

論文 初期反応促進型膨張材を用いたコンクリートによる床部材の施工および品質の評価

竹下 永造*1・河野 豊弘*2・有馬 冬樹*3・長塩 靖祐*4

要旨：低温下では、コンクリートの施工性や仕上がり性が環境温度に大きく左右される。これは、低温環境におけるコンクリートの特性として、ブリーディングが多くなること、さらには、凝結時間が長くなることに起因している。そこで、低温環境下の床部材施工におけるブリーディングの低減および凝結時間の短縮化、さらには、コンクリートの品質向上を目的として、初期反応促進型膨張材をコンクリートへ使用し、その評価を実施した。その結果、本材料を用いることで、仕上げ等を含めた施工の早期化が図れること、また、生産性向上に期待ができること、最後に、コンクリートとしての品質が向上することが分かった。

キーワード：初期反応促進型膨張材、ブリーディング、凝結時間、施工性

1. はじめに

近年、「ICTの全面的な活用」等の施策を建設現場に導入することによって、建築生産システム全体の生産性向上を図り、もって魅力ある建設現場を目指す取組みであるi-Constructionが進められている。さらに、少子高齢化社会を迎え、建設現場においても、働き手の減少はもとより、熟練工である工事技術者の大量退職、さらには技術伝承の受け皿となるべき若手不足などの課題が浮き彫りになってきたことを受け、材料、機械、施工など様々な方面から、コンクリート工の生産性向上のためのアプローチや取組みが実施されている。例えば、コンクリート床部材においては、床施工ロボットを用いたコンクリートの自動化施工¹⁾が試験的に導入されつつあり、人手不足を補う省力化へ向けた取組みがなされている。また、ICタグやスマートセンサ等をコンクリートに適用し²⁾、リアルタイムにコンクリート温度やコンクリートのひずみが得られることで、施工の見える化が図られることになり、熟練工事技術者に頼らないコンクリートの品質確保が可能となる取組みも徐々に増えつつある。

このような背景の中、寒冷地におけるコンクリート施工に着目し、生産性向上を図った取組みがなされている。まず、折田ら³⁾は、耐寒促進剤を用いることでコンクリートの仕上げ短縮時間に効果があり、促進剤の特性を把握することで、有効に活用できる可能性があるとの報告がなされている。次に、石井ら⁴⁾は、生コン工場ではなく、現場で簡易に添加できる凝結時間の調整が可能な混和材を検討し、凝結時間促進に効果があり、かつ、現場での添加容易性も有効であったとの報告がなされている。最後に、井元ら⁵⁾は、冬期においてC-S-H系早強剤を

使用したFAコンクリートの施工性および硬化性状について、室内試験および実機練り試験施工により評価を行い、ブリーディングを大幅に低減し、かつ、凝結時間を著しく促進させ、その影響で強度発現性についても向上させることが分かったとの報告がなされている。

しかしながら、これら材料の多くは、ブリーディングを低減し、かつ、凝結時間を促進することを主としたものであり、施工時間の短縮は期待できるものの、硬化コンクリートの品質への影響については不明な点が多い。また、このような材料を用いた大規模モックアップ試験や実現場への適用による評価によって、総合的な判断をした事例は少ないのが現状である。

そこで、本論文では、低温環境下の床部材施工におけるブリーディングの低減および凝結時間の短縮化、さらには、コンクリートの品質向上を評価することを目的として、汎用的な膨張材とは違い、セメントの初期反応を促進させる効果を付与した膨張材を用いたコンクリートの検討を実施した。まず、室内試験により基本特性を確認し、その後、本材料の使用有無を水準としたデモ施工による効果の検証、さらに、床フロア全面となる現場実施工を評価し、それら結果をまとめて報告する。

2. 室内試験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

表-1に使用材料を示す。また、表-2にコンクリートの配合を示す。膨張材は石灰系の初期反応促進型膨張材（区分：膨張材30型）を細骨材置換にて25kg/m³使用した。コンクリートの配合については、水セメント比は55%と設定し、目標スランプは15±2.5(cm)、目標空気量は4.5

*1 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 工修（正会員）

*2 大和ハウス工業株式会社 本社 法令遵守・品質保証推進本部 品質保証部 建築グループ（非会員）

*3 大和ハウス工業株式会社 本社 法令遵守・品質保証推進本部 品質保証部 建築グループ（正会員）

*4 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 工博（正会員）

±1.5%)と設定した。使用した AE 減水剤はリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体を主成分としたもので、粉体量 $P=(C+EX)$ に対して 0.6%添加した。また、AE 剤は変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分としたものを使用し、セメント(C)に対して 0.35%添加した。

