

論文 常温硬化性能を有した低炭素型高強度繊維補強モルタルの検討

水野 剣一*1・正木 徹*2・谷口 修*3・茶林 敬司*4

要旨: 本検討では、セメントを高炉スラグ微粉末で高炉セメント C 種相当に置換した低炭素型でかつ常温硬化性能を有した圧縮強度 100N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルの各種性状、硬化物性および耐久性を評価した。その結果、5℃環境ではやや凝結遅延が発生したものの 20℃環境や 35℃環境では常温硬化可能であり、凍結融解、中性化に対する抵抗性は非常に高いことを確認した。

キーワード: 高強度、繊維補強モルタル、常温硬化、低炭素型

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリートは、圧縮強度が 150N/mm² 以上であり、有害因子に対する侵入抵抗性などに優れ、繊維添加により高い靱性を有したコンクリートである。しかし、超高強度繊維補強コンクリートは主にプレキャスト工場で製造されるため、製造コストの上昇や部材寸法に制限されるなどの課題もある。そのため、超高強度繊維補強コンクリートの更なる普及を目指し、通常コンクリート同様に現場施工を可能とする常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリートについて検討が進められている¹⁾。さらに、床版取替工事などでプレキャスト同士を接合する間詰材として常温硬化による超高強度繊維補強コンクリートや高強度繊維補強モルタルが使用され始めている。しかしながら、超高強度の場合には自己収縮が大きいことや特殊ミキサを使用しなければならないなどの課題があるため、それよりも強度が低い 100N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルがより汎用的であると考えられる。

一方、近年では温室効果ガスの排出量削減対策が重要となっており、セメントを高炉スラグ微粉末などの産業副産物に置換する低炭素型のコンクリートの汎用化が期待されている。特に高強度の場合はセメントを大量に使用しているため、セメントを産業副産物に置換することで CO₂ を大幅に低減することが可能である。しかし、高強度繊維補強モルタルでは、セメントの一部を高炉スラグ微粉末に置換する検討はされているものの²⁾、高炉セメント C 種相当に置換した配合検討したデータは少ない。

そこで、本検討ではセメントを高炉スラグ微粉末で 70%置換した低炭素型でかつ常温硬化性能を有する高強度繊維補強モルタルの検討を行い、その各種硬化物性および耐久性を把握することを目的とする。

2. 実験概要

本実験は、環境温度の違いによる基礎性状試験(シリーズI)と基本配合の各種硬化物性および耐久性試験(シリーズII)の2つから構成される。

2.1 使用材料

表-1 に使用材料を示す。普通ポルトランドセメント、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末を用いた。また、石膏(AG)は自己収縮抑制および初期強度確保を目的とし、ウォラストナイトは曲げ強度向上と材料分離抵抗を目的とした。混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤と粉体系消泡剤を使用し、鋼繊維は直径 0.20mm、長さ 13mm とした。環境温度による違い検討(シリーズI)では、早強ポルトランドセメントやエリソルビン酸ナトリウムの遅延剤を使用した。

2.2 基本配合

表-2 に標準配合を示す。なお、標準配合は 20℃環境で材料分離がなく、フロー値 250~310mm、空気量 2.0±1.5%、圧縮強度 100N/mm² 以上を目標とし、配合検討によって決定した。標準配合は普通ポルトランドセメント

表-1 使用材料

材料	記号	密度 (g/cm ³)
水(上水道水)	W	1.00
普通ポルトランドセメント	C(N)	3.16
早強ポルトランドセメント	C(H)	3.14
高炉スラグ微粉末4000	BS	2.91
シリカフェーム	SF	2.25
石膏	AG	2.90
ウォラストナイト	WA	2.91
細骨材	S	2.61
高性能AE減水剤	SP	1.07
消泡剤	DF	1.00
鋼繊維(引張強度 2750N/mm ² 以上)	F	7.85
遅延剤(エリソルビン酸ナトリウム)	R	1.65

*1 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部 係長 修士(工学) (正会員)

*2 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部 (正会員)

*3 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部 専門部長 博士(工学) (正会員)

*4 株式会社トクヤマ セメント開発グループ 修士(理学)

