

論文・報告

自己充填コンクリートの鋼橋への適用

～コンクリート施工の効率化・品質向上に向けて～

Application of Self-Compacting Concrete for Streamlined Construction and Quality Improvement

吉田 賢二 *1
YOSHIDA Kenji佐藤 和樹 *2
SATO Kazuki半谷 尚士 *3
HANYA Naoto曾根 武仁 *4
SONE Takehito畠 千晴 *5
HATA Chiharu平井 隆嗣 *5
HIRAI Takahide

本研究では、自己充填コンクリート (Self-Compacting Concrete: 以下、SCC) の鋼橋への適用性について検討した。SCC は高い流動性と粘性を兼ね備え、締固め作業を不要とすることで、施工性の向上と品質の安定化が期待される。支点上横桁および合成床版を対象に、配合設計、実物大模型による充填性確認試験、さらに実橋施工を通じて SCC の性能を評価した。配合設計では、複数の試験配合を比較し、流動性・分離抵抗性・空気量などの性能要件を満たす標準配合を選定した。実物大模型試験では、狭隘部や横断勾配下での充填性、粗骨材の分布および天端仕上げ性を確認し、SCC の有効性を実証した。さらに、伊尾木川橋での実橋施工においても、高品質な仕上がりとともに、締固め作業の省力化による施工効率の向上が確認できた。SCC は今後の鋼橋施工における有効な材料技術として期待される。

キーワード：自己充填コンクリート、巻き立てコンクリート、合成床版、生産性向上、品質確保

1. はじめに

建設材料としてのコンクリートは、安価で供給しやすいため、最も一般的な材料として幅広く使用されている。しかし、その信頼性および耐久性は、施工時の締固め作業など、施工者の技能といった人的要因に大きく依存する傾向がある。近年では、締固め作業を不要とする高流動コンクリートの適用が進んでいるが、材料分離のリスク、品質管理の難易度の上昇、さらには型枠に作用する側圧の増大といった課題も指摘されている。

近年では高耐久性を有する鋼コンクリート合成床版（以下、合成床版）や PC 床版の採用が進み、鋼少數鉄桁橋をはじめとする合理化橋梁が一般的な形式となっている。これにより桁高や桁間隔が増大し、図 1 に示す支点上横桁の巻き立てコンクリートの構造高も大きくなる傾向にある。巻き立てコンクリートは活荷重による衝撃吸収や騒音低減に加え、床版端部の補強および落橋防止ケーブルの定着部といった多くの機能を担う場合がある。現状の施工では、写真 1 に示すように締固め用孔から締固めを行っているが、作業性の低下や品質確保の観点から、施工時に十分な配慮が求められている。

以上のような背景から、本研究では、従来の高流動コンクリートと同等以上の流動性を有し、かつ高い粘性に

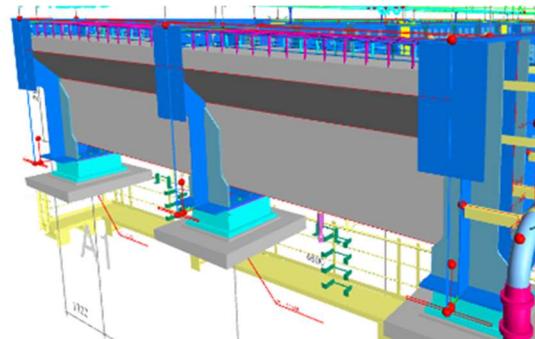


図 1 巷き立てコンクリートの 3D 図



写真 1 コンクリート打設時の締固め

*1 川田工業株橋梁事業部技術統括部大阪技術部四国技術課 課長

*2 川田工業株橋梁事業部工事統括部大阪工事部予算管理課 課長

*3 川田工業株橋梁事業部工事統括部大阪工事部大阪工事課 主任

*4 川田工業株橋梁事業部生産統括部生産技術部橋梁技術課 係長

*5 川田工業株橋梁事業部技術統括部大阪技術部四国技術課

より材料分離を抑制可能な自己充填コンクリート (Self-Compacting Concrete: 以下, SCC) ¹⁾に着目し, 鋼橋への適用性について検討を行った。具体的には, 適用部位の選定, 要求性能に基づく配合設計, 実物大模型を用いた充填性確認試験, ならびに実橋への適用を通じて, SCC の実用性を評価した。なお, 充填確認試験および実橋への適用は, 国土交通省四国地方整備局土佐国道事務所の協力のもと, **写真 2** に示す伊尾木川橋において実施した。



