

サンドイッチ型複合床版に充填する軽量高流動コンクリートに関する実験

Experiments on Lightweight Self-Compacting Concrete for Steel-Concrete Sandwich Slab

井澤衛*, 遠藤裕悦**, 中川敏之*, 上條崇***, 土田昌美*

Mamoru IZAWA, Yuetsu ENDO, Toshiyuki NAKAGAWA, Takashi KAMIJO and Masami TSUCHIDA

* 住友金属工業株式会社 エンジニアリングカンパニー 橋梁部 (〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11)

** 株式会社八洋コンサルタント 技術センター (〒253-0071 神奈川県茅ヶ崎市萩園 2722)

*** 住友金属工業株式会社 鋼板・建材カンパニー 建設技術部 (〒314-0255 茨城県鹿島郡波崎町砂山 16-1)

Recently, the continuous composite girder with composite slabs has been attracting attention because of economical efficiency, roadability and strength. By applying steel-concrete sandwich slabs with both upper plate and bottom plate to continuous composite girders, the durability of the slabs can improve and the design of superstructure becomes more rational. However, the sandwich slab has the disadvantage in which the slab is heavy a little, compared with the ordinary composite slabs that have only bottom plate. In this paper, the sandwich slab using lightweight self-compacting concrete is proposed in order to solve the subject of the slab dead weight, and its performances are checked by trial design. And, the results of experiments on characteristics and construction nature of lightweight self-compacting concrete are reported.

Key Words: steel-concrete sandwich slab, composite slab, self-compacting concrete, lightweight concrete

1. はじめに

近年、鋼橋の上部工においては、経済性、走行性、耐荷力の面で合成床版を用いた連続合成桁が注目されている。連続合成桁に鋼・コンクリートサンドイッチ型複合床版（以下、サンドイッチ床版）を適用する長所としては以下が挙げられる。

- ① 床版の上下鋼板を主構造部材として積極的に活用することができるため合理的な設計が可能¹⁾。
- ② 上鋼板を有するため床版のひび割れに伴う雨水の浸入問題から開放され高耐久性を保證できる。

唯一の短所としては、一般的な下側鋼板のみの合成床版に比べると床版自重が若干重いことが挙げられる。

著者らは、サンドイッチ床版を用いた連続合成桁の設計において、さらに合理的な設計を実現するために軽量化を図るべく軽量骨材を用いた高流動コンクリートの適用性の調査を進めている。

本文では上記の課題を解決するために、軽量高流動コンクリートを用いたサンドイッチ床版（図-1）を提案し、試設計により、軽量高流動コンクリートを適用したサンドイッチ床版形式に対して、PC床版および従来形式のサンドイッチ床版を適用した形式との比較設計を行い、その利点について述べる。ここで、主桁形式に関しては近年、上部構造の設計において経済的な優位性が報

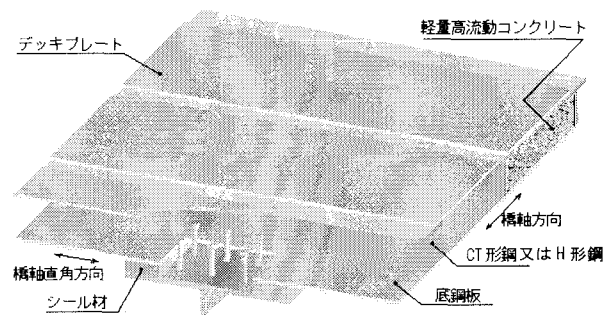


図-1 サンドイッチ型複合床版

告されている細幅箱桁形式を採用した。

さらに、サンドイッチ床版に用いる軽量高流動コンクリートの配合等の基本性状、および凍結融解に対する性状、クリープ及び収縮性状の調査結果^{2),3)}、ならびに、軽量高流動コンクリートの充填施工性の調査結果についても報告する。

