

現場施工向けスラグ系 AAM コンクリートの開発

Development of slag-based AAM concrete for casting on construction site

椎名 貴快*

Takayoshi Shiina

山本 泰介**

Taisuke Yamamoto

要 約

普通コンクリートよりも CO₂ 排出量の少ない建設資材の一つとして、セメントフリーのアルカリ活性材料がある。しかし、練上がり後の粘性が高く、可使時間が短い上、常温大気下で強度発現性が小さいなどの課題があり、現場施工には適さないとされてきた。そこで配合やアルカリ溶液の成分比率などを調整することで、現場施工性を有する AAM コンクリートを開発した。

本稿では、配合試験や施工性確認試験、そして現場施工事例について報告した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 配合・施工性確認
- § 3. 現場施工事例
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

現在、国内のセメント生産量は、需要減少に伴って減産傾向ではあるが、世界では年間約 44 億トン（2021 年）が生産されている。しかし、セメントは 1 トン作るのに約 770 kg の CO₂ を大気中に排出し、その総量は人類活動由来の CO₂ の 5～8% を占める膨大な量と言われている。このためセメント業界は、CO₂ 排出量の少ないセメント製造技術の開発に着手しているが、製品が流通ベースになるにはもう少し時間がかかりそうである。一方、建設業界では、セメントの使用量が少ない、環境負荷の小さいコンクリートの技術開発を進めており、その一つとしてアルカリ活性材料（以下、AAMs：Alkali Activated Materials）がある。

AAMs は、フライアッシュなどの活性フィラーを水ガラスなどのアルカリ溶液で硬化させたジオポリマーと、高炉スラグをアルカリ溶液で硬化させた AAM を含めた総称である¹⁾。AAMs は、セメントを使用しないため、製造時の CO₂ 排出量が普通コンクリートに比べて 7 割ほど削減できるものの、粘性が高く、可使時間が短い上、常温大気下での強度発現性が小さいなどの課題があり、現場施工には適さないとされてきた。著者らは、製鉄所か

らの副産物である高炉スラグを用いた AAM コンクリートを対象に、配合やアルカリ溶液の成分比率などを調整することで、現場施工性を有する AAM コンクリートを開発した。本稿では、配合試験や施工性確認試験、現場施工事例について報告する。なお本開発は、JFE スチール(株)、東北大学、日本大学、西松建設(株)の共同研究として実施した。

§ 2. 配合・施工性確認

2-1 配合試験

(1) 目標品質特性

実機での製造や運搬、施工性を考慮して、目標とする品質特性は、スランプフロー 500～600 mm（スランプ平均 25）、可使時間は 4 時間以上、28 日圧縮強度は常温で 30～40 N/mm²（平均 35）を目標とした。なお可使時間は現場での連続製造やミキサ洗浄等を考慮して長めの目標としたが、実務上は任意調整できるものとする。

(2) 使用材料

表一 1 に使用材料を示す。粉体は高炉スラグ微粉末 4000（石膏 2% 内添）のみ、アルカリ溶液は NaOH と凝結調整剤、水をそれぞれ任意の割合で混合して用いた。細骨材には副産物である高炉スラグ細骨材、粗骨材には砕

表一 1 使用材料

種類	記号	材料名	密度(g/cm ³)
粉体	P	高炉スラグ微粉末 4000（石膏有）	2.89
アルカリ溶液	AW	NaOH, 凝結調整剤, 水	1.13～1.25
細骨材	S	高炉スラグ細骨材 BFS1.2	表乾 2.74
粗骨材	G	碎石 2005（石灰石 A：山口県）	表乾 2.70
		碎石 2005（石灰石 B：栃木県）	表乾 2.74
		碎石 2005（硬質砂岩 A：東京都）	表乾 2.66
		碎石 2005（硬質砂岩 B：茨城県）	表乾 2.64