写真 2 伊尾木川橋の全景

2. 自己充填コンクリートの鋼橋への適用

(1) 自己充填コンクリート

SCC は 1988 年に開発されたコンクリートであり, 自己充填性を付与するために, セメント量を増加させて粘性を高めるとともに, 高性能 AE 減水剤を添加することでセメント粒子を分散させ, 優れた流動性を確保し間隙通過性能を向上させている。その結果, SCC は通常のコンクリートに比べて流動性が高く, 高強度な特性を有する一方で, 粉体量とセメント量が多いため, 材料コストが高くなる。

(2) 適用部位および期待される効果

本検討では, **図 2** に示す支点上横桁の巻き立てコンクリートおよび, 本橋の床版形式は異なるが, **写真 3** に示す合成床版形式の一つである SC デッキスタッドレスを SCC の適用部位として選定した。

巻き立てコンクリートについては, 伊尾木川橋への適用を想定し, 充填高さが 1.9~2.5m に達する構造条件下において, 従来必要とされていた打設時の締固めを省略する点に着目した。特に, 横桁下フランジ下面のような締固めが困難な部位においても, SCC の自己充填性により十分な充填性と品質を確保したうえでの作業の効率化を目的とした。

また, 将来的な SCC の適用可能性を検証する目的で, 合成床版の実物大模型を用いた充填性確認試験を実施した。本試験では, 締固めを行わずに施工した場合における「多機能突起リブ」との付着性能に着目しており, 締固め作業の省力化および施工性の向上が期待された。

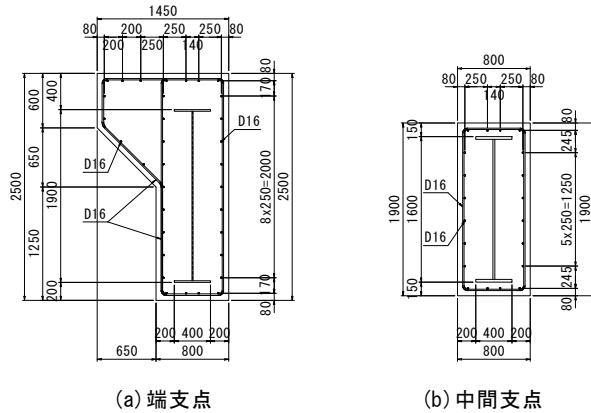
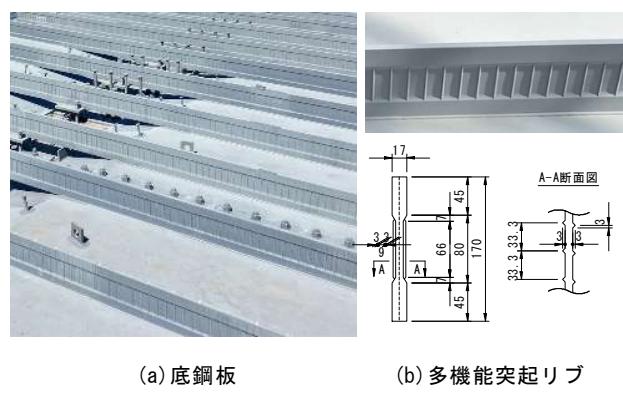


図 2 支点上横桁の巻き立てコンクリート断面



(a) 底鋼板 (b) 多機能突起リブ

写真 3 SC デッキスタッドレス

(3) 使用材料・配合・試験方法

使用材料を表 1 に示す。混和剤には, 高性能 AE 減水剤である「シーカビスコクリート GL6500」を使用した。この混和剤には特殊増粘剤が含まれており, 比較的少量の単位セメント量でも自己充填性を付与可能である。これにより, 高流動コンクリートと比べて低粘性でありながら分離抵抗性にも優れた SCC の実現が可能となる。

