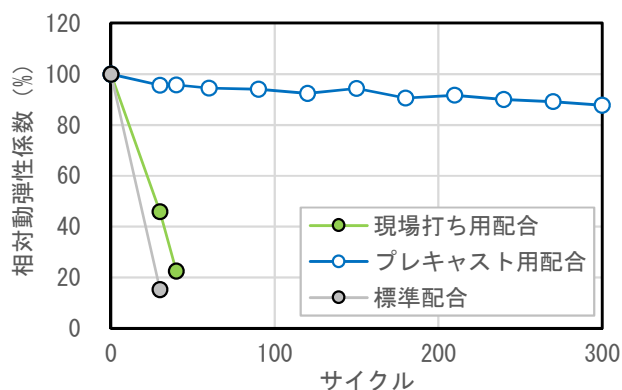


図9 相対動弾性係数の変化

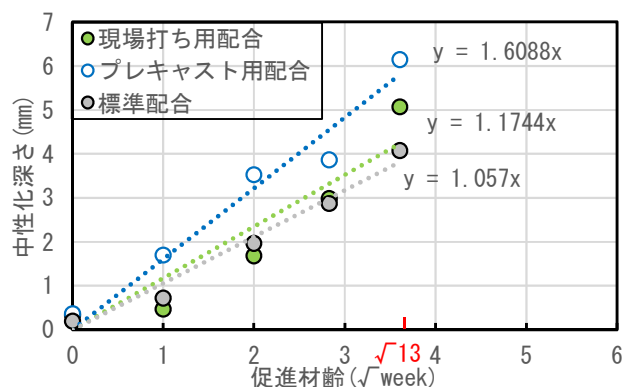


図11 促進中性化試験結果

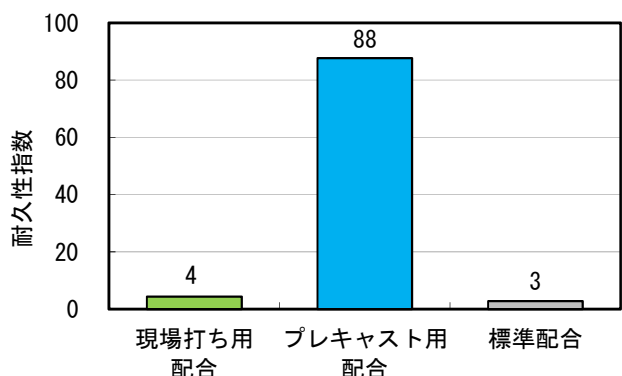


図10 耐久性指数

前述の通り軽量コンクリートは凍結融解抵抗性が小さいとされているが、本試験の現場打ち用配合と標準配合において同様の結果となった。

一方、プレキャスト用配合は他の2配合に比べ耐久性指数が高いという結果が得られた。これは、プレキャスト用配合に使用した人工軽量骨材が低含水状態であり、骨材中にあまり水を含んでいなかったため凍結融解抵抗性が高かったと考えられる。

以上のことから、本コンクリートを寒冷地に適用するには、通常の軽量コンクリートと同様にその適用性について十分な検討を必要とすると考えられる。

### 3.3.2 促進中性化試験

サンドイッチ型複合床版の充填コンクリートは、周囲を鋼殻に覆われているため、中性化は進行しにくいと考えられるが、コンクリート単体での抵抗性を確認するため、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して促進中性化試験を実施した。

図11に促進中性化試験結果を示す。中性化深さはプレキャスト用配合が最も大きく、促進材齢13週において6.1mmであった。標準配合は4.1mm、現場打ち用配合は5.1mmであった。また、中性化速度係数は現場打ち用配合は1.174mm/√week、プレキャスト用配合は1.609mm/√week、標準配合は1.057mm/√weekとなった。後述する塩分浸透性

試験と同様に、水セメント比が小さい超軽量高流動コンクリートの方が標準配合に比べ中性化抵抗性が大きくなると考えていたが、本試験ではそのような結果にはならなかった。ただし、これらの結果から、田沼らの報告<sup>4)</sup>を参考に中性化速度係数比(促進中性化試験による中性化速度係数に対する自然環境の中性化速度係数の比)を0.16として自然環境における100年後の中性化深さを算出すると、現場打ち用配合13.5mm、プレキャスト用配合18.6mm、標準配合12.2mmと非常に小さいことから、本コンクリートの適用において中性化が問題になることはないと考えられる。