2.2 試験水準

表-3 に試験水準を示す。試験水準は、膨張材の混和量 (0, 25kg/m³)、および、環境温度 (5, 10, 20℃) とした。ここで、環境温度の水準は、本材料の適用範囲を 5～20℃と設定していることより定めた。

2.3 評価内容および試験項目

表-4 に評価内容および試験項目を示す。ここで、ブリーディング試験については、環境温度の違いを考慮可能な JCI S 015 (小型容器によるコンクリートのブリーディング試験方法) により実施した。また、拘束膨張試験については、本材料の特性値を評価するため、環境温度 20℃での試験とした。

3. 室内試験結果

3.1 フレッシュ性状への影響

表-5 にフレッシュ性状試験結果を示す。表より、膨張材の有無や環境温度によらず、混和剤の調整で所定の性能が得られていることが分かる。これにより、初期反応促進型膨張材を用いることによるフレッシュ性状への影響はないものと考えられる。

3.2 初期反応促進効果

図-1～図-2 にブリーディング試験結果を示す。また、図-3～図-4 に凝結時間試験結果を示す。図より、環境温度によらず初期反応促進型膨張材を用いることで、ブリーディング率が小さくなり、かつ、その終了時間が早期化していることが分かる。また、始発および終結のどちらの凝結時間も短縮化しており、本材料により初期反応促進効果が得られたものと考えられる。

3.3 コンクリートの品質

図-5 にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。また、図-6 に拘束膨張試験結果を示す。図より、環境温度によらずコンクリートの圧縮強度が PL 同等以上であること、また、収縮補償の範囲となる膨張ひずみ (材齢 7 日で 208×10^{-6}) が導入されていることから、コンクリートの品質は向上するものと推察される。

これら基本特性をまとめると、初期反応促進型膨張材を用いたコンクリートは、ブリーディングの抑制および凝結時間の短縮化が期待できるため、特に寒冷地での床部材の仕上げ作業開始時間や終了時間を早めることが可能であると思われる。また、コンクリートに収縮補償となる膨張ひずみが導入されるため、ひび割れ抑制効果が

表-1 使用材料一覧

材料名	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
膨張材	EX	初期反応促進型膨張材 密度 2.98g/cm ³
細骨材	S	掛川産山砂、密度 2.57g/cm ³ 吸水率 2.2%, F.M. 2.78
粗骨材	G	桜川産砂岩碎石、密度 2.65g/cm ³ 吸水率 0.67%, F.M. 6.74

表-2 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	EX	S	G
PL	55.0	48.1	175	318	0	840	934
EX					25	818	

表-3 試験水準

試験水準	膨張材混和量 (kg/m ³)	環境温度 (℃)
PL-20℃	0	20
EX-20℃	25	
PL-10℃	0	10
EX-10℃	25	
PL-5℃	0	5
EX-5℃	25	

表-4 評価内容および試験項目

評価内容	試験項目	規格
フレッシュ性状への影響	スランプ試験	JIS A 1101
	空気量試験	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
初期反応促進効果	ブリーディング試験	JCI S 015
	凝結時間試験	JIS A 1147
コンクリートの品質	圧縮強度試験	JIS A 1108
	拘束膨張試験(A 法)	JIS A 6202

表-5 フレッシュ性状試験結果

試験水準	スランプ (cm)	空気量 (%)	コン温度 (℃)
PL-20℃	16.0	5.1	22
EX-20℃	15.0	5.6	24
PL-10℃	17.5	4.6	12
EX-10℃	16.5	5.0	14
PL-5℃	17.0	5.0	9
EX-5℃	16.0	5.7	11