を使用したシリーズIIの実施配合であり、セメントと高炉スラグ微粉末を3対7とし、結合材全体の各種材料割合はセメント26%、高炉スラグ微粉末61%、シリカフェーム8%、石膏5%とした。なお、ウォラストナイトは細骨材として計上した。

2.3 練混ぜ方法

環境温度の違いによる性状試験の練混ぜには、シャフトレスミキサ（容量：60L）を使用し、1回の練混ぜ量は35Lとした。水、SPおよび鋼繊維以外の材料をミキサ内に投入後、60秒間練り混ぜ、SPおよび水を投入して7分間練り混ぜた。練り上がったモルタルに鋼繊維を添加し、さらに2分間練り混ぜて排出した。

各種物性試験の練混ぜでは、実機を想定して大型のパン型強制練りミキサ（容量：570L）を使用し、1回の練混ぜ量は110Lとした。水、SPおよび鋼繊維以外の材料はプレミックス化して実施した。なお、鋼繊維添加後は流動性が低下するため添加前に比べ練り混ぜがしにくい状況であった。それぞれのミキサを写真-1に示す。

3. 環境温度の違いによる性状試験(シリーズI)

全配合を表-3に示す。35℃環境では遅延剤を添加した配合も実施した。

3.1 フレッシュ性状

フロー試験はJIS R 5201：2015「セメントの物理試験方法」を参考に落下なしのフロー値で評価した。フローの管理としては、各温度で普通ポルトランドセメントの配合がフロー値250～310mmとなるように高性能AE減水剤を調整した。普通ポルトランドセメントによる20℃環境のフロー試験後の写真を写真-2に示す。先端まで

鋼繊維が分散しており、材料分離やファイバーボールの発生は認められなかった。

フローの結果を図-1に示す。5℃環境はフローが大きいがこぼりが発生したため、SPの添加量を減らすことができなかった。35℃環境でもフローが大きくなったため、SPの添加量を減らしてフローを調整した。また、遅延剤を添加した場合でもフローが大きくなる傾向が見られたためSPの添加量を減らした。

早強ポルトランドセメントを使用した場合には、普通ポルトランドセメントに比べフローが低下する傾向が見られた。これは早強ポルトランドセメントの粉末度が普通ポルトランドセメントより大きいため粘性が増加したと考えられる。

空気量試験はJISA 1128：2019「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」で実施した。空気量の管理値は、2.0±1.5%とした。空気量



写真-1 使用ミキサ（左：シャフトレスミキサ，右：大型のパン型強制練りミキサ）

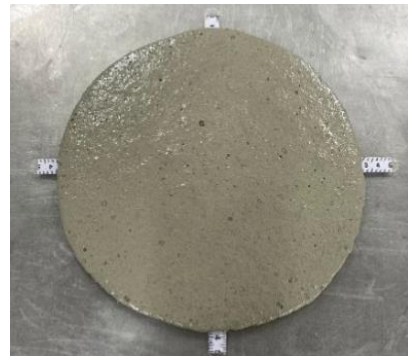


写真-2 フロー試験後の写真

表-2 標準配合

単位量(kg/m ³)									
W	B				WA	S	SP	DF	F
	C	BS	SF	AG					
230	300	700	92	58	87	844	適宜調整	1.15	157

表-3 配合表(シリーズI)

No.	気温(℃)	セメント種類	W	B				WA	S	SP	DF	R	F
				C	BS	SF	AG						
20 N	20	N	230	300	700	92	57.5	87	844	10.4	1.15	0	157
20 H		H	230	300	700	92	57.5	87	833	10.4	1.15	0	157
35 N	35	N	230	300	700	92	57.5	87	844	8.6	1.15	0	157
35 N R1		N	230	300	700	92	57.5	87	844	6.9	1.15	1.2	157
35 N R2		N	230	300	700	92	57.5	87	844	6.9	1.15	1.7	157
35 H		H	230	300	700	92	57.5	87	833	10.4	1.15	0	157
5 N	5	N	230	300	700	92	57.5	87	844	10.4	1.15	0	157
5 H		H	230	300	700	92	57.5	87	833	10.4	1.15	0	157

試験結果を図-2に示す。5℃環境ではばらつきがみられたが、すべての配合で管理値を満足した。

3.2 凝結時間

凝結試験は JIS A 5201 : 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」を参考に鋼繊維を除いた配合で実施した。凝結試験結果を図-3に示す。20℃環境では、普通と早強では始発時間には違いが見られず、20_Nで5.7時間、20_Hで5.4時間であった。