表 1 使用材料

| 種別 | 記号 | 産地・主成分等 |
|------|----|---------------------------------|
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント |
| 水 | W | 地下水 |
| 細骨材 | S1 | 南国市白木谷～高知市土佐山 |
| | S2 | 土佐市宇佐沖 |
| 粗骨材 | G | 南国市白木谷～高知市土佐山 碎石2005 |
| 混和剤 | SP | 高性能AE減水剤(製品名:シーカビスコクリートGL6500) |
| | AE | 空気量調整用AE助剤(製品名:シーカコントロール202AER) |

試験配合を表 2 に示す。Case-1 は, 高性能 AE 減水剤 (以下, SP) に空気量調整用 AE 助剤「シーカコントロール 202AER」を併用した標準的な配合であり, 巷き立てコンクリートに用いる従来の標準配合のセメント量 350kg/m³ よりも多い。Case-2 は, Case-1 と同一のセメント量としつつ, AE 助剤を增量した配合である。Case-3

から Case-8 は、経済性の向上を目的としてセメント量を削減し、SP の調整により性能の確保を図ったものである。Case-7 および Case-8 は、巻き立てコンクリートの標準配合を基に、混和剤を添加可能な上限まで增量し、練混ぜ時間を通常より長い 210 秒とした。他 Case は 120 秒で練混ぜを行っている。Case-3 から Case-6 は、Case-1, 2, 7, 8 の中間的な配合条件を示す。これら 8 Case の結果をもとに、実橋への適用に適した標準配合の検討を行った。

表 2 コンクリート配合

| Case | W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | |
|------|------------|------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------|
| | | | W | C | S1 | S2 | G | SP (C×%) |
| 1 | 42.0 | 55.0 | 175 | 417 | 544 | 439 | 810 | 1.35 |
| 2 | 42.0 | 54.8 | 175 | 417 | 536 | 427 | 810 | 1.30 |
| 3 | 43.0 | 55.0 | 175 | 407 | 539 | 432 | 810 | 1.30 |
| 4 | 44.5 | 55.2 | 175 | 393 | 536 | 427 | 810 | 1.30 |
| 5 | 44.8 | 50.8 | 175 | 391 | 504 | 401 | 891 | 1.39 |
| 6 | 44.8 | 55.3 | 175 | 391 | 547 | 438 | 810 | 1.60 |
| 7 | 49.0 | 56.0 | 175 | 357 | 563 | 451 | 810 | 1.65 |
| 8 | 49.0 | 56.0 | 175 | 357 | 563 | 451 | 810 | 1.85 |

試験項目、試験方法および目標値²⁾を表 3 に示す。本橋の巻き立てコンクリートの横断勾配が最大 3.0%，鉄筋のあきの最小値が 60mm であることを考慮し、スランプフローは 55 ± 7.5 cm、充填高さは 300mm 以上を目標値として設定した。

表 3 試験項目・試験方法・目標値

| 試験項目 | 試験方法 | 目標値 |
|---------------|---|--------------------------|
| スランプフロー | JIS A 1150(コンクリートのスランプフロー試験) | 55 ± 7.5 cm |
| 空気量 | JIS A 1128 (フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法) | $4.5 \pm 1.5\%$ |
| 塩化物量 | 北川式塩分検知管 (SL型) による | 0.30kg/m ³ 以下 |
| コンクリート温度 | JIS A 1156 により水銀温度計で実施 | — |
| 充填高さ | JSCE-F 511(高流動コンクリートの充填試験方法、流動障害 R ₂) | 300mm 以上 |
| 500mm フロー到達時間 | JIS A 1150 付属書 JA(コンクリートの 500mm フロー到達時間の測定方法) | 3~15 秒 |
| 漏斗流下試験 | JSCE-F 512(高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法) | 7~20 秒 |

(4) 試験結果

試験結果を表 4 に、試験状況を写真 4 に示す。スランプフローは全 8 Case において、目標値である 55 ± 7.5 cm の範囲内に収まった。ただし、Case-7 のみ 47.5cm と他 Case に比べて低い値を示した。これは、練混ぜ時間を通常より長く設定したことにより、粘性が増加したためと考えられる。一方、同様に練混ぜ時間が長い Case-8 では、混和剤の単位量を増加させたことで、スランプフローは他 Case と同等の値を示した。充填高さについては、Case-1, 2, 6 の 3 Case が目標値である流動障害 R₂ (鉄筋 3 本) で 300mm 以上を達成した。各 Case のうち、