2. 軽量高流動コンクリート適用の利点

2. 1 サンドイッチ床版を用いた連続合成桁の設計概要

一般に、連続合成桁設計では、コンクリートのクリー

表-1 試設計モデル

比較設計ケース No.	Case. 1	Case. 2	Case. 3
床版種別	サンドイッチ床版 (軽量高流動コンクリート)	サンドイッチ床版 (普通高流動コンクリート)	PC 床版
床版厚	268mm (デッキプレート: 9mm, 底鋼板: 9mm 含む)		320mm
乾燥収縮度	100 μ		200 μ
f_{ck} (N/mm ²)	35 (高流動コンクリート使用により実測強度は 50N/mm ² 以上)		35
コンクリートクリープ係数 ϕ	1.0		2.0
床版重量	6.57 kN/m ²	7.45 kN/m ²	7.84 kN/m ²
負曲げ部有効断面			
正曲げ部有効断面			
その他	横桁を省略し、支点上横桁のみとしている		横桁は 6m 間隔で配置
試設計のモデル			

表-2 試設計結果

Case	主 桁		床 組	主構造重量	
	m ² 鋼重 (kN/m ²)	鋼重比		m ² 鋼重 (kN/m ²)	鋼重比
Case. 1	2.18	0.90	0.11	2.29	0.85
Case. 2	2.24	0.93	0.11	2.35	0.88
Case. 3	2.40	1.00	0.28	2.68	1.00

プ、乾燥収縮による影響は、主として中間支点上において非合成桁設計で決定した断面に対して不利な影響を及ぼすことが指摘されているが、サンドイッチ床版連続合成桁においては、負曲げ部において、以下の理由から主構造断面をより経済的に設計できると考えられる。

- ① 配力鉄筋の 3 倍以上の断面積を持つ上下鋼板を合成断面に考慮できる。
- ② クリープ・乾燥収縮による不静定力がコンクリート系床版に対して 1/2 以下となる (後述、3. 5)。
- ③ 上下鋼板を有するために床版剛性が大きく、疲労耐久性も主構造と同レベルの寿命が確保できると考えられるので、中間横桁が省略可能と考えられる。

2. 2 比較設計結果

断面計算に当たってのモデル化ならびに試設計における橋梁形式モデルは表-1とした。コンクリートのクリープ・乾燥収縮、温度差によって生じる不静定力の算出は文献4)によった。また主桁の経済性を最大限高めるために LP 鋼板*の使用を前提とした。

概略計算結果は紙面の都合上省略するが、断面構成図をもとに、数量集計した結果を表-2に示す。

また、大型材片数や T 継手溶接延長に差異はないことから鋼重のみの比較によって Case. 1,2,3 は簡易的に経

* LP 鋼板 (Longitudinally Profiled Steel Plate): 長手方向に直線的に板厚を変化させた鋼板

表-3 使用材料一覧

項目	適用
セメント	高炉セメントB種 密度 3.04 g/cm ³
細骨材	陸砂 表乾密度 2.60 g/cm ³ 吸水率 1.98%
粗骨材	造粒系人工軽量骨材 表乾密度 1.68 g/cm ³ 絶乾密度 1.34 g/cm ³ 含水率 26.5%
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤
増粘剤	水溶性セルロースエーテル

済性を比較できる。表-2の試設計結果から以下のことがわかる。

- Case. 1 及び Case. 2 から、本橋梁形式において従来のサンドイッチ床版に比べ、軽量高流動コンクリートを用いたサンドイッチ床版を適用することで、主構造全体で3%経済的となる。
- Case. 1 及び Case. 3 から、本橋梁形式においてPC床版の適用に比べ、軽量高流動コンクリートを用いたサンドイッチ床版細幅2主桁桁形式を採用することで15%経済的となる。
- 軽量高流動コンクリートを用いたサンドイッチ床版細幅2主桁橋では、PC床版2主桁橋に比べ下部工反力が約19%軽減できるため、経済性がさらに期待できる。以上の試設計結果により、サンドイッチ床版への軽量高流動コンクリート適用の優位性が確認できた。