備考）粗骨材は岩種や産地の異なる 4 種で比較

* 技術研究所

** 技術研究所土木技術グループ

石 2005 を使用した。なお、粗骨材は石灰石および硬質砂岩の 2 種類（各 2 産地）を比較用として用いた。空気量は 2.5% の non AE とした。

(3) 練混ぜおよび養生

室内試験は、温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室内で、二軸強制練りミキサを用いて行った。ミキサ内へ骨材と粉体を投入後、空練り 30 秒、アルカリ溶液投入後に 60 秒、掻き落とし後さらに 60 秒練り混ぜて排出した。供試体の養生は 20℃ 封緘を標準とした。

(4) 試験結果

① アルカリ水比、粉体水比と圧縮強度の関係

図一1 にアルカリ溶液中のアルカリ水比 $\text{Na}/\text{H}_2\text{O}$ （モル比）と圧縮強度の関係、図一2 に粉体水比 $\text{P}/\text{H}_2\text{O}$ と圧縮強度の関係を示す。アルカリ水比を大きくしても圧縮強度の増進は比較的緩慢で、粉体水比を増加させると強度改善に有効であった。なお、粗骨材の岩種の違いによる影響は本試験では比較的小さかった。

以上より、目標 28 日圧縮強度に対して、アルカリ水比 0.10（モル比）程度、粉体水比 2.10 程度を選定した。

② パースト容積率とスランプの関係

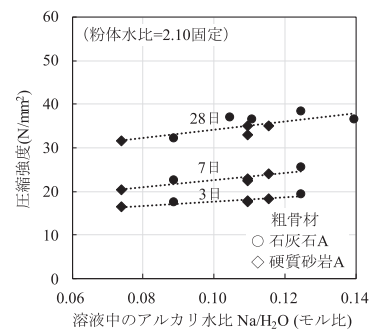
図一3 にパースト容積率とスランプの関係を示す。パースト容積とスランプとの間には相関性があり、パースト容積率が大きいほどスランプも大きくなる。目標スランプ平均 25 cm に対して、パースト容積率は 35 vol.% 程度が必要との結果であった（写真一1）。

③ 凝結調整剤量と凝結時間、圧縮強度の関係

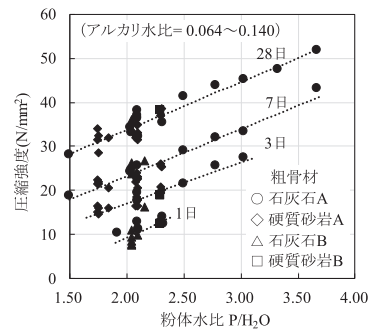
凝結調整剤を使用しない場合、練上がりから 20～30 分ほどで急激にこわばってしまう。そこで可使用時間を確保するため、アルカリ溶液中に凝結調整剤成分を配合し、その量を調整することとした。図一4 に凝結調整剤量の違いによる凝結時間および圧縮強度の試験結果を示す。試験は 20℃ 環境で実施し、凝結時間は JIS A 1147 に基づきプロクター貫入抵抗試験機で行った。配合はアルカリ水比を 0.10、粉体水比 2.05 である。凝結調整剤量を 1.0、1.5、2.0、2.5 kg/m^3 と増加させると、凝結の始発・終結時間は線形的に延び、使用量 0.82 kg/m^3 以上で目標可使用時間 4 時間を確保できた。ただし、凝結の始発と終結の時間差が短く、こわばり始めると比較的早く固まり始める性質がある。このため、凝結遅延剤の使用量は、品質の確保や表面仕上げ作業の時期などを考慮して、安全側に 1.5 kg/m^3 とした。なお、溶結遅延剤の使用量が増えると圧縮強度が材齢 7 日および 28 日ともにやや増加する傾向が見られた。この理由として、凝結遅延剤の働きによってスラグ自体の反応度が高まり、スラグの核の部分まで反応が進行したためではないかと考える。