### 3.3.3 塩分浸透性試験

サンドイッチ型複合床版の充填コンクリートは、周囲を鋼殻に覆われているため、塩害による劣化は生じないと考えられるが、コンクリート単体での抵抗性を確認するため塩分浸透性試験を実施した。

塩分浸透性試験は、複合サイクル試験機を用いて表7に示す条件で塩乾湿サイクルを繰返して実施した。噴霧溶液には5%塩化ナトリウム水溶液を用いた。各サイクル終了後、供試体を縦方向に2分割した後に断面に0.1N硝酸銀水溶液を噴霧し塩分浸透深さをノギスによって測定した。

図12に塩分浸透性試験結果を示す。全ての配合の供試体において、試験サイクルの増加に伴って塩分浸透深さが増

表7 塩分浸透性試験条件

試験方法	JIS K 5600
供試体形状・寸法	φ100×h200
供試体数	1本/サイクル×4サイクル/配合 =4本/配合
試験条件	サイクル開始材齢：56日以降 塩分浸透深さ測定サイクル： 12, 45, 135, 225サイクル 塩乾湿サイクル： 塩水噴霧(2時間, 35±1℃) →乾燥(4時間, 60±1℃, 20~30%RH) →湿潤(2時間, 50±1℃, 95%RH以上)

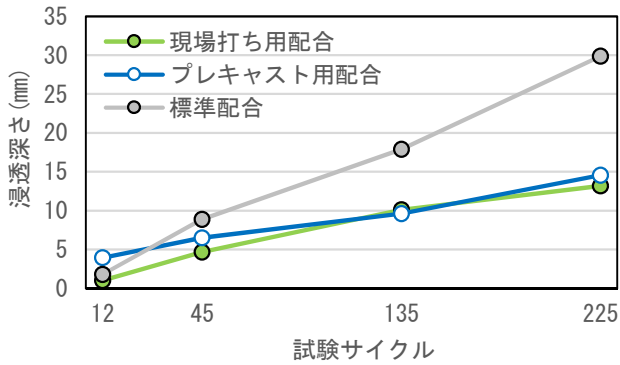


図 12 塩分浸透性試験結果

加する結果となった。浸透深さは標準配合が最も大きく、225 サイクル後では現場打ち用配合やプレキャスト用配合に比べて浸透深さは 2 倍程度であった。この原因のひとつとして、現場打ち用配合およびプレキャスト用配合の水セメント比が標準配合の水セメント比に比べ小さく緻密であったことが考えられる。

超軽量高流動コンクリートには、EPS ビーズおよび超軽量粗骨材を使用しているため塩分浸透抵抗性が低下することも懸念されたが、塩分浸透抵抗性の指標である浸透深さが標準配合に比べ約半分と小さいことから、本コンクリートの適用において、塩分浸透性が問題になることはないと考えられる。

### 3.4 加熱の影響

サンドイッチ型複合床版の充填コンクリートは、アスファルト舗装舗設時に 150℃程度の比較的高い温度に曝される。また、火災発生時にはその発生状況や規模によって温度や暴露時間が大きく異なるものの、高温の環境下に曝される場合がある。

クイックチェンジ工法の充填コンクリートのうち、現場打ち用配合のコンクリートは軽量化のために EPS ビーズを混合している。この EPS ビーズは 100℃程度の温度で溶融するため、コンクリートが高い温度に曝された際にビーズが溶けることで、コンクリート内部に空隙が生じることとなる。本試験では、現場打ち用配合コンクリートが加熱を受け、EPS ビーズが溶けた場合の力学的性質を確認することを目的に圧縮強度と静弾性係数を確認した。

#### 3.4.1 加熱方法

供試体は直径 10cm、高さ 20cm の円柱供試体とし、加熱は小型乾燥炉で図 13 の加熱パターンに示す方法で実施した。加熱開始材齢は 56 日以降とし、加熱時の供試体は加熱中の水分逸散を認めるアンシール状態とした。加熱温度・時間については、以下に示す条件から表 8 のように設定した。