3. 軽量高流動コンクリートの性状

3.1 コンクリート配合選定

配合選定試験は施工実績のある普通骨材を用いた高流動コンクリート配合を基本とし、粗骨材を人工軽量骨材に置き換えた場合のフレッシュコンクリートの性状および各種硬化性状の確認を行った。試験に使用した材料一覧を表-3に示す。

サンドイッチ床版用の軽量高流動コンクリートとして必要とされる性能は以下のとおりである。

- ① スランプフローは60~70cm程度
- ② 初期の沈降量が極めて少ないこと
- ③ 単位重量は 19.6 kN/m³ (2.0 tf/m³)程度以下
- ④ 圧縮強度は材齢28日強度で40N/mm²程度

上記条件に対して具体的な項目として、①は高性能AE減水剤の使用量、②は増粘剤の使用、③は本編の主眼である軽量化に対して人工軽量骨材の使用、④は単位セメント量を変化させることにより最適なセメント量の選定等を検討要因とし予備試験を行った。

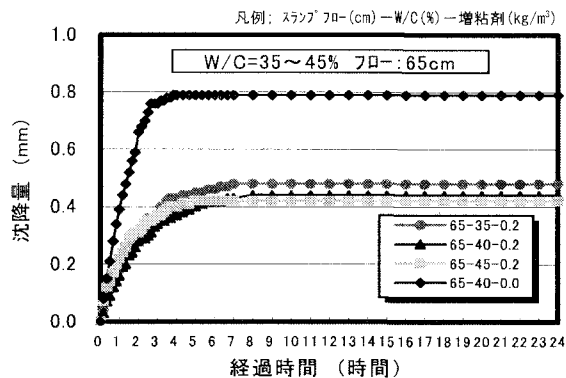


図-2 経過時間と沈降量の関係

測定項目は、スランプフロー、空気量、ブリーディング、初期沈降量、圧縮強度及び凍結融解試験等であり、試験方法はJIS規格に従い、JIS規格が無いものについては該当する学会規格などの関連規格によった。また、凍結融解試験ではサンドイッチ床版のコンクリートが鋼殻で密閉されている条件を反映させるために、気中凍結・気中融解方法を採用した。

3.2 フレッシュコンクリートの性状

高流動コンクリートの流動性の指標としてスランプフローを65cmに設定した場合のW/Cと増粘剤との組合せを変えたコンクリートの初期の沈降量を図-2に示す。同図によると、沈降量を抑制するためにはW/Cよりも増粘剤の使用が有効であることが認められる。また、増粘剤を用いた配合はコンクリート表面に上昇する水分がほとんど無く、ブリーディング率も0%であり材料の分離抵抗性にも優れていることが確認できた。また、単位重量もほぼ19.6 kN/m³を満足した。

3.3 強度発現性

圧縮強度試験により、材齢28日ではセメント水比2.22 (W/C=45%)以上で45N/mm²以上を発現することを確認した。また、軽量コンクリートの場合、標準養生と水分の供給を遮断した封緘養生との強度差が小さい傾向にあり、軽量骨材内部の水分が水和反応に寄与していることを確認した。密封状態でも水和反応が正常に進行することは、サンドイッチ床版コンクリートとしては有効な性状といえる。

