

木粉を添加した高炉スラグ高置換コンクリートの配(調)合設計手法および耐久性等に関する実験的検証

A Mix Design Method for High BFS Replacement Ratio Concrete Added with Wood Powder and Experimental Verification of Durability and Other Properties

折田 現太^{*1} 金子 泰明^{*2} 桃木 昌平^{*2} 中島 隆^{*2} 槇島 修^{*3}
Genta Orita Yasuaki Kaneko Shohei Momoki Ryu Nakajima Osamu Makishima

【要旨】

自己養生効果が示唆されている木粉をコンクリートに添加することで、長期間の湿潤養生が必要な高炉スラグ高置換コンクリートの品質確保とCO₂の排出量削減の両立を目指し、配(調)合設計手法の検討および基礎的物性の検証を行った。検証の結果、水結合材比と単位水量、および混和剤の調整によって配(調)合が決定できることを確認した。耐久性に関しては、木粉を添加することによる自己養生効果と強度低下の複合的な要因が、中性化抵抗性ならびに、乾燥による自由収縮ひずみに対して影響を与えると考えられた。また、木粉の添加による凍結融解抵抗性への関連性は確認できなかったが、凍結融解抵抗性への有効な手段を講じる、あるいは凍結融解作用が生じない所への適用に限定する必要がある検証結果となった。

【キーワード】 木粉 高炉スラグ 中性化抵抗性 長さ変化率 凍結融解抵抗性

1. はじめに

近年、コンクリート分野では、カーボンニュートラルの実現に向けて、高炉スラグの分量が高炉セメントC種以上であるセメントで製作されたコンクリート（以降、高炉スラグ高置換コンクリートと呼称）の適用や、CO₂養生によるCO₂固定化、さらには木粉・竹粉・バイオ炭¹⁾といったCO₂固定材料の添加など、さまざまな手法が検討されている。

上記のうち、高炉スラグ高置換コンクリートのような混和材を大量に使用したコンクリートは初期材齢での乾湿の影響を受けやすく、湿潤養生期間が不十分で初期に乾燥作用を受けると強度発現がしにくい²⁾ため、強度や耐久性のポテンシャルを発揮させるためにも、十分な湿潤養生期間を確保する必要がある。

上記の課題に対し、CO₂固定材料であり、自己養生効果が示唆されている木粉³⁾を高炉スラグ高置換コンクリートに添加することで、長期間の養生が必要な高炉スラグ高置換コンクリートの品質安定化と、コンクリート内への木粉の固定化によるカーボンストックが図れるのではないかと考えた。

筆者らは、上記の目的を達成するため、まず、木粉の添加が与える高炉スラグ高置換コンクリートの各種性状への影響を検討した。本論文では、既報の木粉を添加した高炉スラグ高置換コンクリート（以降、木粉コンクリ

ートと呼称）の配(調)合設計手法⁴⁾および、木粉コンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ⁵⁾や、中性化抵抗性⁶⁾の実験結果に加え、凍結融解に対する抵抗性に関する追加の実験結果を総合的に整理した内容について報告する。

2. 木粉コンクリートの配(調)合設計手法検討

2.1 使用材料および検討配(調)合

本検討で用いた使用材料を表-1に示す。結合材は普通ポルトランドセメントおよび、比表面積4380cm²/gの高炉スラグ微粉末BFSを混合したものを使用し、最大骨材

表-1 使用材料

使用材料	諸元
セメント / C	種類：普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
高炉スラグ 微粉末 / BFS	密度：2.91g/cm ³ 、 比表面積 4380cm ² /g
細骨材1 / S1	密度：2.86 g/cm ³ 、粗粒率：2.81
細骨材2 / S2	密度：2.61 g/cm ³ 、粗粒率：1.85
粗骨材 / G	密度：2.72 g/cm ³ 、粗粒率：6.70
混和剤 / Ad	AE 減水剤 標準型
木粉 / WP	スギ、3mm 以下、粗粒率：2.75

1.技術研究所 研究開発 G 環境デザイン研究室 2.技術研究所 研究開発 G 生産システム研究室 3.土木本部 土木技術部

表-2 ベースコンクリートの配(調)合

W/B (%)	s/a (%)	BFS/B (%)	単位量(kg/m ³)						
			W	C	BFS	S1	S2	G	Ad
50.8	45.0	50	179	176	176	603	245	1023	3.52(B×1.0%)