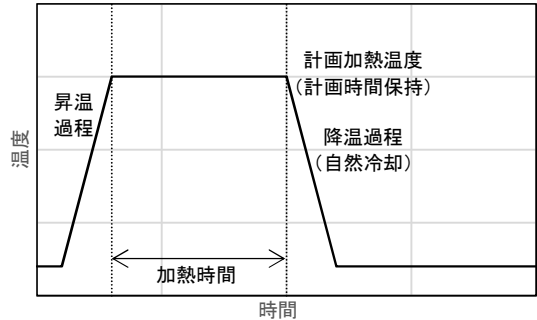


図 13 加熱パターン

表 8 加熱条件

計画加熱温度 (2 水準)	加熱時間 (2 水準)
150℃	2 時間
	7 時間
200℃	2 時間
	7 時間

- ・実橋でのグースアスファルト施工時の鋼床版デッキプレート温度測定実績 (100~150℃、1~2 時間程度)<sup>5)</sup>
- ・乾燥炉の設定温度の上限値 (200℃)
- ・供試体中心が加熱温度まで上昇する時間 (7 時間程度：温度解析によって推定)

なお、加熱の有無の影響を確認するため、非加熱の供試体を対象とした試験も合わせて実施した。

#### 3.4.2 圧縮強度・静弾性係数試験

圧縮強度・静弾性係数試験は、加熱後に常温まで自然冷却した供試体に対して、それぞれ JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」および JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して実施した。なお、供試体内の EPS ビーズは、圧縮強度・静弾性係数試験終了後の供試体破断面を目視確認したところ残存が確認できなかったことから、加熱によって溶融したものと考えられる。

表 9 に加熱の影響を受けたコンクリートの圧縮強度・静弾性係数試験結果の一覧を示す。

圧縮強度は、加熱温度 200℃、加熱時間 7 時間のケースでは、非加熱のケースに対して 1.03 倍と大きくなったが、それ以外の条件では非加熱のケースに対して 0.87~0.96 倍と小さくなった。一般に加熱温度が高いほど圧縮強度も低下するとされているが、100℃および 200℃での加熱後に圧縮強度が増加したという<sup>3)</sup>報告もあり、本試験においても 200℃・7 時間のケースで同様の傾向が確認された。残存圧縮強度比は 0.87~1.03 で、既往の報告 (0.7~1.3 倍程度)<sup>3)</sup>と同程度であった。

静弾性係数は、全ての加熱条件において非加熱のケースに対して 0.61~0.86 倍と小さくなり、150℃のケースに比べ 200℃のケースの方が小さくなった。一般にコンクリー

表 9 加熱影響試験結果

加熱条件	温度	150℃		200℃		非加熱
	時間	2時間	7時間	2時間	7時間	
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		35.2	38.7	35.0	41.4	40.3
残存圧縮強度比		0.87	0.96	0.87	1.03	1.00
静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		12.7	11.0	9.1	9.2	14.8
残存静弾性係数比		0.86	0.74	0.61	0.62	1.00

トが加熱を受けた場合、加熱温度が高くなると静弾性係数は低下するとされている<sup>3)</sup>が、本試験においても同様の結果が得られた。また、加熱による影響は、圧縮強度よりも静弾性係数の低下が顕著であるとされている<sup>3)</sup>が、本試験においても同様の結果となった。残存静弾性係数比は0.62~0.86となり既往の報告(0.5~0.9程度)<sup>3)</sup>と同程度であった。加熱時間については静弾性係数への影響は明確には現れなかった。

高温環境に曝されたコンクリートの強度や弾性係数の低下は、骨材と硬化したセメントペーストとの熱膨張の差による組織のゆるみ、ペースト中の化学的結合水の脱水、水酸化カルシウムなどの水和物の分解、骨材の変質などによって生じるとされている<sup>6)</sup>。本試験においても、現場打ち用配合コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、加熱によって通常のコンクリートと同程度低下し、EPS ビーズの溶融によるコンクリート内部への空隙の発生の影響は確認されなかった。

#### 4. 頭付きスタッドの押抜き試験

##### 4.1 試験概要

クイックチェンジ工法においては、床版と主桁のずれ止めに頭付きスタッドを使用することを標準としているが、コンクリートの軽量化によって頭付きスタッドのせん断耐力に低下が生じることが懸念された。そこで、超軽量高流動コンクリートを使用した場合の頭付きスタッドのせん断耐力が、標準配合の場合のせん断耐力と比較して低下しないかを確認するため、頭付きスタッドの押抜き試験を実施した。