2-2 品質特性

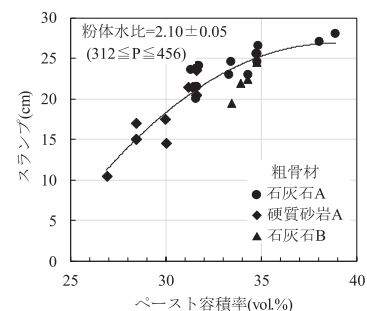
AAM コンクリートの強度特性、収縮特性、凍結融解抵抗性を室内試験で確認した。配合は、前記の配合検討結果を参考に、表一2 のように、粉体水比 $\text{P}/\text{H}_2\text{O}$ を 2.05、



図一1 アルカリ水比と圧縮強度の関係



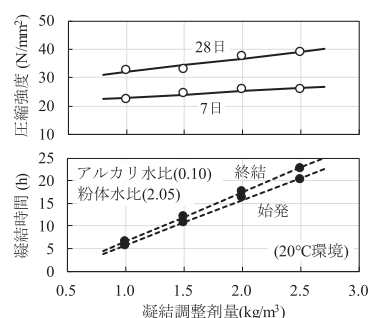
図一2 粉体水比と圧縮強度の関係



図一3 パースト容積とスランプの関係



写真一1 フレッシュ性状（パースト容積率 35 vol.%）



図一4 凝結調整剤量と凝結時間、圧縮強度の関係

アルカリ水比 $\text{Na}/\text{H}_2\text{O}$ (モル比) を 0.10, 細骨材率 s/a を 50.0%, ペースト容積率 V_p を 34.8 vol.%, 単位粗骨材絶対容積 V_g を $0.314 \text{ m}^3/\text{m}^3$ とした。

(1) 強度特性

AAM コンクリートの 20°C 封緘での圧縮強度および静弾性係数の試験結果を図一5に示す。図中には材齢と圧縮強度の関係式として、試験値より最小二乗法で同定した双曲線型の関係式を併記した。同式から推定される材齢強度 (N/mm^2) は、材齢1日で7.3, 7日で24.7, 28日で35.3となり、初期強度の発現性が高く、また材齢28日で目標強度 $30 \text{ N}/\text{mm}^2$ 以上を得られた。さらに長期強度も緩やかに増進する傾向が見られた。

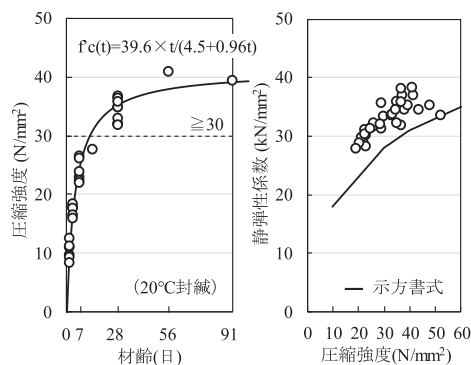
静弾性係数と圧縮強度の関係は、土木学会の示方書式(普通コンクリート)で安全側に評価できることがわかった。なお、圧縮弾性域でのポアソン比は0.22~0.24で、普通コンクリートと同程度であった。

(2) 乾燥収縮率

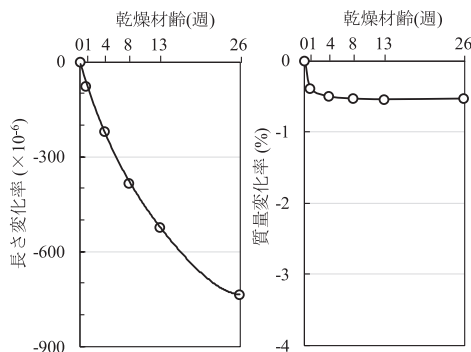
図一6にJIS A 1129に準拠したAAMコンクリートの長さ変化試験結果を示す。乾燥材齢26週目での長さ変化率は 800×10^{-6} 以下で、質量変化率は0.54%と小さく、乾燥収縮の挙動は普通コンクリートと概ね遜色がない結果であった。