寸法は20mmとした。また、木粉は樹種をスギとし、最大粒径が3mm以下のものを用い、JIS A 1102の骨材のふるい分け試験方法で測定した結果、粗粒率は2.75であった。

配(調)合設計手法の検討で用いたベースとなるコンクリート(以降、ベースコンクリートと呼称)の配(調)合を表-2に示す。水結合材比W/Bは50.8%で、結合材は普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の質量比が1:1 (BFS/B=50%)の高炉セメントB種相当とした。

木粉は気乾状態のものをベースコンクリートの練上がり後に添加することとした。ここで、木粉が気乾状態であるため、コンクリート中の水分を吸収することで、スランプの低下、および木粉に含まれていた空気がコンクリート側に追い出され、コンクリート内の空気量が増加することが予想された。そこで、木粉がコンクリート内の水を吸収することによるスランプの低下に対しては、木粉が表面乾燥状態(以降、表乾状態と呼称)になるために必要と推定される水分(以降、調整水と呼称)をベースコンクリートに添加し、かつ、空気量の増加に対しては、主成分をポリアルキレングリコール誘導体とする空気量調整剤(以降、消泡剤と呼称)を添加して対応した。

2.2 木粉の表乾状態

既往の資料^{7)~10)}を参考に、木粉が表乾状態となるために必要な水分量を算定する。

気乾状態における木粉の単位体積当たりの質量は、式(1)で表せられ、その値を、既往の資料⁷⁾⁷⁾より、0.38g/cm³、気乾状態の木粉の含水率を15%とした。

$$W_{adw} = W_{dw} + U_{adw} \cdot W_{dw} = 0.38 \quad (1)$$

ここに、 W_{adw} は気乾状態における木粉の単位体積質量(g/cm³)、 W_{dw} は絶乾状態における木粉の単位体積質量(g/cm³)、 U_{adw} は気乾状態における木粉の含水率(15%)。

式(1)より、絶乾状態における木粉の単位体積質量は0.33g/cm³となり、気乾状態(含水率15%)の木粉に含まれる水分量は0.05g/cm³となる。

ここで、木粉の細胞壁の密度 ρ_{wp} を1.5g/cm³とすると¹⁰⁾、細胞壁の体積は式(2)より求められ、 V_{dw} は0.22cm³と算出される。

$$V_{dw} = W_{dw} / \rho_{wp} = 0.22 \quad (2)$$

ここに、 V_{dw} は木粉の細胞壁における体積(cm³)、 ρ_{wp} は木粉の細胞壁の密度(g/cm³)。

従って、水の密度を1.0g/cm³とすれば、気乾状態の木粉に存在する空隙は式(3)より0.73cm³と算出される。

$$V_{air} = 1 - V_{dw} - V_w = 0.73 \quad (3)$$

表-3 配(調)合設計手法検討に用いた木粉添加率

木粉添加率 (vol%)	木粉添加量 (kg/m ³)	調整水 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
0.0	0.0	0.0	21.0	3.9
2.0	7.6	14.8	21.0	0.8
5.0	19.0	37.1	17.0	1.3
7.0	26.6	51.9	15.5	2.3
10.0	38.0	74.2	7.0	2.4



図-1 木粉コンクリートの練り混ぜ方法

ここに、 V_{air} は単位体積当たりの気乾状態の木材の空隙体積(cm³)、 V_w は単位体積当たりの気乾状態の木材の水の体積(cm³)。

以上より、気乾状態の木粉1cm³あたりに0.73cm³の空隙が存在し、その空隙が水で満たされた時が木粉の表乾状態と考えられる。

2.3 木粉添加率とスランプの関係

表乾状態の木粉を添加した際のフレッシュコンクリートへの影響を確認するため、表-3に示す木粉添加率でスランプおよび空気量を測定した。木粉コンクリートの練混ぜ方法を図-1に示す。ベースコンクリート作製後、表-3に示す木粉および調整水を加えて60秒間練混ぜ、最後に消泡剤を添加し60秒間練り混ぜた。