試験方法は(社)日本鋼構造協会の頭付きスタッドの押抜き試験(案)に準拠した。試験体寸法と载荷治具を図14に、試験体および载荷状況を写真4に、材料試験結果を表10に示す。試験体のコンクリートブロックは幅400mm、高さ400mmとし、厚さは床版厚を想定して175mmとした。スタッドは、φ19mm、長さ130mmとし、1試験体あたり片側2

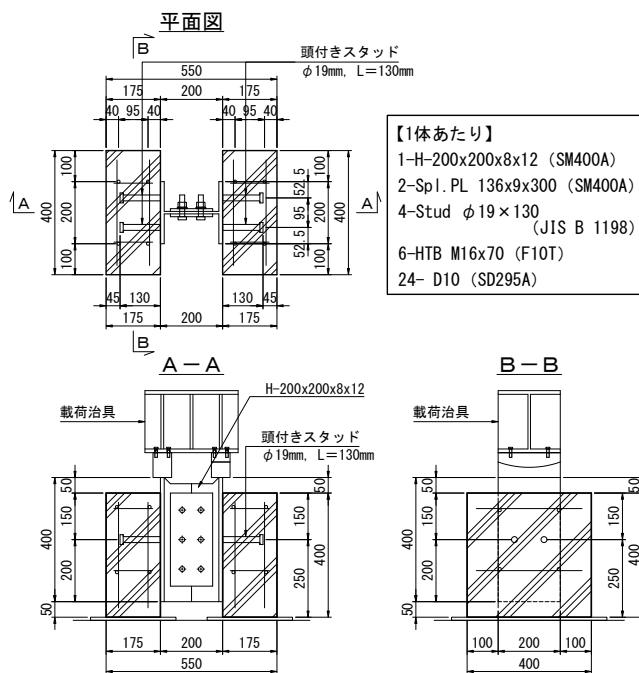


図 14 試験体寸法および载荷治具



写真 4 試験体および载荷状況

表 10 材料試験結果

種別		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	現場打ち用配合	35.6	2.21	15.2
	プレキャスト用配合	42.7	1.62	18.4
	標準配合	39.0	2.38	20.4
頭付きスタッド		-	463.3	-

本、合計4本を溶接した。配合毎にそれぞれ3体の試験体を作製し、2体は単調増加载荷法、1体は漸増繰返し载荷法で試験を実施し、H形鋼とコンクリートの相対ずれおよび耐力を測定した。



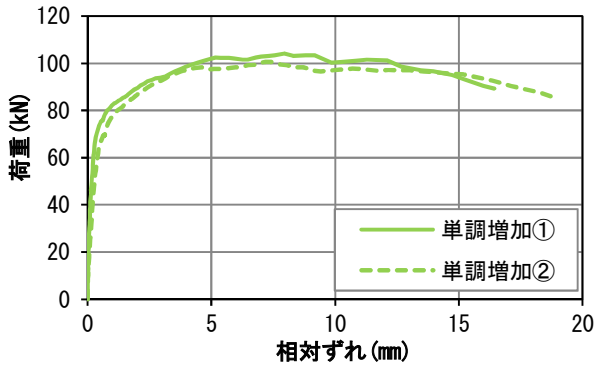


図 15 荷重-相対ずれ関係(現場打ち用配合、単調増加)

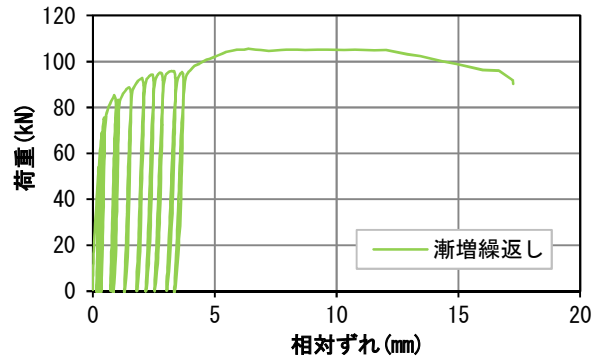


図 16 荷重-相対ずれ関係(現場打ち用配合、漸増繰返し)