(3) 凍結融解抵抗性

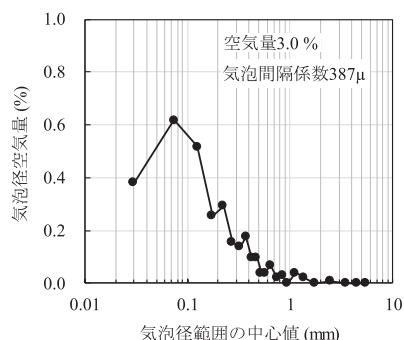
図一7にはASTM C457に示されるリニアトラバース法に準拠して測定した硬化コンクリート中の気泡径分布および気泡間隔係数を示す。硬化後の空気量は3.0%と少なく、気泡間隔係数も 387μ と大きいものの、凍結融解抵抗性に寄与するとされる径 0.15 mm 未満の気泡量は1.52%と比較的多かった。図一8にJIS A 1148に準拠した凍結融解試験の結果を示す。土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕では、対象とする構造物の環境条件や部材条件に応じて、300サイクル試験終了時の相対動弾性係数の最小限界値が60, 70, 85%の3ランクに区分され、90%以上の場合には内部損傷に対する照査は不要としている。本試験の配合では、気泡間隔係数が大きいものの、径 0.15 mm 未満の気泡量が比較的多く、また高炉スラグ細骨材を用いていることもあり、相対動弾性係数に顕著な低下はなかった。300サイクル試験終了時点で90%以上あり、凍害による内部損傷に対して所要の抵抗性を有していると評価できる。なお質量減少率が100サイクル目以降に大きくなり、300サイクルで4.7%とやや大きな値であった。これは表面スケーリングの影響と考える。



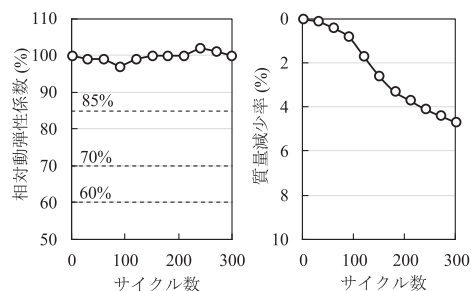
図一5 圧縮強度，静弾性係数



図一6 長さ変化試験結果



図一7 硬化コンクリート中の気泡径分布



図一8 凍結融解試験結果

表一2 AAM コンクリート配合

粉体水比 $\text{P}/\text{H}_2\text{O}$	アルカリ 水比 $\text{Na}/\text{H}_2\text{O}$ (モル比)	細骨材率 s/a (%)	ペースト 容積率 V_p (vol.%)	単位粗骨材 絶対容積 V_g (m^3/m^3)	スラン プ フロー SLF (mm)	空気量 Air (%)	単位量 (kg/m^3)			
							アルカリ 溶液 AW	粉体 P	細骨材 S	粗骨材 G
2.05	0.10	50.0	34.8	0.314	500~600	2.5	239.5	400	860	860

備考) G は碎石 2005 (石灰石 B) を使用

2-3 施工性評価

AAM コンクリートのバイブレータによる締固め効果および流動性を確認する実験を行った（写真-2）。

(1) 締固めの効果

スラブ模擬型枠（1,000 mm×1,000 mm×厚さ 300 mm）内に AAM コンクリートを一括で打ち込んだ後、バイブレータによる締固めの有無がコンクリート品質に与える影響を実験で確認した。バイブレータは細径φ32 mm を使用し、締固め時間は 1 か所当たり 4 秒程度とした。試験から約 1 か月後、模擬体から直径φ100 mm のコアを 3 本採取し、材齢 28 日で圧縮強度試験を実施した。

表-3 にコアの圧縮強度および静弾性係数の結果を示す。ここでは締固めなしを 100 とした比率で示している。圧縮強度はバイブレータをかけることで約 5% 増加し、静弾性係数も約 4% 高くなり、締固めた方が優位な結果であった。また材齢 89 日目に各試験体の側面で表層透気係数を測定（表面含水率 5.5% 以下）した結果、表層透気係数はバイブレータによる締固めの有無で顕著な差はなく、両方とも優のグレード評価であった。

