

論文 高耐久性モルタルの狭隘部への圧入充填による施工性に関する研究

西澤 彩*1・川西 貴士*2・武田 篤史*3・石関 嘉一*2

要旨：高耐久性モルタルを狭隘部に圧入充填する施工においては、モルタルの十分な圧送性、充填性および流動性が重要となる。本研究では、まず高耐久性モルタルの管内圧力損失を明らかにした。次に、床版下面の厚さ 30mm の狭隘部へ圧入充填を行い、充填性および既設コンクリートとの高い付着性を確認した。さらに、夏期および冬期を想定した環境温度における、モルタルの流動性について検証した。35℃環境下では、攪拌を続けた場合に 2 時間流動性を保持でき、さらに流動化剤を添加した場合は、6 時間流動性を保持できることが分かった。5℃環境下では、モルタルフローに対する流動速度が低下することが分かった。

キーワード：圧送性、充填性、流動性、保持時間、温度、狭隘部、補修

1. はじめに

高度経済成長期に建設された栈橋構造物の多くが、塩害により劣化しており、修繕のニーズは多い。一般に、塩害による劣化が生じた場合、構造物の取り替えや、劣化部の断面修復を行う。しかし、栈橋は重要な物流拠点である場合が多いため、修繕頻度の低減および供用の継続が求められる。

修繕頻度を低減するためには、高耐久性材料を用いた改修を行い、耐用年数を長くすることが有効である。特に栈橋下面は早期に劣化しやすく、改修に要する仮設備も高コストとなるため、修繕頻度を低減することで、ライフサイクルコストの削減が可能になる。加えて、高耐久性材料を用いることで、塩害に対して必要なかぶり厚さを低減でき、材料コストを低減することも可能である。

また、栈橋上を供用しながら構造躯体を補修するためには、栈橋下面からの施工が有効である。栈橋下面での作業は、干潮時の限られた時間で行い、地上での作業は、最小限のヤードで行う必要がある。

そこで、栈橋下面のかぶり部に高耐久性モルタル（以下、本モルタル）を下面から圧入充填することで、栈橋上面を供用しながら、構造物を高耐久化することを検討したり。しかし、適用にあたり、3つの課題があった。1つは、圧送に際して、低水粉体比で粘性の高い本モルタルの管内圧力の指標がないことである。2つ目は、充填性の確保である。狭隘部に下面から圧入充填する場合、上部のコンクリート床版との境界面に空気が滞留し、未充填が生じる懸念があった。3つ目は、フレッシュ性状の確保である。低水粉体比の本モルタルの製造にかかる時間は、一般のコンクリートよりも長い。また粘性の高いモルタルを狭隘部に圧入充填する場合、充填に多くの時間を要する。そのため、JIS A 5308 では練混ぜ開始か

ら荷卸しまでの時間の限度は、原則 1.5 時間以内と定められているが、本モルタルを用いた圧入充填においては、練上がりから 3 時間程度、モルタルの流動性を保持する必要があった。一般的にモルタルの流動性およびその保持時間は、環境温度の影響を大きく受けるため、高温および低温環境下における流動性の保持が課題であった。

本研究では、まず圧送実験により、本モルタルの管内圧力損失を明らかにした。次に、実構造物を模擬した床版下面への圧入充填実験を行い、充填性および既設コンクリートとの付着性を検証した。さらに、夏期施工を想定した 35℃環境下、および冬期施工を想定した 5℃環境下でのモルタルの流動性の保持時間を検証し、その対策についても検討した。

2. 圧送性

補修工事においては、吐出量が小さく省スペースの小型のポンプや、機動性向上のために配管径の小さい圧送システムが求められることが多い。しかし、水粉体比が極めて小さい材料は、粘性が高いため、圧送負荷が増大する。コンクリートのポンプ施工指針では、圧縮強度が 120N/mm²程度、水粉体比が 20% 以上のコンクリートに関する記述は多く認められる²⁾。しかし、さらに高強度で低水粉体比のコンクリートを用いた、吐出量 10m³/h 以下の小規模圧送に関する実験報告は少ない。そこで、小型の圧送システムを考慮して、スクイーズ式ポンプによる圧送実験を行い、本モルタルの圧送における、管内圧力損失と吐出量の関係を明らかにした。

