

報告 取替用サンドイッチ型複合床版における床版の軽量化

福田 尚弘*1・為石 昌宏*2・永井 久徳*3・宇都本 彰夫*4

要旨: 劣化した既設 RC 床版をサンドイッチ型複合床版で取替える場合、取替後の床版重量が大きくなることが課題であった。そこで、発泡ポリエチレンビーズや超軽量粗骨材を使用した超軽量高流動コンクリートを開発し、床版の充填コンクリートに適用することで軽量化を実現した。また、開発した超軽量高流動コンクリートに対して、長期耐久性に関する試験、頭付きスタッドの押抜き試験を実施し、さらに、本コンクリートを充填した床版に対して静的載荷試験を実施した。その結果、超軽量高流動コンクリートは強度特性だけでなくこれら各種特性からも充填コンクリートとして適用可能であると考えられる。

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, 発泡ポリエチレンビーズ, 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策が講じられてきたが再劣化が生じる場合も多くあり、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の低減、および工事規制に伴う社会的影響を軽減するための急速施工が求められている。

著者らは、工場製作した上下 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に軽量高流動コンクリート（軽量 1 種コンクリート）を充填してサンドイッチ型複合床版とする取替用サンドイッチ型複合床版（以下、クイックチェンジ工法と称す）を開発してきた（図-1, 2）。本工法は、コンクリート未充填の状態でも床版上を一時的に重車両が走行することが可能であるため、パネル上を施工ヤードとした 2 分割施工や早期の交通開放が可能であるという特徴を有している。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、床版取替後の重量増加によって生じる下部工への負担を軽減するために、床版の軽量化が不可欠であると考えられた。

そこで、床版の重量を低減でき、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・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と、超軽量高流動コンクリートを充填コンクリートとして適用するために実施した試験のうちの長期耐久性試

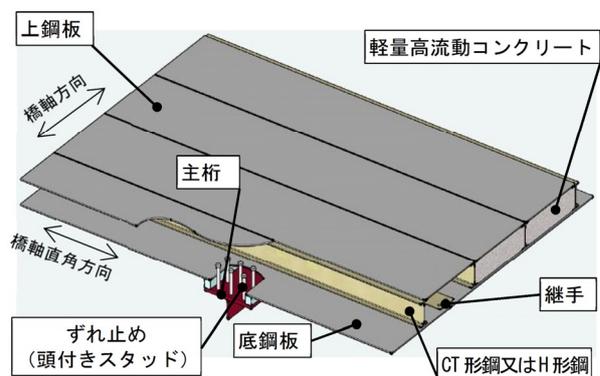


図-1 クイックチェンジ工法の構造概要

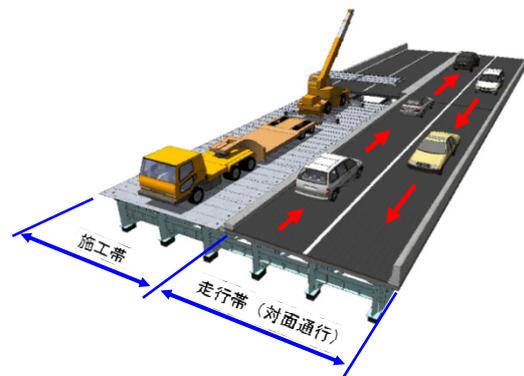


図-2 クイックチェンジ工法の工法概要

験と頭付きスタッドの押抜き試験の結果、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. 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

*1 (株) 鴻池組 土木事業総轄本部技術本部土木技術部設計技術課課長 工修 (正会員)

*2 (株) 鴻池組 土木事業総轄本部技術本部土木技術部設計技術課課長 (正会員)

*3 (株) 鴻池組 土木事業総轄本部技術本部土木技術部設計技術課課長 工修

*4 (株) 鴻池組 土木事業総轄本部技術本部土木技術部設計技術課主任 工修

した。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を行った。

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って更なる軽量化を実施することとした。

2.1 現場打ち用配合

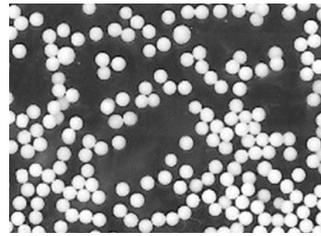
現場打ち用配合は、軽量2種コンクリートの細骨材の一部を直径約1mmのEPSビーズ（写真-1）によって置換することで、軽量1種コンクリートと比較して15%程度の軽量化を図った。EPSビーズは以下に示す特徴を有している。