Case-1 では空気量が目標値の $4.5 \pm 1.5\%$ を下回ったため、選定から除外した。基準を満たした Case のうち、Case-2 および Case-6 の 2 Case を標準配合の候補とした。さらに、両者のスランプフローはそれぞれ 58.8cm および 55.0cm であり、横断勾配が最大 3.0% である本橋の構造条件を考慮し、流動性がやや抑えられた Case-6 を標準配合として選定した。

表 4 試験結果

| Case | スランプフロー | | 空気量 (%) | コンクリート 温度 (°C) | 充填高さ | | 漏斗流下 試験 (秒) |
|------|-------------|-------------|------------|----------------------|------------|-------------|-------------------|
| | 測定値 (cm) | 到達時間 (秒) | | | 高さ (mm) | 停止時間 (秒) | |
| 1 | 56.0 | - | 2.8 | 29.0 | 300.0 | 25.0 | - |
| 2 | 58.8 | 5.1 | 4.5 | 30.0 | 310.0 | 24.0 | 10.9 |
| 3 | 54.8 | 8.0 | 4.9 | 30.0 | 250.0 | 28.1 | 13.0 |
| 4 | 53.5 | 7.0 | 4.9 | 30.0 | 290.0 | 27.0 | 12.4 |
| 5 | 53.0 | 10.1 | 3.0 | 24.0 | 80.0 | - | - |
| 6 | 55.0 | 9.0 | 4.2 | 25.0 | 320.0 | 24.5 | 16.7 |
| 7 | 47.5 | - | 4.2 | 25.0 | 290.0 | - | - |
| 8 | 58.0 | - | 6.9 | 25.0 | 295.0 | - | - |

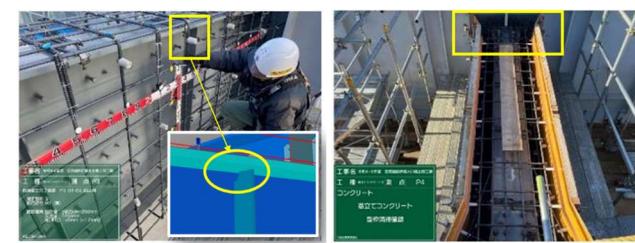


(a) スランプフロー (b) 充填高さ
写真 4 Case-6 の試験

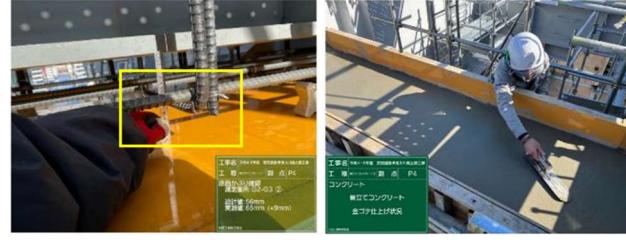
3. 実物大模型による充填確認試験

(1) 巷き立てコンクリートの充填性評価

巷き立てコンクリートの充填性を評価するため、実橋の構造を模擬した实物大模型を製作し、以下の①~⑥において写真 5 に示すような箇所に留意して試験を実施した。



(a) 横桁補剛材の取付け部 (b) 横桁の仕口部



(c) 横桁下フランジ下面 (d) コンクリート天端

写真 5 施工時に留意する箇所

- ①横桁の上フランジ・ウェブ・垂直補剛材の三面で囲まれた空気滞留部の充填性
- ②横桁の仕口部の充填性
- ③横桁下フランジ下面と型枠上面の狭隘部の充填性
- ④横断勾配に対する流動抵抗性
- ⑤天端仕上げ時の作業性
- ⑥打設側および流出側の充填高さ

1) 試験体および試験条件

試験体の構造詳細を図3に、組立状況を写真6に示す。巻き立てコンクリートの寸法は、幅800mm、長さ2000mm、高さ1000mmとし、鋼桁は上下フランジ幅400mm・板厚19mm、ウェブ高さ662mm・板厚19mmのI形断面とした。実橋の条件を再現するため、フランジ端部と側面型枠および下フランジ下面と下面型枠のあきを200mm、下フランジ下面と型枠のあきを150mmとした。垂直補剛材は幅120mm・板厚9mmの鋼板を2カ所に配置し、ずれ止めのスタッドは径φ19、横桁方向に300mm、高さ方向に250mm間隔で設置した。鉄筋はD16を用い、横桁方向に300mm、高さ方向に210mm間隔とし、かぶり56mmで配置した。