木粉の添加率とスランプの関係を図-2に示す。ベースコンクリートと木粉を2%vol添加したコンクリートのスランプは同等の結果となったが、木粉の添加率1%増加するごとに、スランプが1.7cm低下した。これは、最適な細骨材率を超えて細骨材量が増加するとスランプの低下がみられるのと同様の傾向であり、粗粒率が細骨材と同等の木粉の増加が、流動性を阻害する一因であると考え

られる。

2.4 木粉添加率と圧縮強度の関係

木粉の構造は空隙が多く、コンクリート内部の空気と同様に強度低下の要因になると考えられるため、木粉コンクリート内の空気量に木粉の添加率を加算した値を木粉コンクリート全体の空隙とみなし、圧縮強度との関係性を確認した。

空気量に木粉の添加率を加算した値とコンクリート圧縮強度 σ_b の関係を図-3に示す。なお、ベースコンクリートにおける空気量と圧縮強度 σ_b の関係を比較として示す。ベースコンクリートと木粉コンクリートはともに、空気量が1%増加するごとに約1.37N/mm²の強度低下であった。このことから、木粉の添加率が圧縮強度へ与える影響は空気量と同等であると考えられる。

木粉が圧縮強度へ与える影響はベースコンクリートと同程度であるが、線形近似の切片をみると、木粉コンクリートの圧縮強度が約2.5N/mm²小さいことが分かる。これは、木粉の添加によるモルタルマトリクスの変化が、強度低下の要因になっていると考えられる。従って、木粉コンクリートを設計する際は、ベースコンクリートの水セメント比を調整することで、強度の低下分を確保する必要がある。

2.5 木粉コンクリートの調(調)合設計手法

木粉コンクリートの配(調)合設計フロー⁵⁾を図-4に示す。まず、構造物の目標性能を設定し、それを満足するベースコンクリートの配(調)合を決定する。次に、ベースコンクリートに添加する木粉の量を決定し、その木粉が表乾状態になる調整水量を算出する。続いて、木粉の添加によって生じる圧縮強度の低下を考慮して、ベースコンクリートの水セメント比を修正し、加えて、スランブ低下を考慮して単位水量または混和剤量の修正を行う。最終的に、これら一連の調整を踏まえて配(調)合を決定し、試験練りにて目標値の確認を行う。なお、目標値が満足しなかった場合は、水セメント比や単位水量、混和剤量を再度調整する。しかし、これらの対応で目標値を満足できない場合は、木粉の添加量決定の段階まで遡って再設定を行う。以上のフローで配(調)合設計を行うことで、目標値を満足することができる木粉コンクリートの配(調)合が決定できると考える。

3. 木粉を添加したコンクリートの耐久性等

3.1 中性化抵抗性

木粉コンクリートの中性化抵抗性を確認するため、「JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠し試験を行った。表-4に試験で用いたコンクリートの水準を示す。水結合材比は65%、55%、45%の3水準、