2.1 圧送実験方法

圧送実験の使用機材および圧送条件を表-1に示す。ホース径 50A(52.9mm)の耐圧ホースを用いて、圧送距離を 20, 40, および 50m の 3 水準に変化させた。ポンプの吐出圧力を 1.5MPa および 1.8MPa の 2 水準として、管内圧力

*1 株式会社大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 修士（工学）（正会員）

*2 株式会社大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*3 株式会社大林組 技術本部技術研究所 構造技術研究部 主任研究員 博士（工学）（正会員）

表-1 圧送実験の使用機材および圧送条件

モルタルポンプ	スクイーズ式ポンプ (最大吐出圧力：2.5MPa, 吐出量：最小50L/min, 最大100L/min)
ホッパー	スクリュウ式ホッパー
圧力計	フラッシュダイアフラム型圧力計 (最大圧力5MPa)
モルタルホース	耐圧ホース (内径50A(52.9mm))
圧送距離(m)	20, 40, 50
ポンプの吐出圧力(MPa)	1.5, 1.8

表-2 モルタルの配合

水粉体比 (%)	単体量 (kg/m ³)			混和剤 添加量 (kg/m ³)	混和剤 添加率 (P×%)	繊維 添加率 (vol. %)
	W	P	S	SR	SP	NF
W/P	水	プレミックス粉体	細骨材	収縮 低減剤	高性能 減水剤	ナイロン 繊維
12.6	230	1830	331	20	1.175	0.3

表-3 品質管理項目および品質試験結果

品質管理項目	モルタル フロー (0打)	空気量	練上がり 温度	圧縮強度 (標準養生 材齢28日)
	JIS R 5201	JIS A 1128	JIS A 1156	JIS A 1108
品質管理値	290±30mm	3.5%以下	10℃以上	150N/mm ² 以上
試験結果	306mm	2.0%	26℃	197N/mm ²

と吐出量を測定した。管内圧力は、フラッシュダイアフラム型圧力計を用いて、動ひずみ計により測定した。時間当たりの吐出量は、3Lのモルタルが排出される時間を3回測定し、その平均で算出した。その結果から、圧送距離と吐出量の関係、および吐出量と管内圧力損失の関係を整理した。なお、実験は20℃の室内で行った。

2.2 モルタルの配合と品質試験結果

本モルタルの材料には、プレミックス粉体、細骨材、収縮低減剤、高性能減水剤、ナイロン繊維を使用した。プレミックス粉体は、反応速度が速いエーライト(C₃S)量が多いセメントであり、常温養生で早期に強度が発現することを特徴とする。それにより、本モルタルは高耐久性を確保しつつ、現場での打込みを可能にした。モルタルの配合を表-2に示す。品質管理項目および品質試験結果を表-3に示す。狭隘部への高い充填性を得るために、モルタルフローの管理値は290±30mmとした。モルタルの粘性の評価として、モルタルフローの経過時間を計測したところ、250mmフロー到達時間は15.7秒、フロー停止時間は2分30秒であった。一般的な高流動モルタルと比較して、粘性が高いことが分かる。