高まること、さらに、本配合は、膨張材使用による単位セメント量の減少⁹⁾がないことも踏まえ、コンクリートの品質向上についても期待できるものと考えられる。

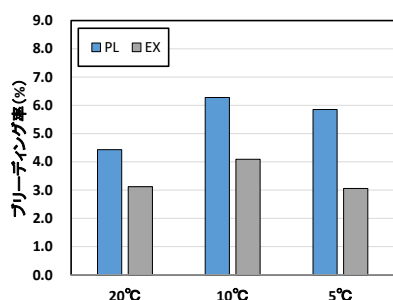


図-1 ブリーディング率試験結果

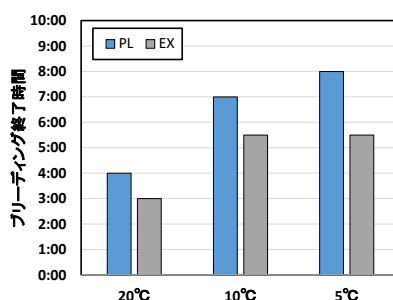


図-2 ブリーディング終了時間

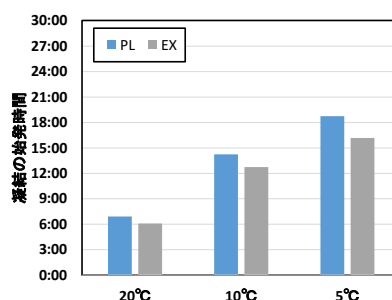


図-3 凝結時間試験結果 (始発)

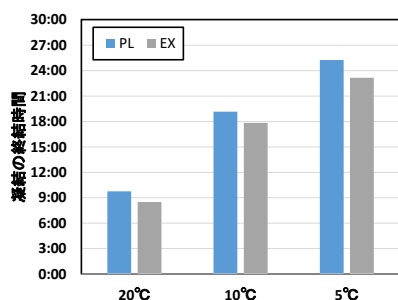


図-4 凝結時間試験結果 (終結)

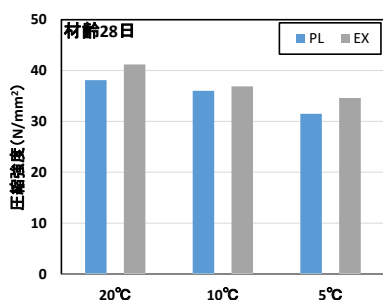


図-5 圧縮強度試験結果

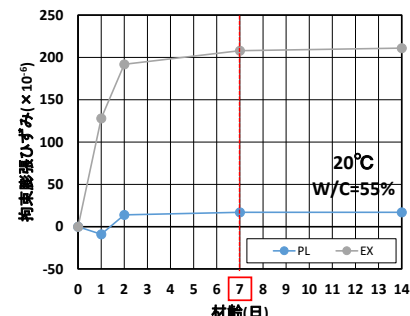


図-6 拘束膨張試験結果 (A 法)

4. デモ施工概要

4.1 使用材料およびコンクリートの配合

表-6 に使用材料を示す。また、表-7 にコンクリートの配合を示す。ここで、目標スランプは 15±2.5(cm)、目標空気量は 3.0±1.5(%)と設定した。また、使用した高性能 AE 減水剤はポリカルボン系化合物を主成分としたものを使用し、室内試験と同様な添加方法にて適宜調整した。

4.2 デモ施工箇所およびその環境

図-7 に施工箇所概要 (土間コン) を示す。また、写真-1 に現場状況を示す。土間の大きさは 8.5m×8.5m で厚さは 180mm である。膨張材の有無による比較を実施するために、隣接区間においてコンクリートを施工した。環境概要として、試験場所は埼玉県さいたま市内、試験日は 2022 年 2 月 2 日、天候は快晴、気温は平均気温 3.7℃ (最高 9.2℃、最低-1.6℃) となっている。

4.3 評価内容および試験項目

表-8 に評価内容および試験項目を示す。ここで、室内試験で得られた結果との比較を行うため、同様な評価内容に関する試験項目については同一とした。次に、コンクリート施工検証については、既往の報告⁸⁾を参考に置針式デュロメータとなる F 型硬度計を使用することとした。ここで、F 型硬度計について写真-2 に示す。F 型硬度計は、様々なデュロメータの中でも、針先端が尖っておらず、また針径が大きい (φ 25.2mm) ことが特徴である。そこで筆者らは、このような特徴のデュロメータを用い、まだ柔らかい状態の生コンクリートの硬化過程を捉えることができるものと考え、仕上げタイミングの定量化、および、仕上げ作業時間の可視化について検討した。

表-6 使用材料一覧

材料名	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm³
膨張材	EX	初期反応促進型膨張材 密度 2.98 g/cm³
細骨材	S	栃木県佐野市産 石灰砕砂 表乾密度 2.66 g/cm³ (混合比率 75%) 千葉県香取市産 陸砂 表乾密度 2.60 g/cm³ (混合比率 25%)
粗骨材	G	栃木県佐野市産 石灰碎石 表乾密度 2.70 g/cm³