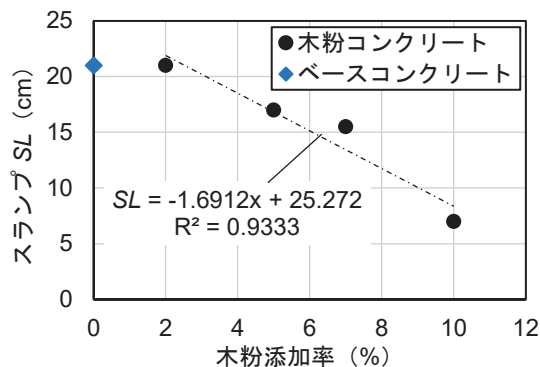


図-2 木粉添加率とスランブの関係⁵⁾

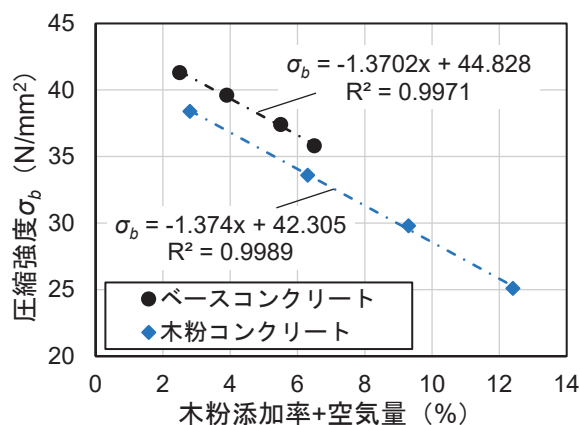


図-3 木粉の添加率+空気量と圧縮強度の関係⁵⁾

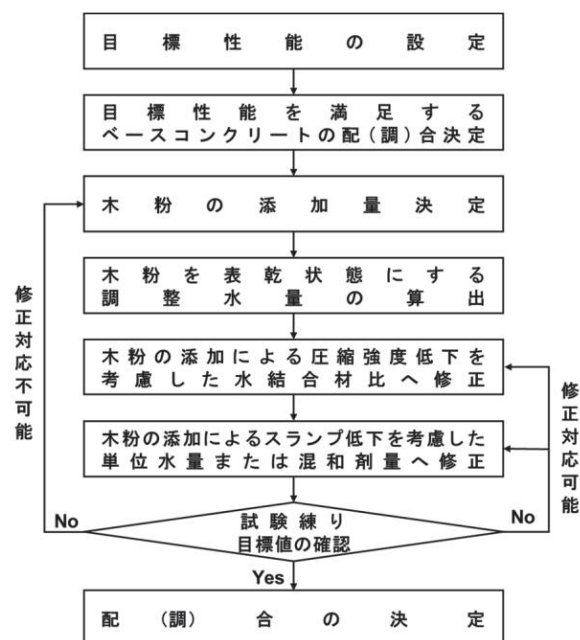


図-4 木粉コンクリートの配(調)合設計フロー⁵⁾

高炉スラグ微粉末の置換率は50%、70%、80%の3水準、木粉の添加率は0%、5%、10%の3水準、計27水準で試験を行った。なお、使用材料は表-1と同様で、中性化深さ測定時の促進期間は材齢1、4、26週である。促進中性化試

験の結果を図-5に示す。同一の水結合材比におけるBFS置換率の影響をみると、置換率が高くなるほど中性化深さは増加する傾向が認められた。

また、同一のBFS置換率における水結合材比の影響をみると、水結合材比が大きいくほど中性化深さは増加する傾向であった。これらの結果は、木粉を添加しない一般的なコンクリートと同様の傾向であり、木粉コンクリートにおいてもBFS置換率および水結合材比の増加に伴い中性化の進行が速くなることを示している。

一方、木粉添加率が中性化抵抗性に与える影響をみると、中性化速度は木粉添加率によって異なり、木粉添加率が0%および10%の条件では中性化が最も速く進行した。一方、木粉添加率が5%の条件では、中性化の進行が同等以下であり、中性化抵抗性の向上が期待できる結果となった。

この結果は、コンクリート内部の緻密性が高いほど圧縮強度や中性化抵抗性が向上するという一般的な傾向とは異なる。これは、木粉が有する多孔質な構造のため、硬化後もコンクリート内部に水分を保持し、二酸化炭素の侵入経路を物理的に遮断することと、木粉添加によるモルタルマトリクス内部構造の変化¹⁾がもたらす二酸化炭素の移動への影響が複合的に関与しているためだと考えられる。従って、適切な量の木粉を添加することによ

って、中性化の進行を抑制する可能性がある。

3.2 長さ変化率

木粉を添加することによる長さ変化率への影響を確認するため、表-4に示した水結合材比55%、BFS置換率80%の木粉添加率0%、5%、10%、についてJISA 1129附属書Aに準拠し、乾燥による自由収縮ひずみ試験を実施した。長さ変化率の経時変化を図-6に、質量減少量の経時変化を図-7に示す。質量減少率が大きい、木粉添加率10%の水準が最も大きい長さ変化率となった。一方、木粉を5%添加した水準はベースコンクリートより質量減少量が大きかったが、長さ変化率が最も小さい結果となった。これは、木粉の保水による自己養生効果の

表-4 耐久性試験等に用いた木粉コンクリートの水準

W/B (%)	s/a (%)	BFS/B (%)	木粉添加率 (%)
65.0	48.0	50, 70, 80	0, 5, 10
55.0	47.0		
45.0	48.5		