2.3 練混ぜ方法

練混ぜは、二軸強制練りミキサ(公称容量100L)を用いて行い、1バッチの練混ぜ量は80Lとした。ミキサに

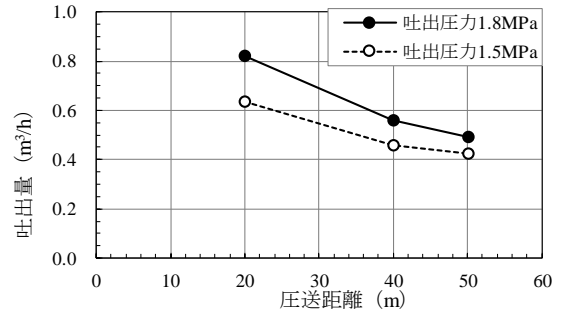


図-1 圧送距離と吐出量の関係

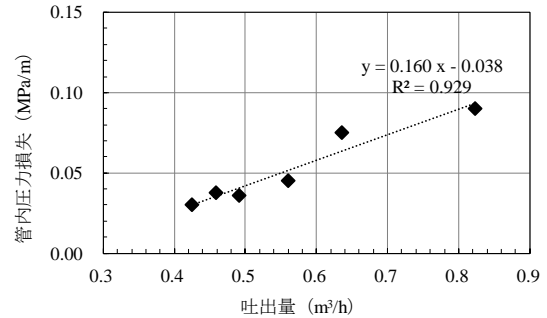


図-2 吐出量と管内圧力損失の関係

プレミックス粉体および細骨材を投入し、30秒間の空練りを行ったのち、水および混和剤を投入し、15分間練り混ぜた。繊維を投入し、さらに1分間練り混ぜた。

2.4 圧送実験の結果および考察

圧送距離と吐出量の関係を図-1に示す。圧送距離の増加に伴い、吐出量が小さくなり、圧送距離が長いほど、ポンプ吐出圧力の違いによる吐出量の差は小さくなる傾向であった。次に、吐出量と管内圧力損失の関係を図-2に示す。管内圧力損失は、ポンプ吐出圧力を圧送距離で除して算出した。吐出量と管内圧力損失は概ね線形関係を示した。ポンプ施工指針に記載の配管の内径および吐出量とは大きく異なるが、吐出量と管内圧力損失が相関関係にあることは、スランプ12cmの普通コンクリート²⁾と同様であった。

3. 狭隘部への充填性および付着性

本モルタルは、塩分の浸透に対して著しく高い耐久性を有する。そのため、塩害に対する耐久性を確保するためのかぶり厚さを低減できる。塩害に対する耐久性および狭隘部への充填性を考慮して、本モルタルを用いた補修厚さは30mmに設定した。狭隘部への充填性および付着性を検証するため、厚さ30mmのかぶり部に、本モルタルを下面から圧入充填し、その充填性および既設コンクリートとの付着性を検討した。

3.1 圧入充填実験方法

圧入充填実験の概要を図-3に示す。既設の床版コンクリートを模擬した試験体の下面を、チップングにより

10mm程度の凹凸で目粗しし、吸水調整剤を塗布した。床版下面のチッピング面から30mmの位置に幅1.2m、長さ4.5mの亚克力型枠を設置した。下面型枠の中心に圧入孔を設け、下面型枠の四隅に空気抜き孔としてグラウトホースを設置した。

モルタルの圧入は、2章と同じスクイズ式ポンプおよび、ホース径50Aで長さ10mの耐圧ホースを用いて行った。厚さ30mmの狭隘部に充填するため、圧入孔に高い圧力でモルタルを充填すると、型枠が変形する恐れがあった。そのため、圧入孔手前の管内圧力が約0.1MPaとなるよう、ポンプ吐出圧力を調整し、約0.7MPaとした。なお、実験は、雰囲気温度 30℃の環境下で行った。

3.2 モルタルの配合と品質試験結果

モルタルの配合は2.2節と同じであり、高性能減水剤の添加率も同様に、粉体に対して1.175%とした。練混ぜ方法は2.3節と同様であり、4バッチ練り混ぜた。品質試験結果は、1バッチ目を抜粋し、モルタルフローが313mm、空気量が3.3%、練上がり温度が33℃であった。2バッチ目以降も同等の品質試験結果であることを確認した。

3.3 圧入充填実験の結果および考察

(1) 圧入充填状況

床版の側面および下面の亚克力型枠から目視で確認したところ、圧入孔から両側に均等に流動しており、4.5m×1.2m×厚さ30mmの狭隘部に、管内圧力が大きく変動することなく充填できた。床版側面に設置した亚克力型枠内のモルタルの充填状況を写真-1に示す。モルタルが上部の床版コンクリートに接した点から、流動するモルタルの先端までの距離は約600mmであり、流動勾配は約5%であった。圧入開始から30分後に、四隅すべての空気抜き孔からモルタルが排出したことを確認し、圧入を完了した。ポンプの吐出圧力が0.7MPaで、圧入孔の管内圧力が0.1MPa、圧送距離10mの場合の管内圧力損失は0.06MPa/mであり、吐出量は約0.32m³/hであった。2章の図-2と比較すると、同一吐出量に対する管内圧力損失は3倍程度大きい。これは、モルタルを自由空間に排出する場合に比べて、狭隘部に圧入する場合は、管内圧力が高まったことが原因であると考えられる。