本試験の目標は40N/mm²以上としたが、実施の安全率を考慮してセメント水比2.50 (W/C=40%)を選定した。

3.4 凍結融解試験

圧縮強度結果より選定されたW/C=40%配合を用いて凍結融解試験を行った。試験サイクル数と相対動弾性係

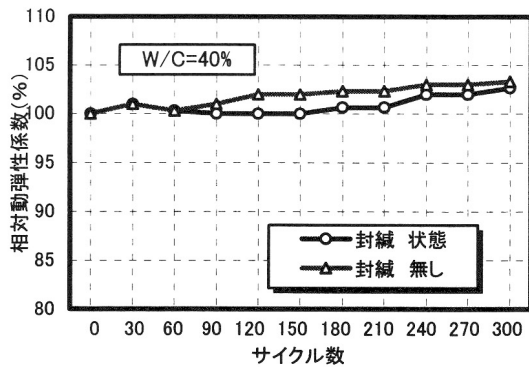


図-3 凍結融解試験結果

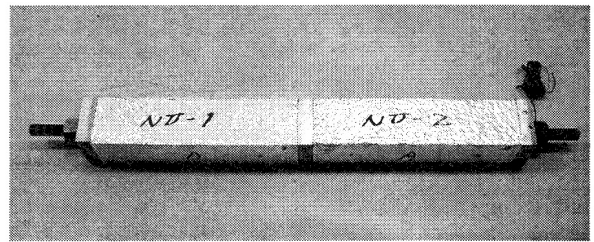


写真-1 クリープ試験供試体 (封緘状態)

表-4 配合の選定

コンクリート種類	目標フロー [スランプ] (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	単体量 (kg/m ³)				混和剤使用量(C×%)	
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤	空気調整剤
軽量高流動	65±5	4.5±1.5	40	175	438	827	547	1.0	0.0010
高流動	55±5		34	172	500	845	816	1.8	0.0009
普通	[8]		50	159	318	809	1049	—	—

数を図-3に示す。これによると、外気と遮断されている床版内部を模擬した封緘条件と対比に行った一般条件である封緘無しの何れの場合も相対動弾性係数は、300サイクル終了時に耐久性の標準とされている60%を大きく上回る103%を示している。軽量コンクリートの懸案⁹⁾とされている凍結融解に対する抵抗性も、サンドイッチ床版のようにコンクリートへの水の出入りが無い条件であれば、十分な耐凍害性を有することが確認できた。

凍結融解試験結果より最終的に選定された配合を表-4に示す。また表-4には3.5でのクリープ試験の比較対象とした軽量骨材を使用しない高流動コンクリートと普通コンクリートの値も併記した。

3.5 クリープ試験

3.5.1 試験方法

供試体は、写真-1に示す10×10×40cmの2つの角柱体を、鋼製プレートを挟んで配置し内部にシース管を埋設した。試験方法は、コンクリートの硬化脱型後、標準温度状況下(温度20±2℃)に材齢28日まで養生し、次に、シース管内に配置したφ23mmのPC鋼棒をセンターホールジャッキで緊張し、コンクリートに10N/mm²の応力を導入した。以後、供試体は温度20±1℃に静置し必要に応じて再緊張による応力緩和補正を行った。なお、軽量高流動コンクリートと高流動コンクリートについてはサンドイッチ床版鋼殻内に密封されていることを模擬して打設時から試験終了時までアルミシートで覆う封緘状態とした。一方、普通コンクリートについては封緘せずにむき出しの状態とした。

ひずみ測定は所定の材齢に達した時点で供試体側面に設置した標点間を計測することにより行った。また、硬

化収縮ひずみはクリープ試験と同一形状の供試体を無載荷で同一条件下に置き、クリープ測定時に併せて測定した。

3.5.2 試験結果

載荷材齢とクリープ係数の関係を図-4に、載荷材齢とひずみとの関係を図-5に、載荷開始から1年間について示す。また、これらの図中には、高流動コンクリートについて過去に実施した実験結果も併記した。

本床版を合成桁として適用する場合、鋼殻内に充填したコンクリートのクリープや硬化収縮が大きいと床版から桁に移行する応力も大きくなり、桁の設計が厳しくなる。しかし、図-4から、高流動コンクリートのクリープ係数は載荷開始1年後で0.7程度に収束していることが確認でき、また、今回実施した軽量高流動コンクリートについても、載荷開始後1年時点でクリープ係数は0.5程度の値を推移している。これらのクリープ係数値は標準値2の半分以下の値で、また、図-4の普通コンクリートのクリープ係数は載荷開始1年後で1.9の値を示していることから、高流動コンクリートのクリープ係数は普通コンクリートの1/2以下であった。