- ・軽量性に優れる（密度0.02～0.10t/m³）
- ・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、プレウエッチ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。

2.2 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-1）を使用し、軽量1種コンクリートと比較して20%程度の軽量化を図った。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、プレウエッチ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/cm³に対して絶乾密度1.07g/cm³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ット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い。したがって、練混ぜから打込みまでの吸水量に相当する水をあらかじめ加えて練り混ぜることで、超軽量粗骨材（低含水量品）の使用は可能であると判断した。なお、本工法では練混ぜから打込みまでの吸水量は5分間吸水量とした。



EPSビーズ



超軽量粗骨材
（低含水量品）

写真-1 充填コンクリート軽量化材料

2.3 使用材料および配合

超軽量高流動コンクリートの配合条件を表-1に示す。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合成床版における下限値の30N/mm²よりも大きい35N/mm²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/mm²[配合強度42.5N/mm²(変動係数10%、割増係数1.214)]に設定した。

表-1 配合条件

項目		条件
設計基準強度		35N/mm ²
単位体積重量	現場打ち	17kN/m ³ 程度
	プレキャスト	16kN/m ³ 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

表-2 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 ³
EPSビーズ	EB	発泡倍率45倍	密度0.0376g/cm ³ 粒度分布 0.6～1.2mm:68.0% 1.2～2.5mm:32.0% 粗粒率3.32
細骨材	S1	軽量細骨材(A社製)	表乾密度1.92g/cm ³
	S2	軽量細骨材(B社製)	表乾密度1.86g/cm ³
	S3	混合砕砂	表乾密度2.61g/cm ³
粗骨材	G1	軽量粗骨材	表乾密度1.66g/cm ³
	G2	超軽量粗骨材(低含水量品)	絶乾密度1.07g/cm ³ 5分間吸水密度 1.11g/cm ³
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-3 コンクリートの配合

配合種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								単位容積質量(kg/m ³)
			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(低含水量品)}]	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

※人工軽量骨材の単位量は表乾質量(G2は5分間吸水質量)で示している。

単位体積重量は、充填後の床版重量がプレキャスト PC 床版と同等以下となるように、17kN/m³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。スランブ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。

使用材料の一覧を表-2 に、配合を表-3 に示す。なお、次章以降において、超軽量高流動コンクリートの各特性が、従来からサンドイッチ型複合床版の充填コンクリートとして採用されている軽量 1 種コンクリート（以下、標準配合と称す）と同程度以上であるかを確認するための標準配合の試験結果との比較を示す場合があるが、表-3 には比較対象の標準配合の配合も併せて示した。

3. 長期耐久性

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¹⁾。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-3 に各配合の相対動弾性係数の変化および耐久性指数(DF)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%未満になり、耐久性指数はそれぞれ DF=4 および DF=3 という結果となった。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% で耐久性指数は DF=88 であった。

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

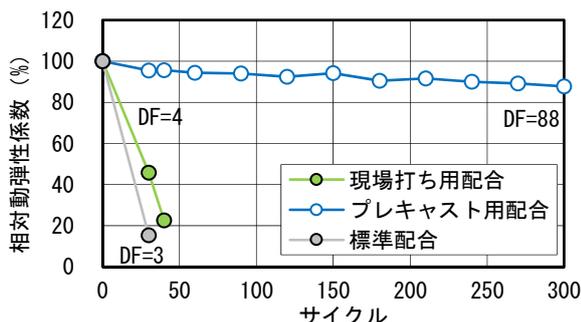


図-3 相対動弾性係数の変化と耐久性指数

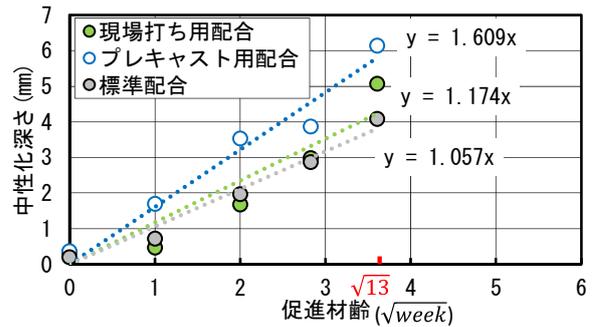


図-4 促進中性化試験結果

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、超軽量高流動コンクリートを寒冷地に適用する際には、通常の軽量コンクリートと同様に、実環境を考慮した試験や鋼殻による遮水・拘束効果を考慮した試験等によって、適用性を確認する必要があると考える。