(2) 充填性

本モルタルの充填性を確認するため、材齢4日に、床版の長辺側を端部から0.3mの位置で切断した。切断面の一部を写真-2に示す。床版コンクリートと本モルタルの界面の充填性に着目し、界面の空隙長さの割合を充填率として評価した。充填率は、床版コンクリートと本モルタルの界面に生じた空隙の長さ(1mm以上)を測定し、その総和を全長4.5mから除いた長さを、全長4.5mで除して算出した。

写真に示すように、本モルタルは、厚さ30mmの空間に

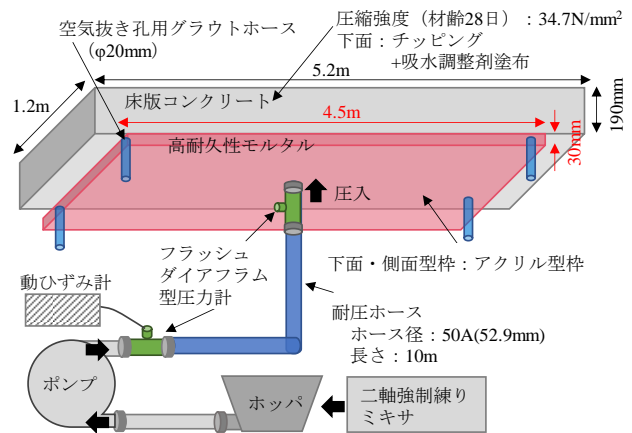


図-3 圧入充填実験の概要(見上げ図)

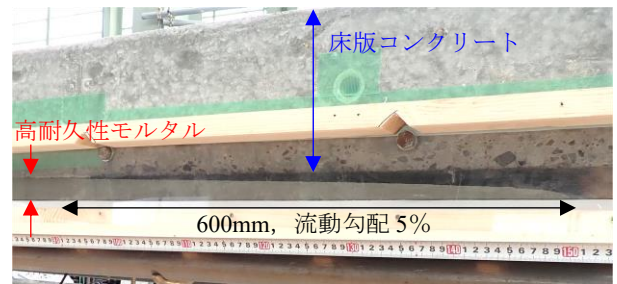


写真-1 充填状況(床版の側面部, 圧送開始 20 分後)

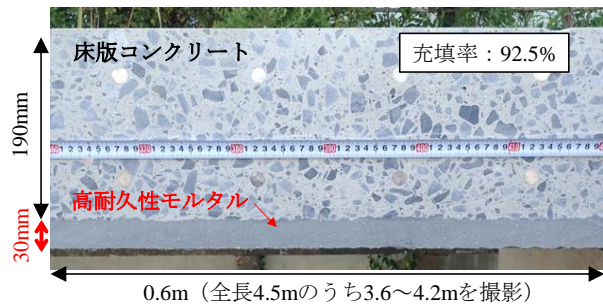


写真-2 床版の切断面(長辺側面部)

密実に充填できており、床版コンクリートとモルタルの界面に空隙が少なく、充填率は92.5%であった。本モルタルは狭隘部に充填できる流動性と適度な粘性を有しているため、空気泡の滞留を抑制できたと考えられる。

(3) 付着性

直接引張試験により本モルタルと床版コンクリートとの付着性を評価した。床版長辺の端部から直径100mmのコアを10点採取し、コアの両端部に治具を接着した。材齢11週に、引抜試験装置を設置した油圧式万能試験機を用いて、載荷速度0.06±0.04N/mm²で直接引張試験を実施した。

試験状況および試験体の破壊状況を写真-3に示す。引張強度の平均は2.3N/mm²であった。破壊状況は、いずれの試験体も母材コンクリートの破断であり、本モルタルとの界面での破壊は認められなかった。そのため、本モルタルの引張強度は、母材コンクリートの引張強度に