35℃環境ではどちらも始発時間は早く、35_Nで2.0時間、35_Hで2.8時間であった。なお、早強ポルトランドセメントが普通ポルトランドセメントに比べ遅い理由としては SP の添加量が多いことが原因と考えられる。使用した SP は遅延効果があるため、SP の添加量が普通ポルトランドセメントより多い早強ポルトランドセメントの方が遅延したと考えられる。35℃環境では始発時間が2時間程度と早いことから凝結時間を遅らせるために遅延効果のあるエリソルビン酸ナトリウムを使用したケースも実施した。添加量は35_N_R1でB×1.0%(1.2kg/m³)、35_N_R2×1.5%(1.7kg/m³)とし、それぞれの始発時間は35_N_R1で4.5時間、35_N_R2で10.0時間であった。この結果からエリソルビン酸ナトリウムによって凝結時間を調整することが可能であった。

5℃環境の始発時間と終結時間はかなり遅れる傾向であった。始発時間としては、5_Nで22.1時間、5_Hで16.0時間であり、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントの違いは約6時間程度であった。

3.3 圧縮強度

圧縮強度試験は JIS A 1108 : 2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」で実施した。供試体はφ50×100mmの円柱とし、一度に流し込んで成型した。脱型までの水分の蒸発を防ぐため、表面をビニールシートで覆った。20℃環境は標準養生としたが、35℃環境と5℃環境は恒温室の封緘養生とした。圧縮強度試験の材齢は7日、28日、91日で実施した。ただし、35℃環境の遅延剤を添加したケースでは、材齢91日を実施していない。

圧縮強度試験結果を図-4に示す。20℃環境と35℃環境では、材齢7日で100N/mm²を超えていたが、5℃環境では5_Nの配合では59N/mm²であった。20℃環境と35℃環境では、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントではあまり違いが見られていない。この理由として、普通ポルトランドセメントでも材齢7日で100N/mm²を超えており十分な強度発現しているため、既に粉末度による影響は小さくなっていると考えられる。5℃環境については、材齢7日で5_Hの方が大きいものの、材齢28日ではどちらも100N/mm²程度であった。早強ポルトランドセメントの配合は始発時間や終結時間は早まっているため、材齢7日までは強度促進の効果があ