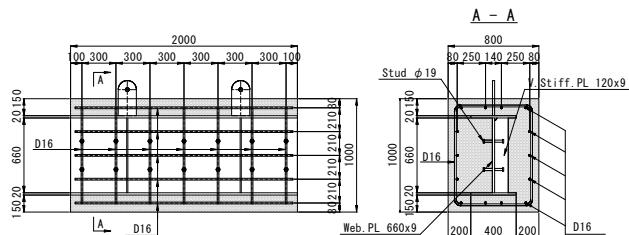
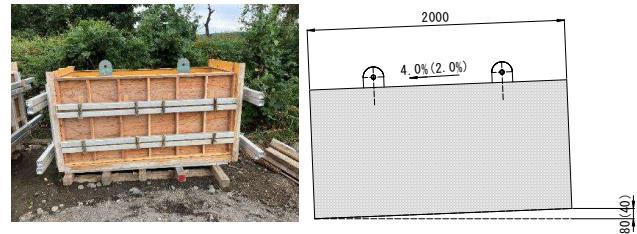


図3 巻き立てコンクリートの試験体



写真6 試験体の組立

試験体の設置状況および設計条件を図4に示す。試験は、横断勾配2.0%および4.0%の2Caseで実施した。打設は横桁断面の片側から行い、試験練りの結果からコンクリートの上昇高さを約300mmと想定し、進行状況を確認しながら両側打設へ切り替える方式とした。SCCの試験結果は1章の配合計画に基づき、表5に示す。スランプフローは49.8cmであり、目標の下限値47.5cmに近接していたが、充填高さは目標値である300mmを満足した。28日圧縮強度は50.7N/mm²であり、設計基準強度 $\sigma_{ck}=30N/mm^2$ を十分に上回る結果となった。



(a) 型枠設置 (b) 試験体の傾斜条件

図4 試験体の設置条件

表5 現場受け入れ時の試験結果

| W/C (%) | スランプフロー | | 空気量 (%) | コンクリート 温度 (°C) | 充填高さ (mm) | 漏斗流下 試験 (秒) |
|------------|-------------|-------------|------------|----------------------|--------------|-------------------|
| | 測定値 (cm) | 到達時間 (秒) | | | | |
| 1 | 44.8 | 49.8 | 10.0 | 4.7 | 24.0 | 301.0 |

2) 充填確認試験結果

(a) 充填高さの挙動

写真7に示すように、打設中のコンクリートは高い粘性を保ちながら横桁下フランジを通過し、粗骨材を伴って上昇する挙動を示した。充填高さは試験体中央および両端の3カ所で計測し、表6および図5に示すとおり、打設側の平均624mm、流出側の平均334mm、標高差290mmであった。横断勾配2.0%、4.0%のいずれにおいても充填高さに大きな差異は見られず、低勾配側への偏流は確認されなかった。なお、流出側の上昇速度が低下したため、途中から流出側からの直接打設に切り替えた。



(a) 打設中のコンクリート (b) 下フランジからの上昇
写真7 打設中のコンクリート

表6 充填高さの結果

| 横断勾配 (%) | (単位: mm) | | |
|-------------|-----------|-----------|--------------|
| | 打設側 H1 | 流出側 H2 | 標高差 H1-H2 |
| 4.0 | 606 | 351 | 255 |
| | 706 | 401 | 305 |
| | 596 | 291 | 305 |
| | 563 | 283 | 280 |
| 2.0 | 670 | 360 | 310 |
| | 605 | 320 | 285 |
| | 平均 | 624 | 334 |
| | | | 290 |

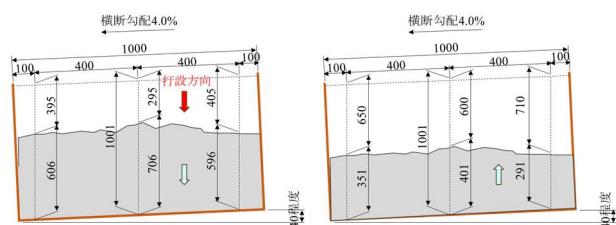


図5 充填高さの傾向 (横断勾配4.0%の場合)