図-5より硬化収縮に関しては、既往の実験結果から高流動コンクリートの場合、載荷開始1年後で100μ程度と極めて小さく普通コンクリートの1/3程度であった。一方、封緘状態の軽量高流動コンクリートはマイナスの収縮すなわち膨張傾向を示していることが認められる。同様の封緘状態であっても普通骨材の場合には収縮性状を示していることから、軽量骨材の特性に起因するものと考えられる。軽量骨材は内部に多くの水分を含んでおり、骨材質量の約20%が水分である。このため、軽量コ

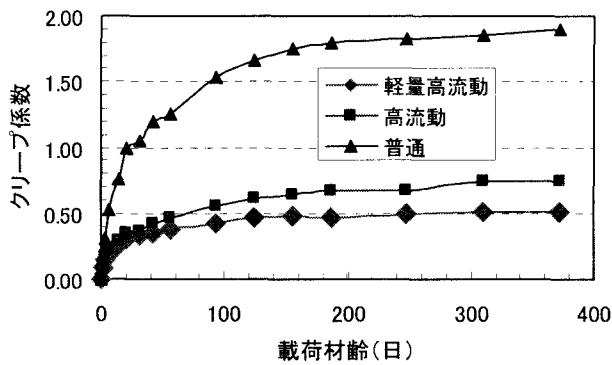


図-4 クリープ係数の経時変化

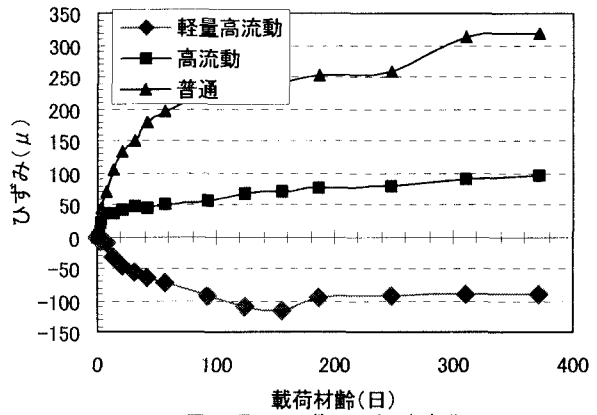


図-5 ひずみの経時変化

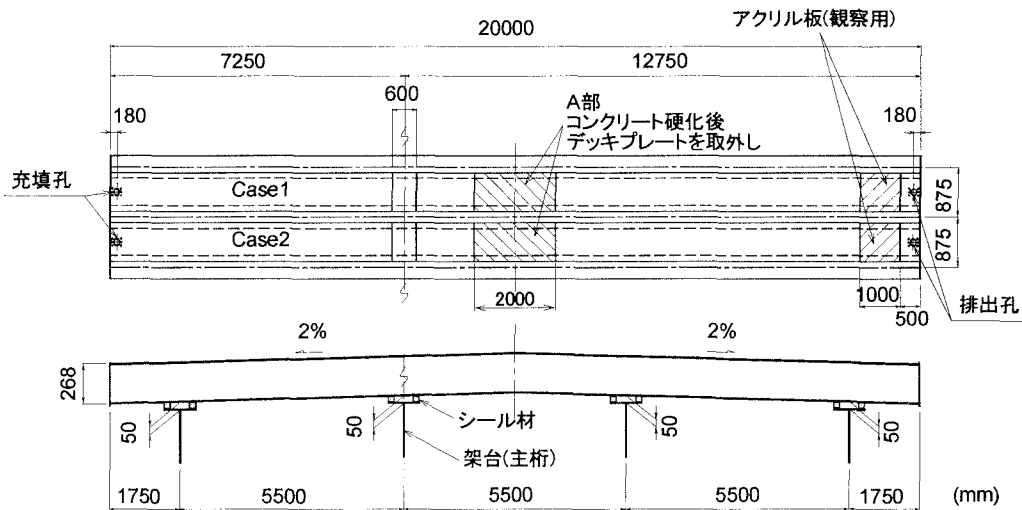


図-6 充填施工実験供試体

ンクリートは一般的な気中状態であっても、骨材に含まれる水分によりセメントの水和反応が継続的に進行する。このため、コンクリート内部が乾燥する事がなく体積変化は少ないとされている。とくに初期の段階では若干の膨張さえすることもあるといわれており、今回は密封状態で外部への水分の蒸発がない環境であるため、この膨張傾向が助長された可能性がある。