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-4 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²⁾を参考に中性化速度係数比を 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 と非常に小さいという結果であった。

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-4 に示す条件で塩乾湿サイクルを繰返し実施した。噴霧溶液には塩化ナトリウム 5%水溶液を用いた。各サイク

表-4 塩分浸透性試験条件

塩乾湿サイクル	JIS K 5600
供試体形状・寸法	φ100mm×h200mm
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 塩乾湿サイクル条件(1サイクルあたり)： →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)

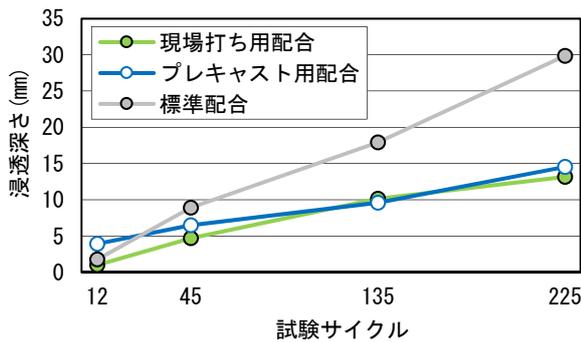


図-5 塩分浸透性試験結果

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-5に塩分浸透性試験結果を示す。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となる浸透深さは標準配合に比べ約半分という結果となった。よって、超軽量高流動コンクリートの塩分浸透抵抗性は標準配合と同程度以上であると考えられる。

3.4 圧縮疲労試験

サンドイッチ型複合床版に疲労による損傷が生じる場合、充填コンクリートよりも鋼殻の損傷が先行することが想定されるが、コンクリート単体での疲労耐久性を確認するため、JSTMC 7104「繰返し圧縮応力によるコンクリートの疲労試験方法」に準拠して圧縮疲労試験を実施した。

図-6に圧縮疲労試験結果(S-N曲線)を示す。図-6にはコンクリート標準示方書の軽量コンクリートの疲労強度算定式より求めた曲線(ただし、 $k_{lf}=0.85$,

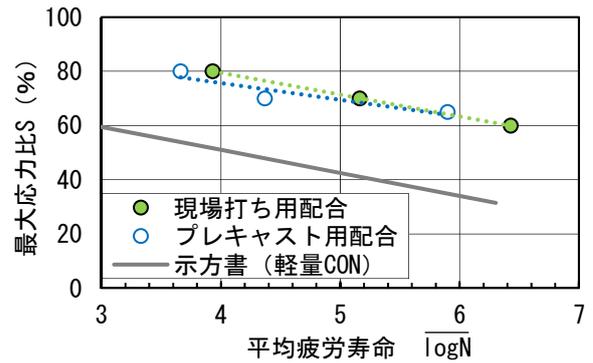


図-6 圧縮疲労試験結果(S-N曲線)

表-5 S-N曲線式と200万回疲労強度

種別(配合)	S-N曲線式	200万回疲労強度(%)
現場打ち用配合	$\log N = -0.125S + 13.9$	61.0%
プレキャスト用配合	$\log N = -0.132S + 16.3$	61.5%
標準示方書	-	31.4%

$f'_{ck}=45.4\text{N/mm}^2$, $\gamma_c=1.0$ とした)も併せて示した。なお、コンクリート標準示方書の算定式における f'_{ck} には、超軽量高流動コンクリートの基準強度試験結果のうち大きい値となったプレキャスト用配合の試験結果を採用した。また、表-5にそれぞれのS-N曲線式および200万回疲労強度を示す。図-6および表-5に示すとおり、超軽量高流動コンクリートの平均疲労寿命は標準示方書の算定式よりも十分大きく、200万回疲労強度で比較すると2倍程度(現場打ち用配合:61.0%,プレキャスト用配合:61.5%,標準示方書:31.4%)という結果になった。また、200万回疲労強度は、軽量コンクリートの圧縮疲労試験結果例³⁾の50~60%と同程度以上という結果であった。本試験においては標準配合の試験を実施していないが、平均疲労寿命が標準示方書の軽量コンクリートの算定式に比べ十分大きいことと、既往の報告における軽量コンクリートの平均疲労寿命と同程度以上であることから、超軽量高流動コンクリートの疲労耐久性は標準配合のコンクリートと同程度以上であると考えられる。