(b) 天端仕上げの状況

打設後の天端仕上げ前後の状況を写真8に示す。外観は、特殊増粘剤を含まない普通コンクリートと比較しても遜色なく、金ごて仕上げにおいても良好な仕上がりが得られた。粘性が高くブリーディング水が少ないため、施工時の取扱いには若干の注意を要したが、横断勾配4.0%においても材料の偏流は生じず、設定勾配を維持することができた。

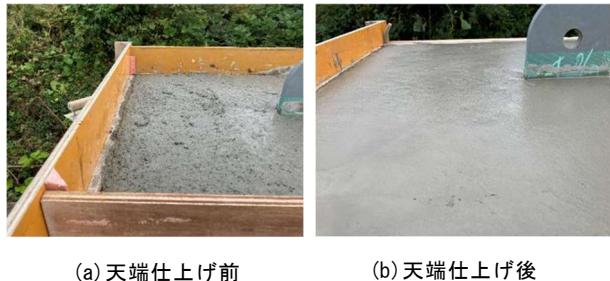


写真8 打設後のコンクリート天端

(c) 型枠撤去後の外観

型枠撤去後の外観を写真9に示す。コンクリート表面は滑らかで均質であり、型枠の形状が忠実に再現されていた。微細な気泡や凹凸は一部に認められたものの、全体として高品質な仕上がりであった。施工中には15~30分程度の打ち継ぎインターバルを設けたが、コールドジョイントの発生は確認されなかった。



写真9 型枠撤去後の試験体の外観

(d) 狹隘部の充填状況

図6に示すように、垂直補剛材から20mm離れた位置で試験体を輪切り状にワイヤーソーで切断し、狭隘部の充填状況を確認した。写真10に示すとおり、上フランジ・ウェブ・垂直補剛材に囲まれた空間および下フランジ下面と型枠のあき150mmにおいても、粗骨材が均等に分布しており、充填不足は認められなかった。

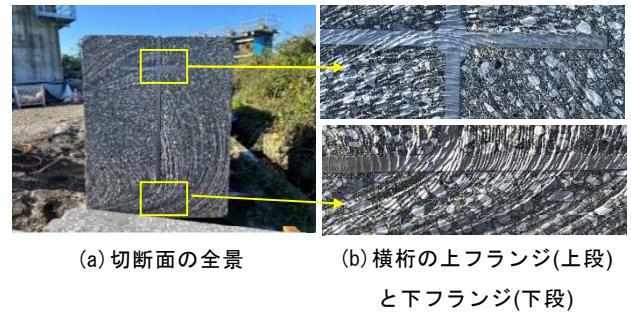
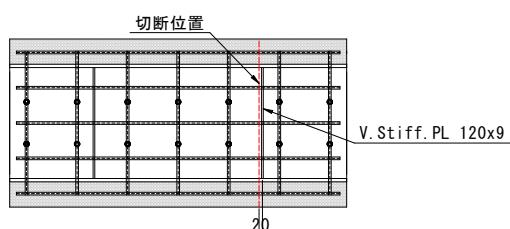


写真10 試験体切断面

(2) 合成床版の充填性評価

合成床版のコンクリート打設において、床版張出し部や排水枠部では床版鉄筋と壁高欄鉄筋が密に配置されるため、充填性の確保が課題となる。充填確認試験は、以下の点に留意して実施した。

- ①多機能突起リブとの密着性
- ②主鉄筋、配力鉄筋、壁高欄定着筋の密集部の充填性
- ③排水枠補強鉄筋を含む排水枠周辺の充填性
- ④横断勾配に対する流動抵抗性
- ⑤天端仕上げ時の作業性

1) 試験体および試験条件

試験体は、床版張出し部および排水枠設置部の実構造を模擬したものであり、その構造詳細を図7および図8に示す。床版張出し部の寸法は幅948mm、長さ2048mm、底鋼板厚9mmを含む合成床版厚260mmとし、多機能突起リブの形状は写真3(b)に示す。主鉄筋および配力鉄筋はD22を100mm間隔で配置し、端部には壁高欄定着筋D16を125mm程度の間隔で配置することで、鉄筋が密集した状態を再現した。写真11に示すように、横リブ直上の主鉄筋は、リブの中心線から50mm離れた位置に配置されている。このような配置においては、コンクリート打設時の充填性に対する影響が懸念されるため、施工時には十分な注意が求められる。