表-7 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				
			W	C	EX	S	G
PL	52.0	50.4	163	314	0	710	948
EX					25	694	

表-8 評価内容および試験項目

評価内容	試験項目	規格
フレッシュ 性状への影響	スランプ試験	JIS A 1101
	空気量試験	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
初期反応 促進効果	ブリーディング試験	JCI S 015
	凝結時間試験	JIS A 1147
コンクリート の品質	圧縮強度試験	JIS A 1108
	拘束膨張試験(B 法)	JIS A 6202
コンクリート 施工検証	F 型硬度計	—
	仕上げ作業時間	—
	外観観察	—

5. デモ施工による効果の検証

5.1 フレッシュ性状への影響

表-9 にデモ施工におけるフレッシュ性状試験結果を示す。表より、どちらの配合においても混和剤の調整にて所定の性能が得られており、室内試験結果と同様な傾向であった。

5.2 初期反応促進効果

まず、図-8 にブリーディング試験結果を示す。図より、本膨張材を用いることで、ブリーディング率が大幅に低減されていることが分かる。また、ブリーディング終了時間は2時間の差が確認され、室内試験における5℃もしくは10℃の範囲で得られた結果と同様となった。次に、図-9 に凝結時間試験結果を示す。図より、凝結時間の始発および終結時間が本材料を用いることで早くなっていることが分かる。その差は、約2時間程度であり、室内試験における5℃もしくは10℃の範囲で得られた結果と同様であった。これらのことより、室内試験にて得られた初期反応促進効果が、現場施工環境でも発揮されたものと考えられ、本材料の効果による施工の早期化が期待できる結果となった。

5.3 コンクリートの品質

図-10 にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。図より PL コンクリートと比較して、EX コンクリートでは単位セメント量減少の影響がないことより、室内試験と同様、コンクリートの品質が確保された結果であった。また、図-11 に拘束膨張試験結果を示す。図より、EX コンクリートは、室内試験で得られた数値とほぼ同様な $+225 \times 10^{-6}$ の収縮補償ひずみが確認された。また、3ヵ月経過時においても、PL コンクリートと比較して、EX コンクリートでは $+100 \times 10^{-6}$ 程度の乾燥収縮ひずみが低減されていることが分かった。これらの結果より、デモ施工された EX コンクリートの品質は向上していることが推察される。

5.4 コンクリート施工検証

まず、図-12 に F 型硬度計による仕上げ開始時間の評価結果を示す。ここで、仕上げ作業と F 型硬度計の関係について、筆者らが行った別工事における蓄積データを参考にし、F 型硬度計の数値を「30～」、「65～」、「80～」に区分けし、それぞれ既往の文献を参考に、1 次仕上げ開始（アマ出し）、2 次仕上げ開始（中間仕上げ）、3 次仕上げ開始（最終仕上げ）と設定した⁹⁾。図より、EX コンクリートの各仕上げ開始は、PL コンクリートと比較して短縮化しており、その状況を数値化すると、PL コンクリートの 1 次仕上げが 4～5 時間後、2 次仕上げが 6～7 時間後、3 次仕上げが 8～9 時間後に対し、EX コンクリートでは 1 次仕上げが 3～4 時間後、2 次仕上げが 4～5 時間後、3 次仕上げが 5～6 時間後となっていることが分か