本実験では、施工性向上の観点から、目標スランプフローを 500～600 mm とし流動性の高い配合としたが、バイブレータによる締固め作業は品質確保の観点から必須であることがわかった。なお、最適な締固めの方法や時間などについては別途検討を要する。

(2) 流動性

壁模擬型枠（高さ 600 mm×幅 300 mm×長さ 2,400 mm、無筋）にシュート直下ろしで片端より流し込み、コンクリートの流動勾配を測定した。打込み完了後、シートで覆い、材齢 7 日で脱型、材齢 28 日でコア強度を確認した。コアの採取位置は、流動距離 400 mm、1,200 mm、2,000 mm の 3 か所で、高さ中央にて水平方向に採取した。

表-4 に流動勾配とコア強度結果、写真-3 にコア外観を示す。実験の結果、AAM コンクリートの流動勾配（無筋）は 1/10～1/20 程度で、中流動コンクリート並みの高い流動性が得られた。コアの圧縮強度および静弾性係数は、流動中間の 1,200 mm 位置でやや小さい値となったが、流末付近 2,000 mm と打込み箇所近傍の 400 mm 位置での値は概ね等しい結果であった。またコアの外観観察から、粗骨材に偏在は確認されなかった。

次に、土間枠（幅 1,000 mm×奥行 2,500 mm×厚さ 200 mm）の中にコンクリートホッパーを使って打ち込み、流動性を確認した（写真-4）。ホッパー口の開放とともにコンクリートが枠内に広がり、バイブレータ使用前に厚さ 150 mm で充填させることができた。打込み作業は実質 1 名で実施することができ、施工生産性の観点からも有効である。

(3) フレッシュ性状の経時保持性

気温 18℃ の環境下で、フレッシュ性状の経時保持性を確認した。表-5 に練りフネ内に静置した AAM コンクリートの練直および 60 分経過後の試験結果を示す。なお、



スラブ模擬体

壁模擬体

写真-2 流動充填性の確認実験

表-3 締固め有無とコンクリート品質

試験項目	試験 材齢	締固めの有無	
		なし	あり
コア圧縮強度比	28 日	100	105
コア静弾性係数比		100	104
表層透気係数 ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)	89 日	0.006 (優)	0.004 (優)

備考) 表層透気係数のグレーディング：優 0.001～0.01，良 0.01～0.1，一般 0.1～1，劣 1～10，極劣 10～100

表-4 流動勾配，コア強度

流動勾配	本実験 (AAM コンクリート)		1/10～1/20 程度
	参考	高流動コンクリート	1/10～1/30 程度
		中流動コンクリート	1/10～1/25 程度
		スランプ 18 cm	1/2～1/5 程度
コア強度	圧縮強度 (N/mm ²)	流動距離 400 mm	33.0
		1,200 mm	30.5
		2,000 mm	33.1
	静弾性係数 (kN/mm ²)	流動距離 400 mm	33.3
		1,200 mm	30.8
		2,000 mm	32.4

注) 流動勾配 = (打込み位置の上面高さ - 流動先端の上面高さ) / 流動距離



(上から 400 mm, 1,200 mm, 2,000 mm)

写真-3 コア試料



写真-4 コンクリートホッパーからの打込み

表-5 フレッシュ性状の経時保持性

測定 時期	スランプ フロー (mm)	空気量 (%)	50 cm 到達 (秒)	流動停止 (秒)	コンクリート 温度 (℃)
	500～600	2.5 ± 1	—	—	—
練 直	530×520	2.4	13	64	20
60 分後	570×560	1.8	16	62	19