設置条件としては、図7の側面図に示すように、横断勾配2.0%および4.0%の2 Caseを設定し、傾斜条件下での充填性を評価する。排水枠設置部の試験体は幅1148mm、長さ1348mmとし、床版厚および多機能突起リブの構成は張出し部と同様とした。鉄筋構成も同様であり、排水枠設置に伴い切断された配力鉄筋の補強筋を追加配置し、過密な配筋状態を再現した。

なお、本試験体は排水枠周辺の充填性に着目しているため、図8に示すように設置勾配はLevelとし、使用したコンクリートは巻き立てコンクリートと同様である。

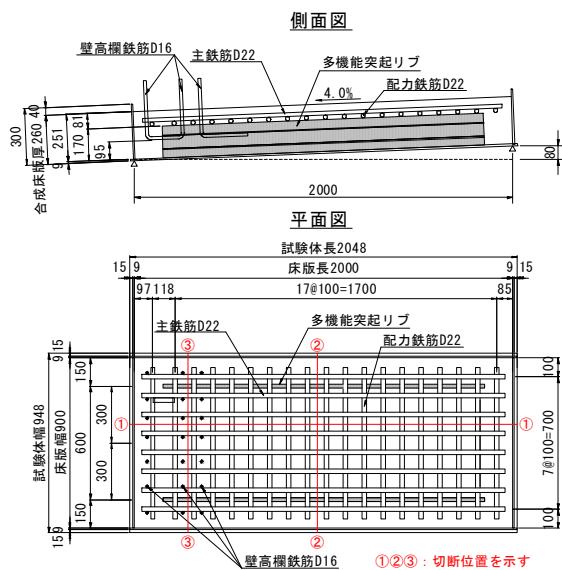


図 7 床版張出し部の試験体（横断勾配 4.0% の場合）

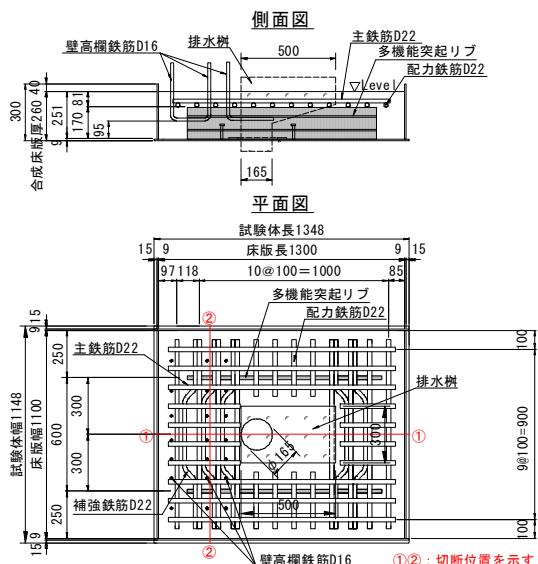


図 8 排水樹設置部の試験体

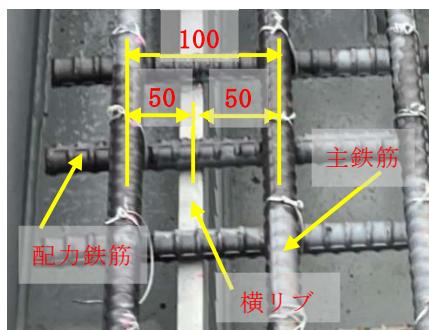


写真 11 横リブ上の配筋

2) 充填確認試験結果

(a) 充填状況の観察

打設時の状況を写真 12 に示す。特殊増粘剤の効果により粗骨材の分離は認められず、鉄筋間の狭隘部を通過して隅々まで良好に充填されたことを確認した。排水樹

設置部では、補強鉄筋の追加により文献²⁾に示される最小あき寸法 60mm を下回る箇所があったが、流動性の低下は観察されなかった。打設後の床版天端の状況を写真 13 に示す。横断勾配 4.0% の条件下において、低勾配側への材料偏流は生じず、均一な版厚を確保できた。天端仕上げにおいては、特殊増粘剤の使用量を通常より多くし粘性が高いため、普通コンクリートと比較して作業時間を要した。