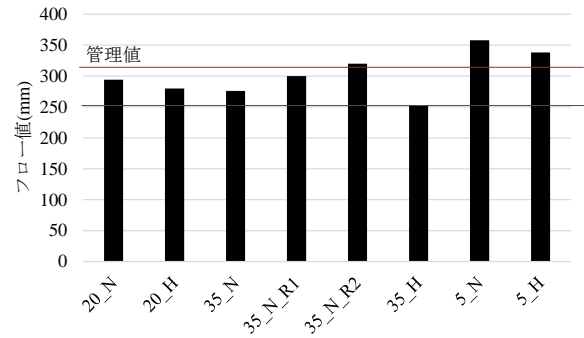


図-1 フロー試験結果

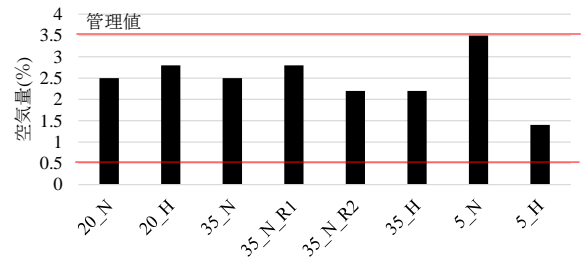


図-2 空気量結果

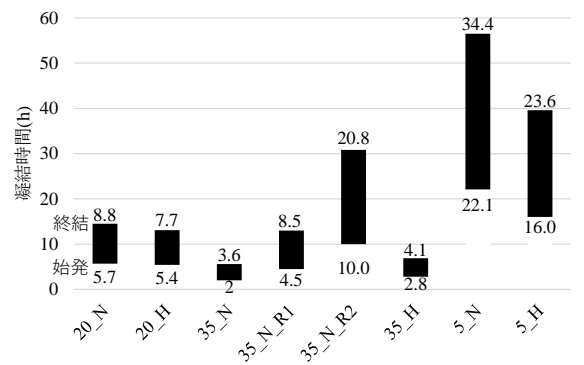


図-3 凝結試験結果

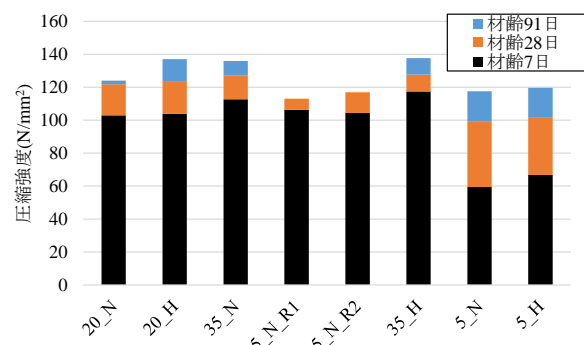


図-4 圧縮試験結果 (シリーズ I)

ると考えられる。

4. 各種諸物性(シリーズ II)

表-2に示す標準配合を対象として普通ポルトランドセメントを使用した配合に対して試験を実施した。

4.1 圧縮強度

圧縮強度試験は JIS A 1108 で実施した。供試体はφ50

×100mm の円柱とし、標準養生とした。土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」³⁾(以下、UFC 指針と略記)では危険率 5%となる値を特性値とされているため、特性値の把握のために供試体を 100 本作製して試験した。圧縮試験機と供試体端面の写真を写真-3 に示す。

圧縮強度試験結果の度数分布を図-5 に示す。圧縮強度の平均値は、114.9N/mm²、標準偏差は 7.3N/mm²であった。平均値と標準偏差で正規分布と仮定した場合で危険率 5%となる値は 102.8N/mm²であった。既往の UFC の標準偏差は 7.7N/mm²であり³⁾、本配合では UFC に比べ平均値は小さいものの標準偏差は同程度の傾向を示した。なお、低強度となる分布形状の左側の頻度が多い傾向が見られ、正規分布からは形状が歪んだものとなっている。これらの要因として、本検討では同時期に製造したプレミックス材を対象としているため、材料に起因するばらつきは小さいと考えられ、それ以外の変動要因は繊維の分散や供試体の製作に起因するものが標準偏差や頻度分布の形状に影響したものと推察されるが特に UFC と優位な差はないと考えられる。

4.2 曲げ強度

曲げ強度および曲げひび割れ発生強度は、UFC 指針 3.5.3 記載「曲げ強度試験方法」で実施した。供試体は 100×100×400mm の角柱とし、材料が均一になるように型枠の端部から一度に流して成形した。供試体は 50 本作製して危険率 5%となる特性値の把握を行った。

曲げ強度試験結果の度数分布を図-6 に示す。曲げ強度の平均値は 24.3N/mm²、標準偏差は 2.5N/mm²であった。平均値と標準偏差で正規分布と仮定した場合で危険率 5%となる値は 20.1N/mm²であった。既往の UFC の標準偏差は 4.6N/mm²であり¹⁾、UFC に比べ標準偏差は小さな傾向を示した。平均値と標準偏差の割合は 10%となっており、その場合でも UFC の 14%より若干小さい値であった。

曲げひび割れ発生強度試験結果の度数分布を図-7 に示す。曲げひび割れ発生強度の平均値は 16.8N/mm²、標準偏差は 1.0N/mm²であった。平均値と標準偏差で正規分布と仮定した場合で危険率 5%となる値は 15.1N/mm²であった。既往の UFC の標準偏差は 1.3N/mm²であり¹⁾、標準偏差は同程度の傾向を示した。

図-6、図-7 の標準偏差や頻度分布の形状に関しては、圧縮強度と同様にプレミックス材の使用や試験体の製作に起因するものが影響したものと推察されるが特に UFC と優位な差はないと考えられる。