以上の結果から、軽量高流動コンクリートを用いたサンドイッチ床版を合成桁に適用する際の設計値として、クリープ係数は 1.0 程度が採用できること、また、硬化収縮に関しては、膨張傾向を示すことから最終硬化収縮度は無視し得ることを確認した。

4. 軽量高流動コンクリートの充填施工実験

ここまでで検討した軽量高流動コンクリートの床版パネルへの充填性を確認するために、実大床版を用いた充填施工実験を実施した。

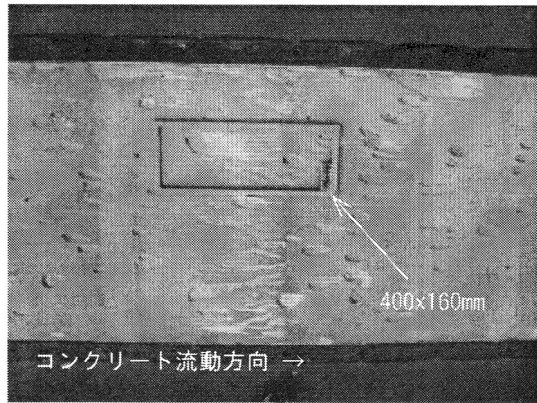
4. 1 実験方法

供試体形状を図-6に示す。供試体の幅員は 20m であり、横断方向に 2%の拌み勾配を設けた。供試体は主桁

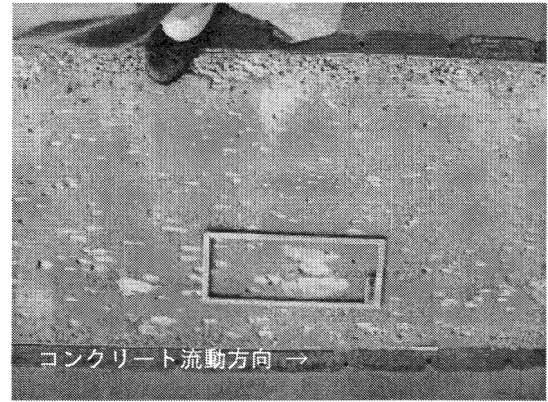
を模擬した架台上に設置した。供試体のコンクリート充填区画は 2 区画あり、それぞれ幅員方向の 20m に渡り連続している。

鋼殻内に充填する軽量高流動コンクリートは、実施工で想定しているものよりもスランプフローが小さい場合（ケース 1、実測スランプフロー 55.0cm）と、大きい場合（ケース 2、実測スランプフロー 70.5cm）の 2 種類を区画毎に充填した。なお、スランプフローは、表-4に示す軽量高流動コンクリートの配合をベースに、高性能 AE 減水剤の添加量を変えることで調整した。コンクリートは、図-6の左端に設けた充填孔より圧入し、右端に設けた排出孔よりオーバーフローさせる方法で 1 区画ずつ充填した。

実験結果は未充填部の大きさで評価することとし、デッキプレートのたたき検査、ならびに、デッキプレートを一部取り外して内部のコンクリートを観察した。ここで、サンドイッチ床版の性能に悪影響を与える未充填部の大きさは、橋軸直角方向 400mm×端軸方向 160mm の寸法（T 荷重後輪接地面積の 80%）としたが、これは、過去に実施した輪荷重走行試験⁹⁾において、輪荷重走行位置の直下に、同サイズの未充填部を意図的に設けた場合でも、サンドイッチ床版が十分な疲労耐久性を有する



a) ケース 1 (スランプフロー : 55.0cm)



b) ケース 2 (スランプフロー : 70.5cm)