写真一五 練上がりから4時間経過後のスランブフロー

配合は表一2と同じであり、またアルカリ溶液中の凝結調整剤量は 1.5 kg/m^3 である。60分経過後に空気量がやや小さくなったこともあり、スランブフローは若干小さくなったものの、性状に顕著な変化はなかった。また4時間経過後のスランブフローの状態(写真一五)からも、凝結調整剤の効果によって長時間の施工に耐えられる品質を保持していることがわかる。なお、スランブフロー試験における流動停止までの時間が60秒を超えているため、かなりゆっくりと流動化していくことがわかる。このため、実際の現場施工での打込み速度は普通コンクリートよりも小さくすることが望ましく、さらに型枠に作用するコンクリート側圧についても留意する必要があると考える。

以上より、AAM コンクリートは流動性および材料分離抵抗性が良好で、フレッシュ性状の経時保持性が高く、凝結調整剤の効果によって可使用時間も安定的に確保できる。ただし、バイブレータによる締固め作業は品質確保のために必要である、との評価であった。

§3. 現場施工事例

AAM コンクリートは特殊なアルカリ溶液を用いるため、市中の生コン工場では出荷調整ができず、工場製造できない場合が想定される。その場合、現地に製造設備を持ち込む必要がある。例えば、写真一六のような定置式や自走式のミキサなどを使用する。計量器が備わっていない場合には、使用材料(骨材、粉体)をあらかじめコンテナバッグにバッチ単位で計量し、内包したものを持ち込む。製造の手順は、最初にミキサ内へアルカリ溶液を投入し、ドラムを10~12 rpmで回転させながらコンテナバッグより材料を一括投入し、すべての材料投入完了後、高速20 rpmで120秒混練して製造する。なお、アルカリ溶液は流量計を用いて投入するが、水よりもやや粘度が高くて密度も大きいので、事前に流量計の校正が必要である。また、アルカリ溶液の保管は耐薬品性を有しかつ光透過性の小さい黒色系の樹脂製容器を用いる。溶液温度が5℃以下になると成分の分離・析出が起りやすくなるため、冬期施工の際には保管温度にも注意が必要である。以上、現場での施工方法について概説したが、これ以降は現場施工事例を紹介する。

(1) 事例1(土間コン)

気温15℃の施工条件下で、民地境界の土間にシュート



(上：定置式ミキサ，下：自走式ミキサ)

写真一六 現地での製造例

表一六 施工事例1

施工条件		フレッシュ性状			圧縮強度 (N/mm^2)			
時期	気温	スランブ	空気量	コンクリート温度	20℃封緘			
					1日	7日	28日	56日
5月	15℃	24.5 cm	3.1%	20℃	13.1	24.9	36.6	41.0



写真一七 土間コンクリート

で直打ちして打ち込んだ。配合は前記表一2と同様である。製造には自走式ミキサを使用し、現地にてアルカリ溶液、骨材、粉体の順に材料をホッパーより投入した後、高速で120秒混練した。製造完了後、荷卸し試験を行ったのち、直ちに打ち込んだ。表一六にフレッシュ試験結果および圧縮強度結果、写真一七に土間コンの仕上り状況を示す。スランブ24.5 cmで流動性が高いため、打込み作業は自走式ミキサの操作者を含めて2人で実施できた。20℃封緘での圧縮強度は材齢1日で 10 N/mm^2 以上発現し、28日強度は 36.6 N/mm^2 であった。初期強度発現性が高いため、打込み翌日には周辺整備作業を実施して終えることができた。

(3) 事例2(建屋基礎補強)

建屋基礎の増厚補強部にAAM コンクリートを打ち込んだ。製造は自走式ミキサを現地に持ち込んで行った。型枠内での水平流動距離は最長約4 mである。表一七にフ

表一7 施工事例 2

施工条件		フレッシュ性状			圧縮強度(N/mm ²)	
		スランブ	空気量	コンクリート 温度	現場封緘	
時期	気温				7 日	28 日
4 月	18℃	23.5 cm	2.8%	22℃	26.3	37.0