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が低下す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。試験体および荷重状況を



写真-2 試験体および載荷状況

表-6 頭付きスタッド押抜き試験の材料試験結果

種別		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
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	-

写真-2に、材料試験結果を表-6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。H形鋼はH-200x200x8x12とし、頭付きスタッドは、φ19mm、長さ130mmを、1試験体あたり片側2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体は単調増加載荷法、1体は漸増繰返し載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。

4.2 試験結果および考察

表-7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⁴⁾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、各種合成構造設計指針のように静弾性係数の影響を考慮したせん断耐力算定式を採用するの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。

図-7に試験体構造図を示す。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。載荷には1000kN載荷フレームと5000kN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-3）。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および試験体に用いた鋼材の強度試験結果を表-8に示す。

5.2 試験結果および考察

図-8に各ケースの試験体中央部における荷重変位曲線を、表-9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

表-7 頭付きスタッド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 _v (kN)	Q _a	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	19.6	21.2	3.76	5.71	131.4	126.3

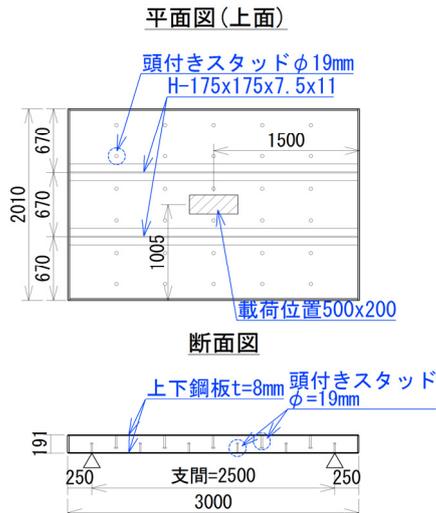


図-7 静的載荷試験体構造図



写真-3 静的載荷試験体設置状況

表-8 充填コンクリートおよび鋼材の強度試験結果

充填コンクリート				
配合	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	単位容積質量 (kg/m ³)
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
鋼材				
種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)		
鋼板t=8mm (SM400A)	312	443		
H-175x175x7.5x11 (SS400)	311	421		

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。

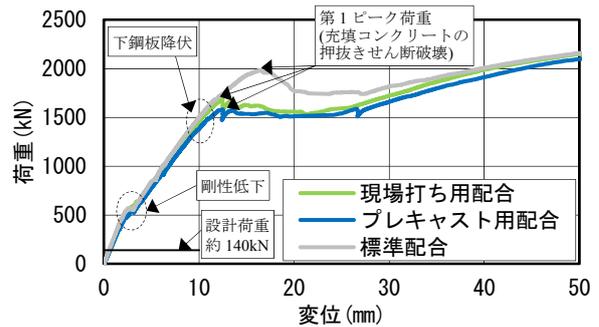


図-8 試験体中央部における荷重変位曲線

表-9 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

6. まとめ

- (1) 超軽量高流動コンクリートは、特に現場打ち用配合において、凍結融解抵抗性が通常の軽量コンクリートと同様に小さくなるため、寒冷地での適用には検討を要する。中性化に対しては、100年後の中性化深さの推定値が20mm未満と小さく、十分な中性化抵抗性を有していると考えられる。塩分浸透抵抗性および疲労耐久性は、標準配合と同程度以上であるとされる。
 - (2) 超軽量高流動コンクリートは、頭付きスタッドのせん断耐力が小さくなるが、静弾性係数の影響を考慮したせん断耐力算定式を採用することで、せん断耐力を評価することは可能と考えられる。
 - (3) 超軽量高流動コンクリートを充填して軽量化した床版の荷重-変位関係は、押抜きせん断耐力を除いて標準配合と同様の傾向を示し、設計荷重に対して十分な静的耐力を有していることが確認できた。
- (1)~(3)より、超軽量高流動コンクリートは、寒冷地の適用性等の検討は必要であるが、強度特性だけでなく、「長期耐久性」、「頭付きスタッドのせん断耐力」、「床版の静的耐力」の観点からも、サンドイッチ型複合床版の充填コンクリートとして適用可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'17, p.231, 2017.9
- 2) 田沼毅彦, 杉山央：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
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧 [第二版], pp.462-463, 1996.2
- 4) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説, pp.92-93, 2010.11