4.3 割裂ひび割れ発生強度

割裂ひび割れ発生強度は、UFC 指針 3.5.3 記載「割裂ひび割れ発生強度試験方法」で実施した。供試体は φ100

×200mm の円柱とし、一度に流し込んで成型した。供試体は 50 本作製して危険率 5%となる特性値の把握を行った。

割裂ひび割れ発生強度試験結果の度数分布を図-8 に



写真-3 圧縮試験機（左）と供試体端面（右）の写真

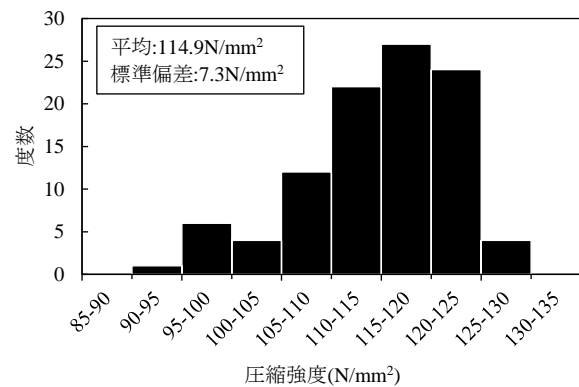


図-5 圧縮試験結果（シリーズII）

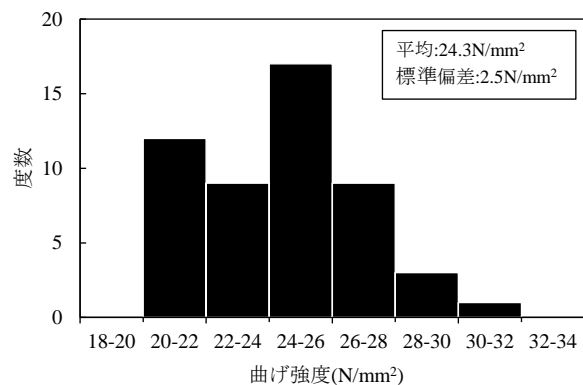


図-6 曲げ強度試験結果

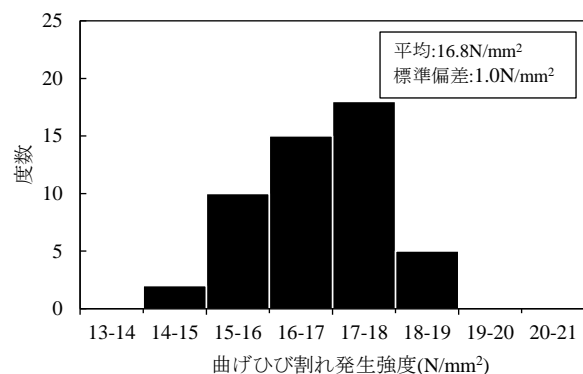


図-7 曲げひび割れ発生強度試験結果

示す。割裂ひび割れ発生強度の平均値は 8.5N/mm^2 、標準偏差は 1.1N/mm^2 であった。平均値と標準偏差で正規分布と仮定した場合で危険率 5%となる値は 6.7N/mm^2 であった。既往の UFC の標準偏差は 1.3N/mm^2 であり³⁾、標準偏差は同程度の傾向を示した。前述したようにプレミックス材の使用や試験体の製作に起因するものが影響したものと推察されるが、特に UFC と優位な差はないと考えられる。

4.4 ヤング係数

ヤング係数は、JIS A 1149 : 2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて測定した。供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体 3 本とし、材齢 28 日で試験した。

ヤング係数の平均値は 40kN/mm^2 であった。日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 1999」の推定式⁴⁾に圧縮強度 114.9N/mm^2 、鋼繊維を含んだ単位体積重量 24.6kN/m^3 とした場合 43kN/mm^2 であり、その値に比べて本配合は小さい値であった。

4.5 自己収縮

自己収縮は、JCI-SAS2 に準拠するセメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)で実施した。供試体は $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱とした。測定は始発を基準とし、材齢 182 日まで実施した。

図-9 に自己収縮ひずみの結果を示す。石膏を添加しているために材齢 1 日では 98×10^{-6} 膨張しており、材齢 182 日までの自己収縮ひずみは 470×10^{-6} であった。

4.6 乾燥収縮

乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129-2 : 2001「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法-第2部:コンタクトゲージ方法」で実施した。供試体は $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱とした。測定は標準養生 7 日後を基準とし、材齢 182 日まで実施した。