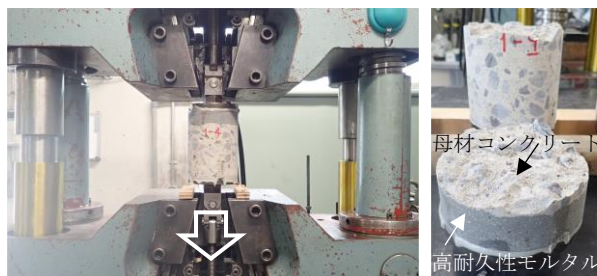


写真-3 直接引張性試験の状況(左), 破壊状況(右)

上であり、高い付着性を有する。本モルタルと床版コンクリートの一体性が確保されることを確認した。これは、モルタルの水粉体比が小さく、適度な粘性で密実に充填できたことにより、高い付着性が得られたと考える。

4. 異なる環境温度におけるモルタルの流動性

狭隘部に圧入充填する場合、モルタルの流動性およびその保持時間が重要である。しかし、一般的にモルタルの流動性およびその保持時間は、環境温度の影響を大きく受ける。そこで、夏期および冬期施工を想定した、異なる環境温度におけるモルタルの流動性の経過時間変化を検証した。

4.1 環境温度条件

環境温度条件の一覧を表-4に示す。室温 35℃, 20℃ および 5℃の環境下で材料の保管, 練混ぜ, 静置を行った場合の, 経過時間に伴うモルタルの流動性の変化を計測した。なお, モルタルの練上がり温度から, 温度低下の勾配が大きい場合の流動性の変化を確認するため, 室温 20℃で練混ぜを行い, 練上がり直後から 5℃環境下で経過時間変化の測定を行った場合も比較した。

4.2 配合および練混ぜ方法

使用材料および配合は, 2.2 節と同様とした。ただし, 高性能減水剤の粉体に対する添加率は, 所定の流動性を得るため, 練混ぜ試験室温が 35℃の場合に 1.1%, 20℃の場合に 1.175%, 5℃の場合に 1.2%とした。練混ぜは, 二軸強制練りミキサ(公称容量 60L)を用いて行い, 1バッチの練混ぜ量は 50L とした。練混ぜ手順は 2.3 節と同様に行った。

4.3 流動性の測定方法

練上がり後, 練り船に排出して, 水分逸散を防止するために表層をビニールで覆った。練上がりから 1 時間ごとにスコップで練返しを行ったのち, モルタルフローおよび 250mm フロー到達時間を測定して, 流動性の経過時間変化を測定した。250mm フロー到達時間は, モルタルの流動速度, すなわち粘性の評価指標とした。

4.4 フレッシュ品質試験結果

練上がり直後のモルタルの空気量は, 練混ぜ試験室温が 35℃の場合に 2.8%, 20℃の場合に 3.1%, 5℃の場合に

表-4 環境温度条件

凡例標記	△	□	○	◇
材料保管温度, 練混ぜ試験室温	35℃	20℃	20℃	5℃
モルタル静置温度(経 過時間変化測定温度)	35℃	20℃	5℃	5℃

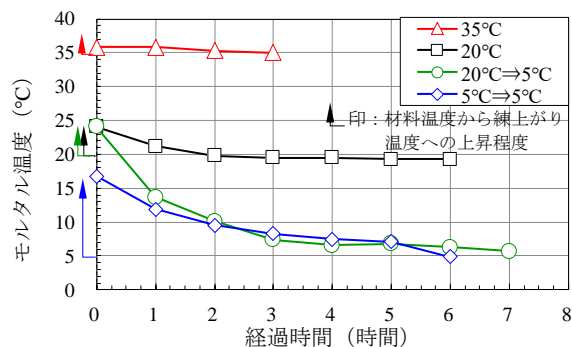


図-4 モルタル温度の経過時間変化

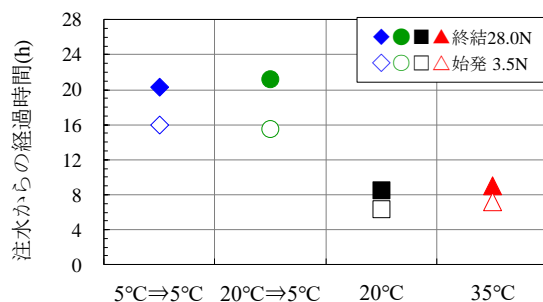


図-5 凝結時間

3.4%であった。

モルタル温度の経過時間変化を図-4に示す。材料温度と練上がり温度の上昇程度は, 材料温度が低いほど大きい結果となった。また, 静置温度が 5℃の場合, 練上がり温度の違いによらず, 練上がりから 1 時間で急激に温度が低下した。