打込み中の流動状況（流動距離 3m）



脱型後の状態

写真一8 建屋基礎の増厚補強

フレッシュ試験結果および圧縮強度結果、写真一8に AAM コンクリートの流動状況および脱型後の状態を示す。コンクリートの流動先端での材料分離は目視で見る限り確認されず、高い流動性と自己充填性を有していた。現場封緘養生での圧縮強度は、材齢 7 日で 26.3 N/mm²、材齢 28 日で 37.0 N/mm² を得られた。

(4) 事例 3（法面脚部保護）

法面の脚部保護として、法長約 1,000 mm、延長約 30 m 区間に AAM コンクリートを打ち込み、それ以外はモルタル吹付け仕上げとした。表一8 にフレッシュ試験結果および圧縮強度結果、写真一9 に仕上がり状況を示す。製造は現地にて定置式ドラム型ミキサ（定格容量 1.0 m³）で行い、打込みにはコンクリートホッパーを使って、伏せ型枠の上部より流し込んで打ち込んだ。20℃封緘養生での圧縮強度は、材齢 7 日で 33.5 N/mm²、材齢 28 日で 45.0 N/mm² あった。

(5) 事例 4（階段基礎）

階段基礎部に設計 0.47 m³ を打ち込んだ。表一9 にフレッシュ試験結果および圧縮強度結果、写真一10 に階段基礎の施工および仕上りの状況を示す。製造は自走式ミキサを用いたが、打込み箇所近くで製造作業を行うことができず、現地から離れた敷地内で実施した。このため、練混ぜから荷卸し地点に到着するまでの運搬に 65 分、打込み作業に 25 分かかり、合計で約 90 分を要した。打込み完了までに時間がかかったものの、フレッシュ性状は安定しており、打込み中の品質は高い流動性を保持していた。20℃封緘養生での圧縮強度は、材齢 7 日で 29.6 N/mm²、材齢 28 日で 39.6 N/mm² であった。

表一8 施工事例 3

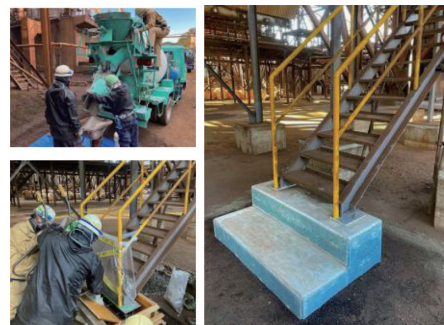
施工条件		フレッシュ性状				圧縮強度(N/mm ²)		
		スランブ フロー	空気量	停止	コンクリート 温度	20℃封緘		
時期	気温					2 日	7 日	28 日
3 月	17℃	565× 552mm	1.8%	60.4 秒	19℃	18.6	33.5	45.0



写真一9 法面保護（脚部）

表一9 施工事例 4

施工条件		フレッシュ性状			圧縮強度(N/mm ²)	
		スランブ フロー	空気量	コンクリート 温度	20℃封緘	
時期	気温				7 日	28 日
12 月	17℃	516×512mm	1.5%	14℃	29.6	39.6



写真一10 階段基礎

§ 4. まとめ

本開発では、スラグ系 AAM コンクリートの現場施工向け配合を組み立て、種々の模擬型枠を用いた実験で施工性を確認した。その結果、AAM コンクリートは高い流動性および材料分離抵抗性を有し、かつ可使時間も安定的に確保でき、強度は常温大気下でも一般に土木分野で使われている普通コンクリートと同程度を得られた。さらに、実現場での製造および施工検証により、普通コンクリートと同じように施工できることを確認した。今後は製造・施工マニュアルを整備して、汎用技術として使えるようにしたい。

謝辞：実機での製造作業にご協力を頂いたドライミックス事業協同組合の皆様、心より謝意を申し上げます。また現場での施工作业にご指導・ご協力を頂いた工事関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会（361 委員会）成果報告書、コンクリート技術シリーズ 132, 2022. 12.