【使用材料】 W：上水道水，C：普通ポルトランドセメント，
BFS：高炉スラグ微粉末4000，木粉：スギ3mm以下

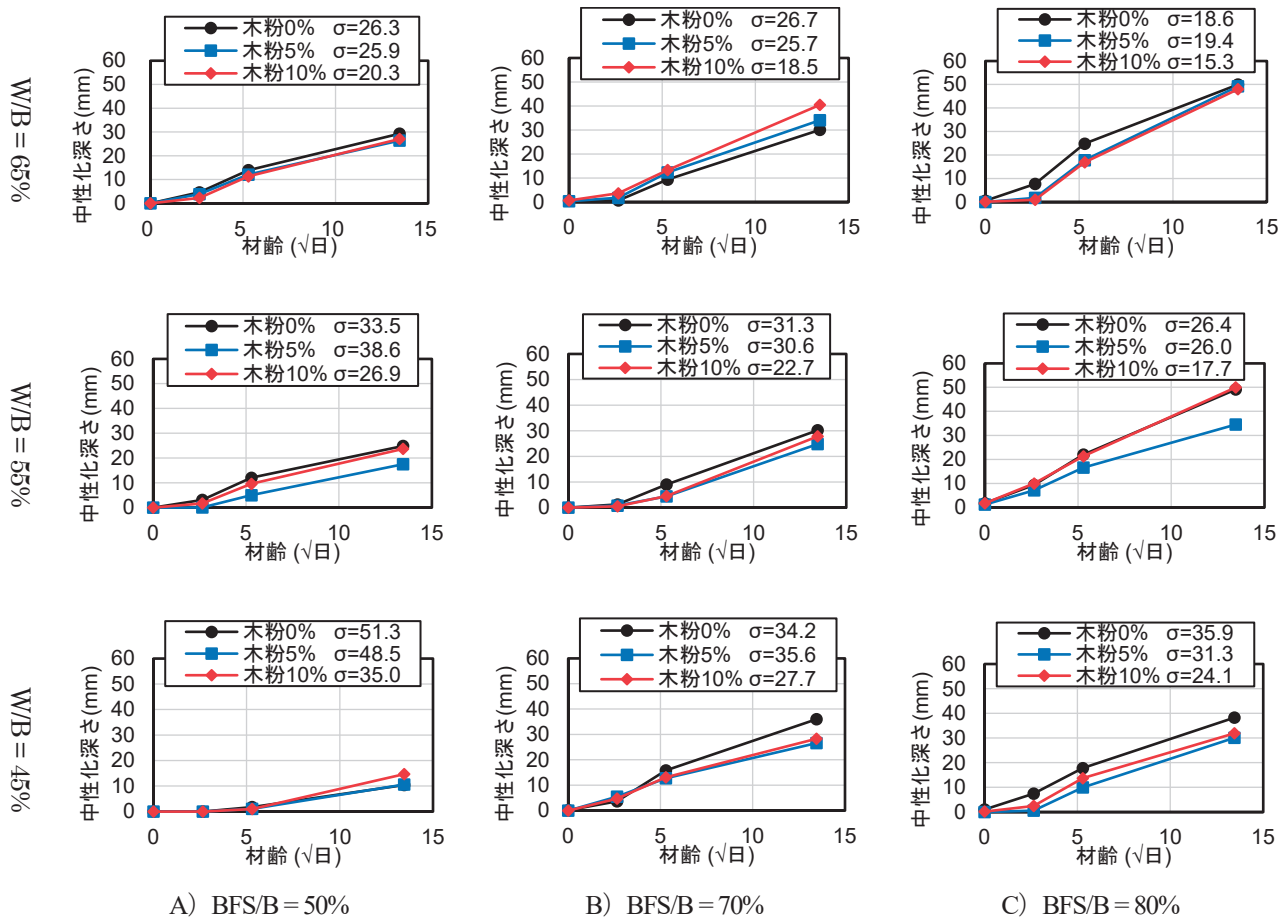


図-5 木粉コンクリートの促進中性化試験結果

影響¹⁾と、木粉を添加したことによるモルタルマトリクスの内部構造の変化¹⁴⁾がもたらす収縮メカニズムへの影響が複合的に関与した結果であると考えられる。従って、適切な量の木粉を添加することで、乾燥による収縮を抑制できる可能性がある。