JISA 1147 に従い, 凝結時間を測定した結果を図-5に示す。練混ぜ試験室温 20℃に比べて, 練混ぜ試験室温が 5℃の場合は凝結の始発時間が約 2.1 倍に遅延し, 凝結の始発から終結までの時間も約 2 倍に増加した。練混ぜ試験室温 20℃で静置温度が 5℃の場合は, 練混ぜおよび静置温度ともに 5℃の場合の凝結時間と同程度であった。練混ぜ試験室温 35℃の場合は, 20℃の場合と同程度の凝結時間であった。

4.5 流動性の経過時間変化の結果及び考察

モルタルフローの経過時間変化を図-6に, 250mm フロー到達時間の経過時間変化を図-7に示す。35℃環境下の場合, 20℃の場合に比べて早期に流動性が低下し, 練上がりから 2 時間以内にモルタルフローが 260mm を下回った。経過時間に伴い粉体の BET 比表面積が増加す

ることが一要因として考えられるが³⁾、今回の実験では、凝結時間が20℃環境下の場合と同等であることから、要因について、今後検討が必要である。

練混ぜ試験室温20℃で静置温度5℃の場合のモルタルフローの低下は、練混ぜおよび静置温度が20℃の場合と同程度であったが、250mmフロー到達時間は増大した。これは、モルタル温度が低いほど、降伏値に対する塑性粘度の増加割合が大きいことが原因と考えられる⁴⁾。

練混ぜ試験室温5℃で静置温度5℃の場合、練混ぜ試験室温20℃で静置温度5℃の場合と比較して、より短い時間でモルタルの流動性が低下した。これは、練混ぜ時の環境温度が低いほど、高性能減水剤の初期の吸着量が少ないため⁴⁾、その保持性も小さいことが考えられる。

以上により、夏期の35℃環境下の場合、静置したモルタルは、練上がりから2時間以内に流動性が低下し、圧送が困難になる可能性があるため、流動性保持の対策が必要である。また、冬期の5℃環境下の場合、モルタルフローに対する流動速度が低下するため、圧送時の吐出圧力の管理に留意し、吐出圧力の高いポンプなどの機材の選定を行う必要がある。

5. 流動性の保持時間の向上

4章で35℃環境下において流動性が早期に低下することが分かった。そこで、流動性の保持時間の向上を目的に、トラックアジータのドラム内でモルタルを長時間攪拌した場合を想定し、傾胴形ドラムミキサで低速で攪拌を続けた場合と、静置した場合とを比較した。さらに流動化剤を添加した場合を比較し、モルタルの流動性の経過時間変化および圧縮強度への影響を検証した。

5.1 配合および練混ぜ方法

配合は、4.2節と同じであり、高性能減水剤の粉体に対する添加率も4.2節と同じ1.1%とした。練混ぜ方法も、4.2節と同様とした。

5.2 流動性の保持時間の測定方法

練り上がったモルタルを、傾胴形ドラムミキサ（公称容量80L）に投入し、33秒/回転の速度で回転させた。傾胴形ドラムミキサの投入口は、水分逸散を防止するためにビニールで覆った。練上がりから1時間ごとに回転を停止し、モルタルフロー試験を実施した。

流動化剤を添加するケースでは、添加する前のモルタルフローが280mm以下になった場合に、流動化剤を添加することとした。流動化剤には、本モルタルに使用している高性能減水剤を使用した。流動化剤の1回の添加量は、モルタルのプレミックス粉体に対して0.05%とした。モルタル1m³あたりの添加量は0.9kgであり、単位水量に対しては0.4%とごく少量であることから、モルタルの品質に及ぼす影響は小さいと判断した。傾胴形ドラ