図-10 に乾燥収縮ひずみの結果を示す。乾燥収縮ひずみは 390×10^{-6} であったものの、図-9 に示す通り自己収縮は材齢 7 日以降も収縮しているため、この値は自己収縮ひずみも含んでいると考えられる。このため、自己収縮ひずみの 7 日以降の値 264×10^{-6} を差し引くと 126×10^{-6} であり、この値が乾燥収縮ひずみと考えられる。同様に常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリート (W/C=13%, 圧縮強度 180N/mm^2)¹⁾ で算定すると、材齢 7 日以降の自己収縮ひずみは 290×10^{-6} 程度であり、乾燥収縮ひずみ試験の合計値が 400×10^{-6} であるため実際の乾燥収縮ひずみは 110×10^{-6} 程度と考えられる。供試体寸法の違いはあるものの本配合と同程度の乾燥収縮値であった。乾燥収縮は単位水量、骨材、水結合材比、結合材の種類など様々な影響していると考えられるが、単位水量が同じであったことで水分逸散による影響が同程

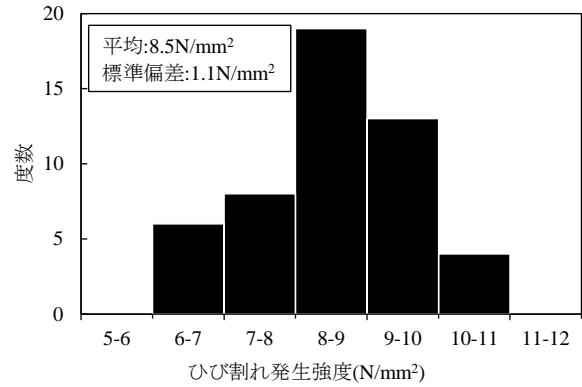


図-8 割裂ひび割れ発生強度試験結果

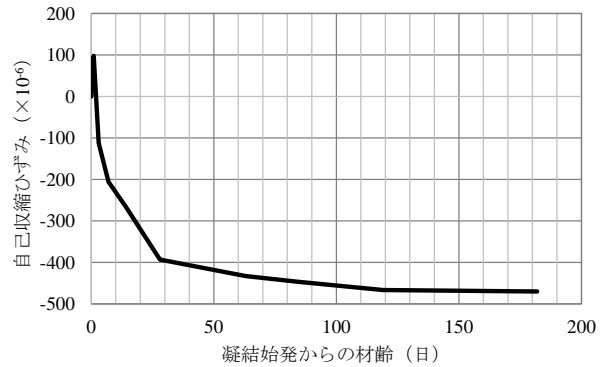


図-9 自己収縮ひずみの試験結果

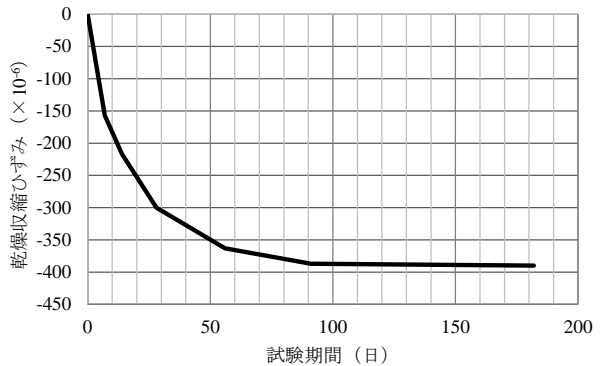


図-10 乾燥収縮ひずみの試験結果

度になったと思われる。

一方、本配合の全収縮ひずみは自己収縮ひずみ 470×10^{-6} と乾燥収縮ひずみ 126×10^{-6} を合わせた 596×10^{-6} であり、既往の常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリートは 770×10^{-6} であることから、本配合の方が小さい。ただし、本配合は材齢 1 日で 98×10^{-6} 膨張しているため、収縮のみとしても小さい値であった。この原因は、水結合材比が大きいため自己収縮が小さくなったことが原因と考えられる。

4.7 凍結融解抵抗性

凍結融解試験は、JIS A 1148 : 2001「コンクリートの凍結融解試験方法 (A 法)」で実施した。465 回以上の凍結

融解抵抗性を有していれば、期間 100 年での凍結融解の繰り返しによる性能の低下はないとされているため⁵⁾、600 サイクルまでで実施した。なお、供試体作製時の空気量は 2.5%であった。