表 11 頭付きスタッドの押抜き試験結果一覧

配合	試験結果		計算値				
	最大荷重 (平均)	降伏荷重 (平均)	道路橋示方書			複合構造 標準示方書	各種合成構造 設計指針
	$Q_{max}$ (kN)	$Q_y$ (kN)	$Q_a$ (kN)	$Q_y/Q_a$	$Q_{max}/Q_a$	$V_{ssud}$ (kN)	$q_s$ (kN)
現場打ち用配合	103.5	66.6	20.2	3.29	5.11	131.4	104.2
プレキャスト用配合	93.2	76.3	22.2	3.45	4.21	131.4	125.6
標準配合	121.0	79.6	21.2	3.76	5.71	131.4	126.3

## 4.2 試験結果と考察

荷重と相対ずれの関係の一例として、現場打ち用配合の試験結果を図 15、16 に示す。表 11 に試験結果と各規準類に記載されている頭付きスタッドのせん断耐力計算式によって算定した耐力の計算値を示す。計算値は、道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編（日本道路協会）の許容せん断力、複合構造標準示方書（土木学会）のせん断耐力、各種合成構造設計指針（建築学会）のせん断耐力をそれぞれ求めた。

超軽量高流動コンクリートの最大荷重、降伏荷重は、標準配合に比べ小さい値（最小で 77%程度）であった。計算値と比較すると、道路橋示方書の許容せん断力は、降伏に対して 3 以上、破壊に対して 6 以上の安全率を有しているとされるが、本試験結果では、両配合とも降伏荷重に対しては安全率 3 以上有しているものの、最大荷重に対しては安全率が 6 を下回った。また、最大荷重は、複合構造標準示方書のせん断耐力を下回り、各種合成構造設計指針のせん断耐力に近い値であった。超軽量高流動コンクリートのせん断耐力が、標準配合に比べ小さく、また、各種合成構造設計指針を除く規準類の計算値を下回る結果となった理由には、コンクリートの静弾性係数が小さいことが考えられる。頭付きスタッドのせん断耐力がコンクリートの圧縮強度と弾性係数の積の平方根に比例するという考え方もあり、各種合成構造設計指針のせん断耐力式においてはこの手法を採用している<sup>7)</sup>が、本試験においても同様の結果になったものと考えられる。

以上のことから、超軽量高流動コンクリートをクイック

チェンジ工法に適用する場合には、頭付きスタッドのせん断耐力算定時に、静弾性係数の影響を考慮した設計手法とすることが望ましいと考えられる。

## 5. サンドイッチ型複合床版の静的載荷試験

### 5.1 試験概要

超軽量高流動コンクリートを充填したサンドイッチ型複合床版の耐荷力および変形性能を実物大の床版試験体によって確認するため、サンドイッチ型複合床版の静的載荷試験を実施した。

試験体寸法は床版支間 2.5m を想定した橋軸直角（長辺）方向 3m、橋軸（短辺）方向 2m、厚さ 191mm（形鋼 H-175x175x7.5x11、上下鋼板 t=8mm）とした（図 17）。載荷には 10,000kN 載荷フレームと 5,000kN ジャッキを使用し、試験体を 2 辺単純支持した状態で、中央に道路橋示方書の T 荷重を参考に橋軸方向 200mm、橋軸直角方向 500mm の載荷板を用いて静的載荷を行った（写真 5）。

試験ケースは、充填コンクリートに現場打ち用配合、プレキャスト用配合、標準配合をそれぞれ使用した床版による 3 ケースとした。それぞれの充填コンクリートの強度試験結果を表 12 に示す。また、試験体に用いた鋼材の強度試験結果を表 13 に示す。