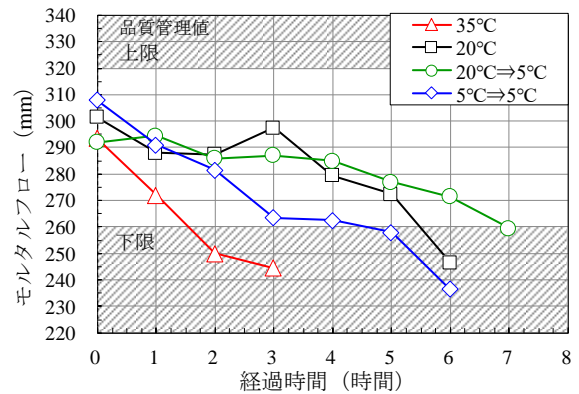


図-6 モルタルフローの経過時間変化

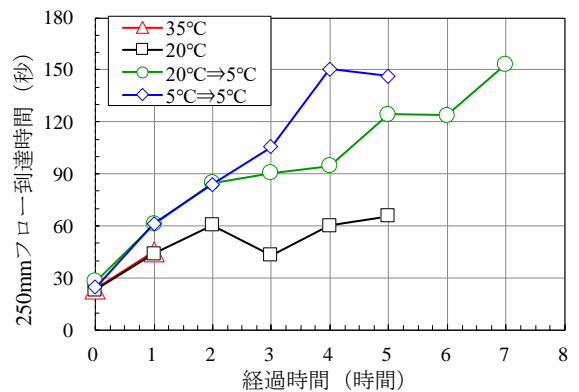


図-7 250mmフロー到達時間の経過時間変化

ムミキサ内に流動化剤を添加したのち、33秒/回転の速度で2分間攪拌し、さらに2分間静置し、添加後のモルタルフローを測定した。

5.3 流動性の保持時間の結果および考察

モルタルフローの経過時間変化を図-8に、250mmフロー到達時間の経過時間変化を図-9に示す。35℃環境下において、傾胴形ドラムミキサ内で回転させた場合は、静置した場合に比べて流動性の保持時間が増加し、3時間程度流動性を保持できることが分かった。練上がりから5時間後に、モルタルフローが260mmを下回った。

練上がりから2時間および5時間後に流動化剤を添加した場合、練上がりから6時間モルタルフローが280mm以上であり、250mmフロー到達時間も大きく増大することなく高い流動性を保持できた。練上がりから7時間後に試験を終了し、モルタルの空気量を測定したところ、3.5%以下であった。空気量はモルタルを長時間攪拌しても、所定の品質を満足することを確認した。

実施工においては、ホップ内で静置せず、ホップ内で攪拌することや、ドラム内で攪拌を続けることで、夏期の35℃環境下においても、施工に要する時間に対して、流動性を十分保持できることが分かった。