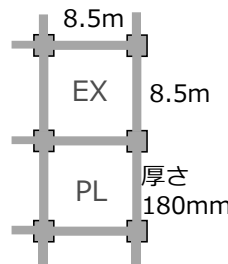


図-7 施工箇所概要

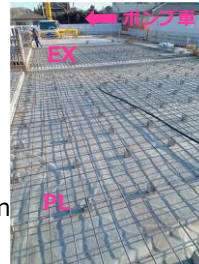


写真-1 現場状況



写真-2 F型硬度計

表-9 フレッシュ性状試験結果

試験水準	スランプ (cm)	空気量 (%)	コン温度 (℃)
PL	17.0	2.9	12
EX	16.5	3.3	15

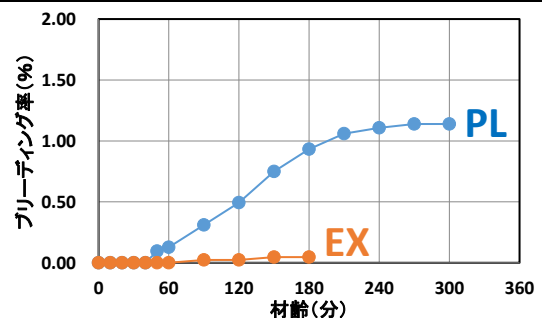


図-8 ブリーディング試験結果

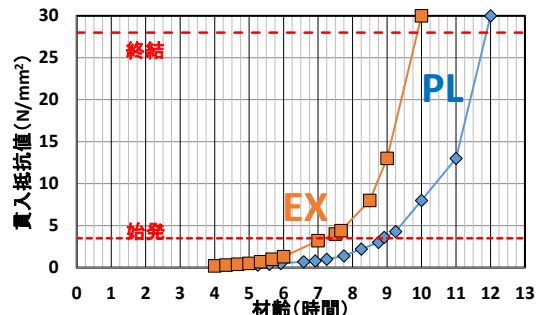


図-9 凝結時間試験結果

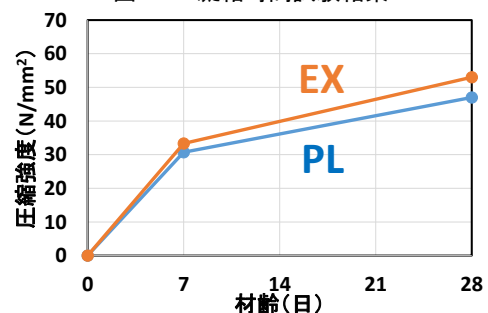


図-10 圧縮強度試験結果

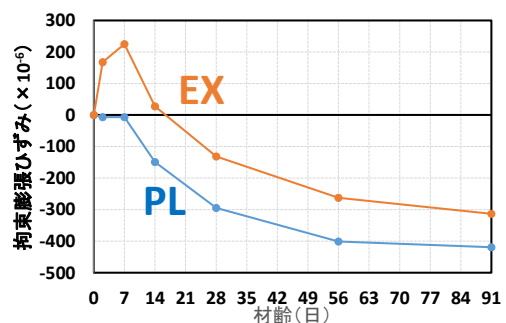


図-11 拘束膨張試験結果 (B法)

る。数値化したものから判断される EX コンクリートによる仕上げ作業は、PL コンクリートと比べ、各仕上げ作業間の待機時間が小さくなり、仕上げ作業の全行程がほぼ連続的に実施できる可能性が高いものと考えられる。その短縮可能時間は、最終仕上げの終了時間として、約2～4時間であるものと推察される。次に、図-13に1ヵ月後における外観観察結果を示す。PL コンクリートにおいて、既存コンクリートとの境目に肌分かれが生じており、その肌分かれによって生じたひび割れ幅は、0.3～0.7mmであった。ただし、EX コンクリートにおいて肌分かれは生じておらず、本膨張材によるコンクリートのひび割れ抵抗性の向上が確認されたものとする。

6. コンクリート床部材の施工に関する評価

6.1 使用材料およびコンクリートの配合

表-10に使用材料一覧を示す。また、表-11にコンクリート配合を示す。ここで、使用した生コンクリートは27-15-25N(EX)である。

6.2 施工場所概要

図-14に1F打設工区概要を示す。同図中、打設工区を便宜的に8つの部位に分け、打設順序に応じて(a)～(h)の番号を施している。打設対象は平面寸法17.2m×36.6m、厚さ180mmの土間である。コンクリートの打設量は110m³程度であり、ポンプ圧送による施工とした。施工場所は長野県松本市内、試験日は2022年12月2日、天候は快晴であった。施工中、外気温が0℃を下回る可能性があったため、採暖養生を実施した。施工環境温度の測定結果を図-15に示す。ここで、外気温の平均は4.1℃、室内気温の平均は7.2℃であった。

6.3 評価方法

床部材の施工評価方法は、F型硬度計による仕上げ作業時間（施工(a)の箇所にて実施）、並びに、定点カメラによる施工記録とした。

6.4 床部材の施工およびコンクリートの品質評価

表-12に床部材の施工記録一覧を示す。ここで表-12に示す時刻は、いずれも定点カメラの映像から判断したものである。同表より、打設開始から終了までの時間は約3時間であり、特に目立った不具合もなく施工可能であった。また、打設面積の違いが多少あったものの、(a)～(h)にかかる部位の打設時間はおおよそ15～30分程度であり、施工順序通りに打設完了することができた。仕上げ開始および終了時間については、同表より、施工順序通りの開始および終了時間とはなっておらず、(c)および(f)にかかる部位については、施工順序と異なり、比較的早い時間で仕上げ作業が開始されていることが分かった。これは、図-14におけるポンプ車側が日射の影響を受けていたためであると考えられる。ただし、日射の影