(a) 床版張出し部 (b) 排水樹設置部

写真 12 コンクリート打設



(a) 天端仕上げ前 (b) 天端仕上げ後

写真 13 床版張出し部の打設後のコンクリート天端

(b) 試験体切断による内部充填状況の確認

図 7 および図 8 に示す切削位置の観察結果を写真 14 および写真 15 に示す。横リブ近傍において粗骨材が十分に行き渡っていることを確認でき、排水樹下端およびその周辺部の充填不足は認められず、自己充填性の有効性を確認できた。



(a) ①-①断面

(b) ②-②断面



(c) ③-③断面

写真 14 床版張出し部の切断面



(a) ①-①断面 (b) ②-②断面

写真 15 排水樹設置部の切断面

4. 自己充填コンクリートの実橋への適用

コンクリート配合の事前検討および実物大模型を用いた充填確認試験を経て、SCC を用いた支点上横桁の巻き立てコンクリートを実橋にて施工した。本橋の工事概要および施工内容および施工後の確認結果を以下に記載する。

(1) 工事概要

主な橋梁諸元を以下に示す。

工事名：令和4－6年度安芸道路伊尾木川橋上部工事

工期：2023年2月20日～2025年4月30日

形式：鋼5径間連続合成少数鉄桁橋（3主桁）

架設工法：トラッククレーンベント架設

床版形式：場所打ちPC床版（施工範囲外）

本工事は、受注者が施工段階において施工手順の工夫や省人化などに取り組む「生産性向上チャレンジ」の試行工事として位置付けられている。SCC の適用は、施工の省力化および品質の安定化を図るうえで有効な手段と考えられ、生産性向上の一環として実施した。

(2) 施工内容および施工後の確認結果

表 2 の Case-6 の配合計画に基づき、本施工ではポンプ車による圧送方式を採用したが、充填中に粗骨材のパイプ内蓄積や閉塞は発生せず、写真 16(a)に示すように、計画通りに打設を行うことができた。打設後の天端仕上げでは、時間の経過とともに、写真 16(b)に示すように、充填確認試験時と比較して多量のブリーディング水が発生した。これは、実橋の打設高さが 2.0m と高く、充填確認試験と比較して流動圧力が増加したことによるものと考えられる。型枠撤去後の端支点上および中間支点上横桁における外観状況を写真 16(c) (d) に示す。打ち継ぎ部におけるコールドジョイントの発生や表面の根痕は認められず、全体として高い施工品質と良好な外観性が確保された。また、結果として、巻き立てコンクリートの施工体積 50m³ に対して、締固め工において従来と比べて約 2.0 人工の省力化を図ることができた。



(a) コンクリート打設

(b) 天端仕上げ後



(c) 端支点上横桁

(d) 中間支点上横桁

写真 16 施工および型枠撤去後の外観

5. 今後の展望

巻き立てコンクリートについては、充填高さに応じた配合計画が不可欠であることを確認した。今後は、打設後の多量のブリーディング水を抑制し得る配合条件の最適化を検討する必要がある。一方、合成床版では、床版面積の拡大および施工の省力化を目的として、金ごてによる手作業に代わる機械仕上げの導入が有効である。高粘性かつ低ブリーディング性を有する SCC とトロウェル仕上げとの適合性を評価し、床版天端仕上げの作業性向上を検証する必要がある。以上より、仕上げ品質の確保は今後の施工管理における重要な検討課題である。

6. おわりに

本研究における SCC の配合設計、充填性確認試験および実橋への適用に際し、貴重なアドバイスをいただいた前川宏一東京大学名誉教授・横浜国立大学名誉教授および高知工科大学大内雅博教授に深甚なる謝意を表します。また、実橋への適用にご理解とご協力を賜りました国土交通省四国地方整備局土佐国道事務所の皆様に、ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会: 高流動コンクリートの配合設計・施工指針, 丸善, 2012.
- 2) 大内: フレッシュコンクリートの自己充填性評価システム, 東京大学博士学位論文, 1997.