5.4 圧縮強度試験結果

練上がり直後および練上がりから2時間、4時間、5時

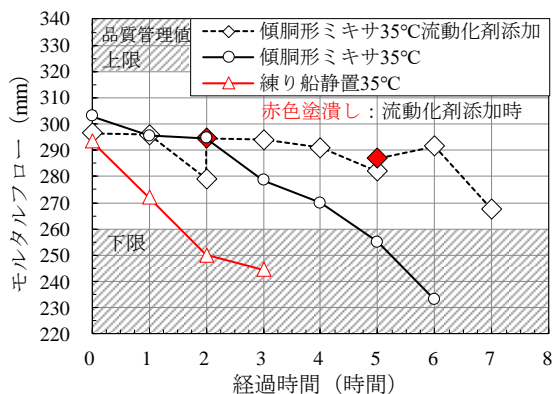


図-8 モルタルフローの経過時間変化

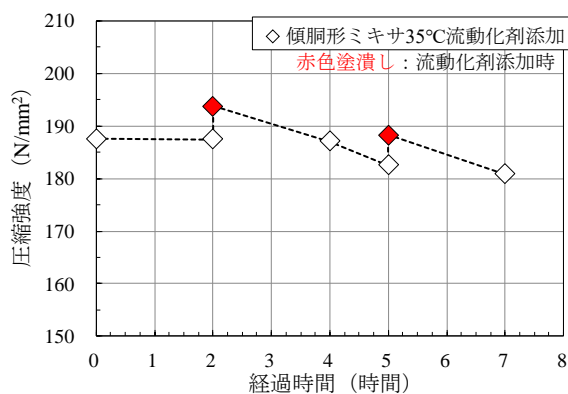


図-10 圧縮強度試験結果

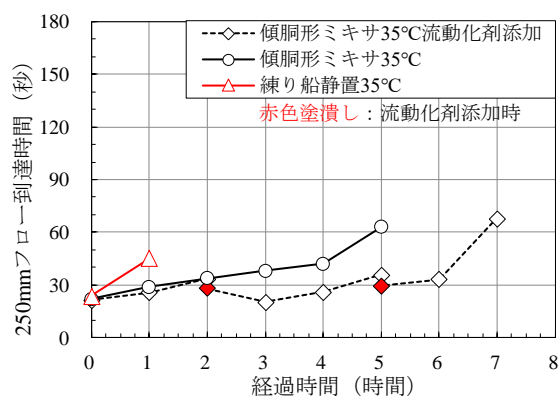


図-9 250mm フロー到達時間の経過時間変化

間、7時間後に円柱供試体（直径 50mm×高さ 100mm）を 3 本採取し、標準養生材齢 28 日で圧縮強度試験を行った。流動化剤を添加した場合は、添加する前に 3 本供試体を採取し、添加後さらに 3 本供試体を採取して、添加前後の圧縮強度を比較した。

圧縮強度試験結果を図-10 に示す。練上がり直後に採取した試験体の圧縮強度と比較して、練上がりから 7 時間までに採取した試験体の圧縮強度は、経過時間で緩やかに低下したが、いずれも 180N/mm² 以上であった。

流動化剤を添加した場合は、添加する前に比べて、圧縮強度が 6N/mm² 程度向上した。流動化剤を添加したことでモルタルの流動性が向上し、圧縮試験体採取時の巻き込み空気量が低下したことが考えられる。

6. まとめ

本研究では、栈橋上面を供用しながら、栈橋下面を補修し、高耐久化することを目的として、栈橋下面のかぶり部に高耐久性モルタルを圧入充填する工法を検討した。高耐久性モルタルの圧送性および充填性、流動性の保持の 3 つの課題について検証し、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 低水粉体比の超高強度の本モルタルを用いた、吐出量 10m³/h 以下の小規模圧送において、吐出量と管内圧

力損失は線形関係を示した。

- 2) 床版下面の 4.5m×1.2m×厚さ 30mm の狭隙部に下面から高耐久性モルタルを圧入充填した結果、充填率は 92.5% であり、密実に充填できることを確認した。
- 3) 圧入充填した試験体を用いて、直接引張試験を行った結果、いずれの試験体も母材破断であり、高い付着性が得られた。高耐久性モルタルと既設コンクリートの一体性が確保されることを確認した。
- 4) 5°C 環境下では、モルタルフローに対する流動速度が低下した。そのため、圧送時の吐出圧力の管理に留意し、適切なポンプ機材の選定を行う必要がある。
- 5) 35°C 環境下において、傾胴形ドラムミキサ内で回転させた場合は、2 時間程度流動性を保持した。さらに流動化剤を添加した場合は、6 時間程度流動性を保持できた。モルタルをドラム等で攪拌し、さらに流動化剤を添加することで、施工に要する時間に対し、十分に流動性を確保できることが分かった。

謝辞

本実験の推進にあたり、宇部興産(株)の皆様にご協力頂きました。感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西澤彩, 他: 薄肉断面への充填を可能とした高耐久性モルタル「スリムフローグラウト™」の開発と適用, 大林組技術研究所所報, 2020
- 2) 土木学会: コンクリートのポンプ施工指針, No.135, pp.17-76, 2012
- 3) 柳澤太一, 山田一夫, 羽原俊祐, 須藤俊吉: 練混ぜ温度が高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響の作用機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.547-552, 1999
- 4) 笠井哲郎: 高流動コンクリートを構成するフレッシュセメントペーストのレオロジー特性に及ぼす温度の影響, 材料, Vol.45, No.2, pp.230-234, 1996