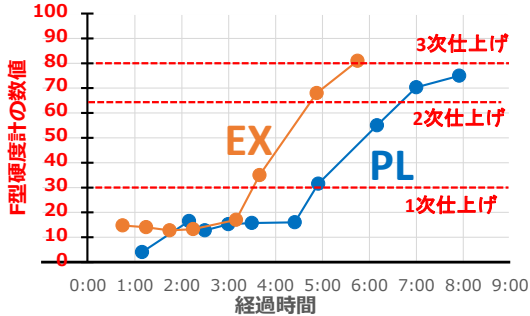


図-12 F型硬度計による仕上げ開始時間の評価

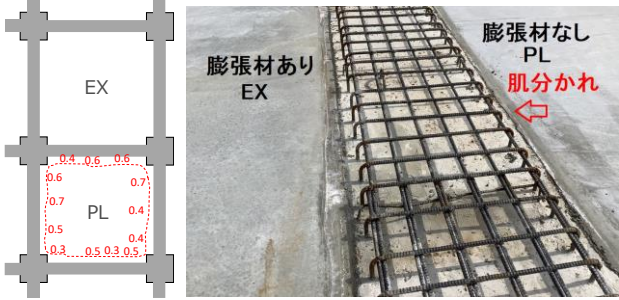


図-13 ひび割れ幅と外観観察結果

表-10 使用材料一覧

材料名	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
膨張材	EX	初期反応促進型膨張材 密度 2.98 g/cm ³
細骨材	S	長野県 梓川水系細骨材 表乾密度 2.61 g/cm ³
粗骨材	G	長野県 梓川水系粗骨材 表乾密度 2.64 g/cm ³

表-11 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	EX	S	G
51.5	44.5	164	319	25	800	980

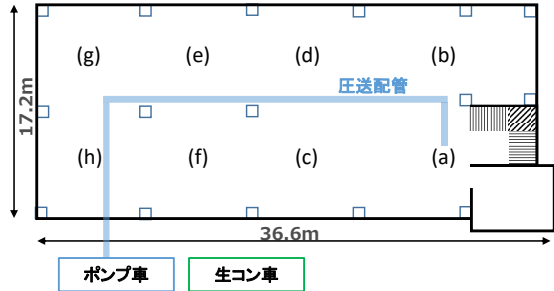


図-14 1F 打設工区概要

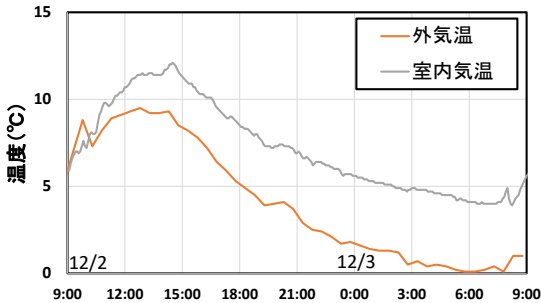


図-15 施工環境温度の測定結果

表-12 床部材の施工記録一覧

施工	打設開始	打設終了	仕上げ開始	仕上げ終了
(a)	09:00	09:33	13:50	16:14
(b)	09:33	10:10	15:56	18:16
(c)	10:10	10:26	15:08	17:46
(d)	10:26	10:42	16:05	18:33
(e)	10:42	10:53	16:16	18:43
(f)	10:53	11:11	15:58	18:51
(g)	11:11	11:35	16:25	19:00
(h)	11:35	12:00	16:39	19:13

響を受けていない(b)と(d)と(e)の区画の仕上げ作業時間が極端に遅くなっていないため、仕上げ作業順序の変更により待機時間を作ることなく、連続的な仕上げ作業が可能であった。総じて、仕上げ開始から終了までの時間は約 5～6 時間必要であったものの、仕上げ終了時間は 20:00 となり、室内平均気温が 7℃の環境であったにもかかわらず、深夜に及ぶ作業十分回避できる結果となった。また、各区画における仕上げ開始から終了までかかる時間は約 2.5～3.0 時間であり、各区画による大きな違いは無いことも確認された。