### 5.2 試験結果

図 18 に各ケースの試験体中央部における荷重変位曲線

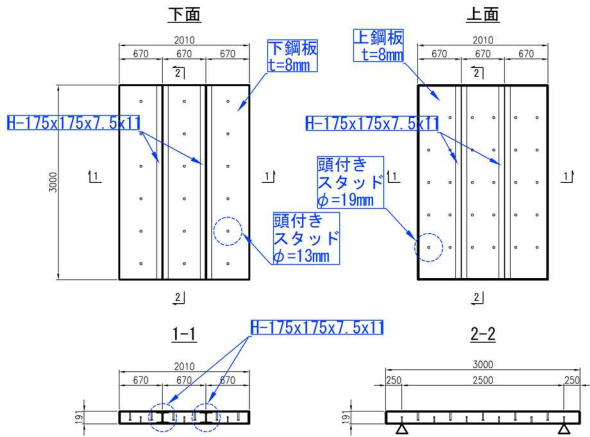


図 17 試験体構造図

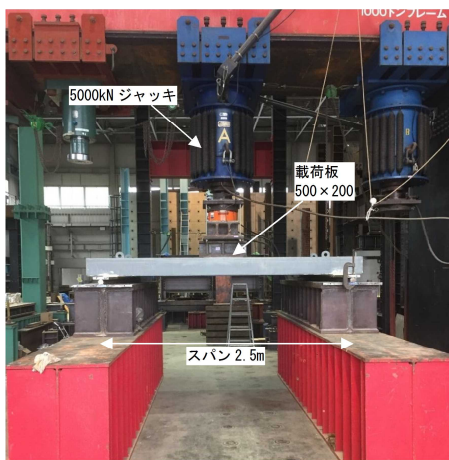


写真 5 試験体設置状況

表 12 充填コンクリート強度試験結果

配合	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )
現場打ち用配合	43.7	17.0	2.2	1710
プレキャスト用配合	46.2	17.8	2.1	1590
標準配合	45.7	21.9	2.6	1980

表 13 鋼材の強度試験結果

種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
鋼板 t=8mm (SM400A)	312	443
H-175x175 (SS400)	311	421

を、表 14 に降伏荷重および第 1 ピーク荷重を示す。全てのケースにおいて 500kN 程度で直線の傾きに変化が見られたが、これは充填コンクリートのひび割れや鋼板との付着切れが原因であると推測される。下鋼板の降伏荷重は設計荷重の 10 倍以上であり、降伏荷重までは弾性挙動を示した。また、下鋼板の降伏後は、充填コンクリートの押抜きせん断破壊による荷重のピークが見られたものの、その後も荷重は増加傾向を示した。さらに、充填コンクリートの違いにより押抜きせん断耐力に差が見られたものの、それ以外

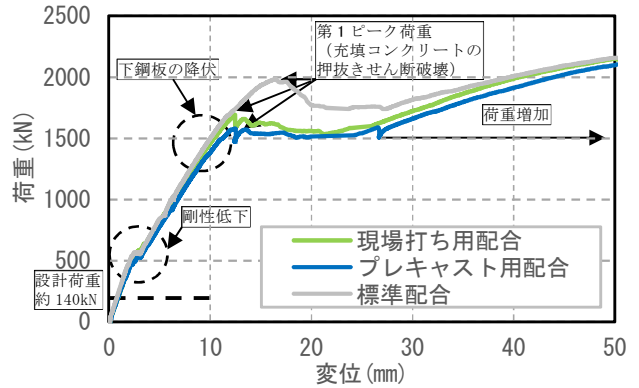


図 18 試験体中央部における荷重変位曲線

表 14 降伏荷重および第 1 ピーク荷重

配合	降伏荷重 (kN)	第 1 ピーク荷重 (kN)
現場打ち用配合	1,605	1,694
プレキャスト用配合	1,488	1,581
標準配合	1,647	1,985

については充填コンクリートの種類に関わらず同様の傾向を示すことを確認した。

以上のことから、超軽量高流動コンクリートは床版の静的な耐力からはサンドイッチ型複合床版の充填コンクリートとして十分使用可能であると考えられる。

## 6. まとめ

開発した超軽量高流動コンクリートによってクイックチェンジ工法の床版を軽量化でき、静的な耐力等からサンドイッチ型複合床版として床版の取替に使用可能であることが確認できた。今後は床版の疲労耐久性の確認や合理的な継手方法についての検討、市場調査等の情報収集を行い、適用につなげていきたいと考えている。

静的載荷試験の実施にあたり、貴重なご意見を頂いた大阪工業大学工学部都市デザイン工学科三方康弘准教授、ならびに同大学八幡工学実験場に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 人工軽量骨材協会：ALA CONCRETE 技術情報・建築編、2000.7
- 2) 日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書、2010.3
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリート便覧 [第二版]、技報堂出版、1996.2
- 4) 田沼ほか：実建築物におけるコンクリートの中性化進行の分析およびその予測手法の提案、日本建築学会構造系論文集、Vol. 81、NO. 720、pp.167-177、2016.2
- 5) 城ヶ端ほか：グースアスファルト舗装による鋼床版熱影響の計算法について、寒地土木研究所昭和 63 年度技術発表会、共-11、1989.2
- 6) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'17、2017.9
- 7) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010.11