写真-2 コンクリートの表面状態

ことを確認しているためである。

4. 2 実験結果

充填コンクリートが硬化した後、図-6中にA部で示した床版中央部のデッキプレートを取り外し、コンクリート上面の表面状態を観察した(写真-2)。

写真-2より、ケース1、2ともコンクリート表面に気泡状の未充填部が残っているが、大きな未充填部でも400×160mmの平面寸法を超えるものは認められなかった。未充填部の深さは1~5mm程度であった。なお、デッキプレート全面に渡ってたたき検査を実施したが、400×160mmを超えると判定した未充填部は無かった。

また、写真-2より、ケース1のコンクリート表面は未充填部を除けば平滑であり、鋼板との密着が良好であったことが確認できたが、ケース2ではコンクリート表面の一部に軽量骨材が浮き上がっている箇所が認められ、材料分離の傾向が認められた。

サンドイッチ床版の充填コンクリートは、通常の骨材を用いた高流動コンクリートの場合、スランプフローを65cm程度とした場合に良好な充填度が得られることを過去の充填施工試験から確認しているが、今回の実験から、軽量高流動コンクリートの場合にはスランプフローをやや低目に設定した方が良好な充填度が得られるものと考えられる。

5. まとめ

サンドイッチ床版の軽量化による橋梁上部構造の合理化を目的に、軽量高流動コンクリートの各種性状、および、充填施工性について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

(1) 細幅2主桁形式の上部工について試算した結果、軽量高流動コンクリートの適用により、サンドイッチ床版は12%軽量化でき、主構造全体では3%経済的となる。同形式の橋梁をPC床版とした場合に対しては、主構造全体で15%経済的となる。

- (2) 流動性、強度発現性を備えた軽量高流動コンクリートの配合を選定した。増粘剤を添加した軽量高流動コンクリートは初期の沈降量が小さく、ブリーディング率も0%であり、材料分離に対する抵抗性に優れているのでサンドイッチ床版の充填材に適している。
- (3) サンドイッチ床版のようにコンクリートが密閉された条件を模擬した気中凍結・気中融解方式による凍結融解試験の結果、選定配合の軽量高流動コンクリートは相対弾性係数の低下が無く十分な耐凍害性を有する。
- (4) サンドイッチ床版に用いる軽量高流動コンクリートは、コンクリート系床版に比べてクリープおよび硬化収縮の影響が小さい。
- (5) 軽量高流動コンクリートの充填施工性、充填度は通常の骨材を用いた高流動コンクリートと同様である。

参考文献

- 1) 井澤, 中川, 土田, 上條, 関口: 軽量高流動コンクリートを用いたサンドイッチ床版細幅2主桁橋の一提案, 土木学会第57回年次学術講演会, I-641, pp.1281-1282, 2002
- 2) 遠藤, 上條, 土田, 井澤: サンドイッチ床版に充填する軽量高流動コンクリートのフレッシュ性状および耐凍害性, 土木学会第57回年次学術講演会, CS4-064, pp.237-238, 2002
- 3) 土田, 中川, 上條, 井澤, 遠藤: サンドイッチ床版に充填する軽量高流動コンクリートのクリープおよび収縮性状, 土木学会第57回年次学術講演会, CS4-063, pp.235-236, 2002
- 4) (社)日本橋梁建設協会: PC床版を有するプレストレスしない連続合成2主桁橋の設計と解説, 2001
- 5) 藤木, 國府, 遠藤, 保坂: 軽量コンクリートの凍害劣化機構に関する研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.239-250, 1999
- 6) 中川, 井澤, 阿部: サンドイッチ型複合床版の階段状荷重漸増載荷による輪荷重走行疲労試験, 土木学会第55回年次学術講演会, I-A90, pp.180-181, 2000