次に、図-16 に F 型硬度計による仕上げ開始時間の評価結果を示す。図より、F 型硬度計による数値で「30～」としている 1 次仕上げ開始（アマ出し）が、本施工現場では「50～」となっており、若干の違いが確認された。これは、仕上げ作業による感覚の違いの影響であると考えられ、さらなる精度の向上に向けたデータ蓄積が必要であり、今後の課題であるといえる。ただし、2 次仕上げ開始および 3 次仕上げ開始のタイミングについては、これまでと同じ数値で評価可能であった。各仕上げ開始時間の数値的評価については、それぞれの仕上げ工程が約 1 時間間隔で生じており、仕上げ開始時間のタイミングに起因する待機時間も発生せず、連続した仕上げ作業が実施できる状況にあったことが確認された。これは、デモ施工時と同様な傾向であった。これらの結果をまとめると、初期反応促進型膨張材を用いることで、作業工程における待機時間を減らし、かつ、連続的な施工が可能となり、コンクリート床施工の生産性向上に期待ができるものと考えられる。

7. 結論

低温下の床部材施工におけるブリーディングの低減および凝結時間の短縮化、さらに、コンクリートの品質向上を評価することを目的とし、初期反応促進型膨張材を用いたコンクリートの検討により、以下の結論を得た。

- (1) 初期反応促進型膨張材を用いたコンクリートの室内試験の結果、ブリーディング率が小さくなり、かつ、その終了時間が早期化した。また、始発および終結のどちらの凝結時間も短縮化した。

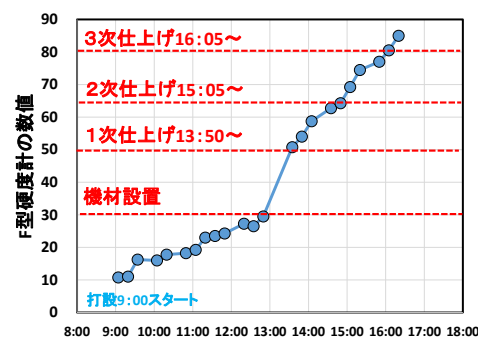


図-16 F 型硬度計—仕上げ開始時間の評価

- (2) デモ施工による効果の検証を行った結果、初期反応促進型膨張材を用いることで現場施工環境でも効果が発揮され、その短縮時間は、最終仕上げの終了時間として約 2～4 時間であった。また、本膨張材によるコンクリートのひび割れ抵抗性の向上が確認された。
- (3) 床部材の施工および品質評価を行った結果、初期反応促進型膨張材を用いることで、コンクリート床施工の生産性向上、および、コンクリートの品質向上が図れるものと考えられる。

参考文献

- 1) 中村洋祐：コンクリート床仕上げロボットの開発，第 16 回建設ロボットシンポジウム，2016.9
- 2) 日本コンクリート工学会：コンクリートのトレーサビリティ確保技術に関する研究委員会報告書，2014.6
- 3) 折田現太，金子泰明，槇島修：凝結促進材料を添加したコンクリート仕上げ時間短縮効果に関する検討，とびしま技報 No.69，pp.35-36，2021
- 4) 石井泰寛，宮口克一，浦野真次，依田侑也：寒冷期における凝結時間調整のための混和材の効果に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.231-236，2018
- 5) 井元晴丈，榊原直樹，田中泰司，佐藤和徳：C-S-H 系早強剤を使用したフライアッシュコンクリートの冬期施工性および表層品質評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.70，pp.297-304，2016
- 6) 陶山祐樹，小山智幸，伊藤是清，松藤泰典：各種粉体を外割混合したコンクリートにおける細孔組織を考慮した圧縮強度に関する検討，コンクリート工学論文集，Vol.24，pp.89-100，2013.9
- 7) 気象庁 HP，各種データ資料，過去の気象観測データ：<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>(2022.12 現在)
- 8) 加藤淳司，槇島修：デュロメーターによる金ごて仕上げおよび湿潤養生の作業開始管理法の提案，とびしま技報 No.65，pp.13-16，2017
- 9) 安藤雄基，平野竜行：床コンクリートの品質・生産性向上に関する打込みから仕上げまでの一連の取組み，コンクリート工学 Vol.55 No.9，pp.788-791，2017