図-11 にサイクル数と相対動弾性係数との関係を示す。凍結融解サイクル 600 回においても相対動弾性係数の低下は認められなかった。また、図-12 にサイクル数と質量変化率との関係を示す。供試体の質量減少も認められなかった。

4.8 中性化

促進中性化試験は、JIS A 1153 : 2003「コンクリートの促進中性化試験方法」とし、中性化深さは、JIS A 1152 : 2002「コンクリートの中性化深さの測定方法」で実施した。供試体は 100×100×400mm の角柱とし、5 体を作成して試験を行った。

促進中性化期間 26 週における供試体にフェノールフタレイン溶液を噴霧した状況を写真-4 に示す。すべての試験体において表層まで紫色となっており、中性化深さは 0.5mm 以下であった。日本建築学会「2009 年度版日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」⁶⁾で示されている超長期(200 年)に対応する促進 26 週における中性化深さは 12.5mm 以下となっているため、高炉スラグ微粉末の割合が多い配合であるものの中性化に対する耐久性は非常に高いことが分かった。高強度であることで緻密性が高く炭酸ガスの浸透性が低いことが原因と考えられる。中性化試験は継続しており、今後中性化速度係数の算定を行う予定である。

5. まとめ

セメントを高炉スラグ微粉末で大量置換した低炭素型でかつ常温硬化性能を有する高強度繊維補強モルタルを検討し、各種物性について確認を行った結果、以下の知見を得た。

(1) 20℃環境では凝結始発を約 5 時間、35℃環境で約 2.0 時間っており、常温硬化で 100N/mm²程度の配合が可能であることを確認した。ただし、5℃環境などの低温時には遅延が大きいことやこわばりがあるため、今後対策を検討する必要がある。

(2) 遅延効果のあるエリソルビン酸ナトリウムを使用することで、高強度繊維補強モルタルの凝結時間を遅らせることが可能であることを確認した。

(3) 本配合の各種硬化物性は、圧縮強度の特性値 102.8N/mm²、曲げ強度の特性値 20.1N/mm²、曲げひび割れ発生強度の特性値は 15.1N/mm²であった。

(4) 材齢 182 日までの自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの合計値である全収縮ひずみは 600×10⁻⁶程度であった。

(5) 凍結融解、中性化に対する抵抗性は非常に高いこと

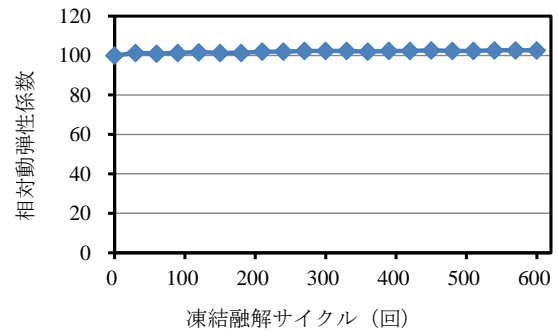


図-11 サイクル数と相対動弾性係数との関係

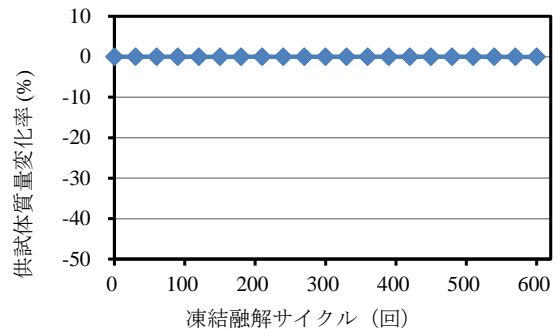


図-12 サイクル数と質量変化率との関係



写真-4 促進中性化試験結果

を確認した。

6. 参考文献

- 1) 玉滝浩司, 吉田浩一郎, 石関嘉一, 平田隆祥: 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの諸性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.208-213, 2012
- 2) SIPHAVANH OUDOMSAK, 藤原浩巳, 丸岡正知, 大塚亮介: 粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を用いた超高強度繊維補強コンクリートの基本性状に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.509-516, 2018
- 3) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, 2005
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 -許容応力度設計法-, 1999.11
- 5) 土木学会: 自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー105, 2001
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.168-176, 2009