3.3 凍結融解抵抗性

木粉を添加したことによる凍結融解抵抗性への影響を検証するため、表一4に示した水結合材比55%、木粉添加率5%のBFS置換率が50%、70%、80%の3水準および、水結合材比65%、BFS置換率80%の木粉添加率0%、5%、10%の3水準、水結合材比45%、BFS置換率80%の木粉添加率5%の計7水準で凍結融解試験を実施した。

試験方法はASTM C 672を準拠し、25サイクルまでは5サイクルごとに表面の目視観察およびスケーリング量を測定した。なお、各試験体数は n=2として、上水道水を湛水させた。また、スケーリング量は、プラスチック製のブラシにて剥がれ落ちるモルタル片を採取し、110°Cの乾燥炉にて絶乾状態にしたのちに測定した。

凍結融解試験の結果を図一8に示す。なお、グラフ横軸の試験体名は「水結合材比-BFS置換率-木粉添加率」で構成されており、棒グラフ上の数値はフレッシュコンクリート試験時の空気量を表している。

水結合材比65%、BFS置換率80%の水準で木粉添加率と凍結融解抵抗性の関係をみると、木粉添加率10%が最も凍結融解抵抗性を有し、添加率5%が最も凍結融解抵抗性を有していない結果となり、木粉の添加率と凍結融解抵抗性に明確な関連性は見られなかった。

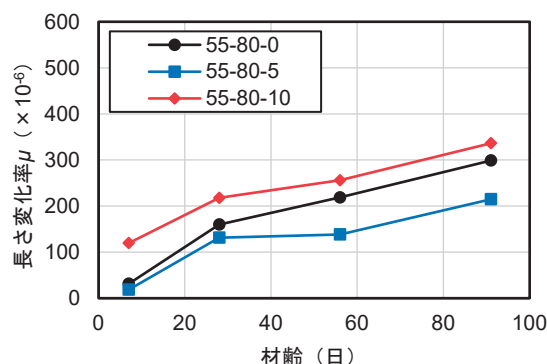
一方、水結合材比55%、木粉添加率5%の水準でBFS置換率と凍結融解抵抗性の関係をみると、BFS置換率が高くなるにつれて凍結融解抵抗性が低くなる傾向を示した。また、BFS置換率80%、木粉添加率5%の水準で、水結合材比と凍結融解抵抗性の関係をみると、水結合材比が大きいほど凍結融解抵抗性は低くなる傾向がみられた。

凍結融解抵抗性に関する基準として、東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)¹¹⁾では、スケーリング試験で、500g/m²以下⁹⁾とする記載がある。本試験結果では、「65-80-10」および「55-50-5」の水準で上記の目標値を満足しているが、木粉を添加することによる凍結融解抵抗性への有害な影響は否定できない。従って、凍結融解抵抗性に有効な手段を講じる、あるいは凍結融解作用が生じない所での適用に限る必要がある。

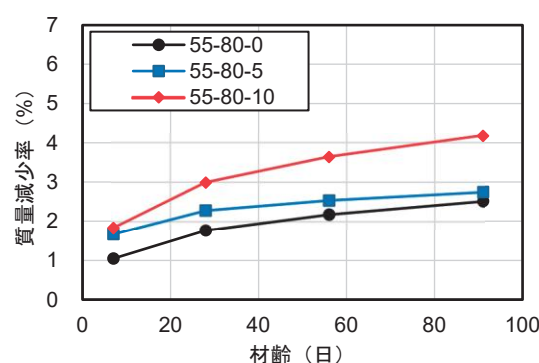
4. まとめ

本研究では、木粉を添加した高炉スラグ高置換コンクリートの配(調)合設計手法および基礎的物性に関して検証した。本検証で得られた知見を以下に示す。

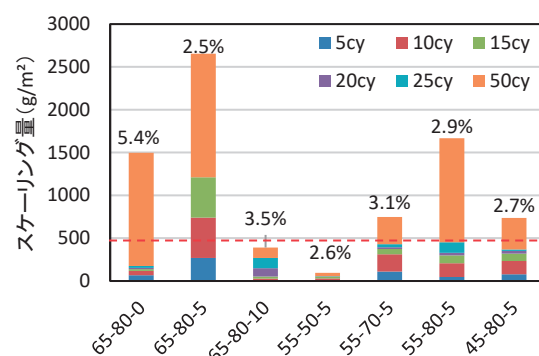
1. 木粉を添加すること、でスランプおよび圧縮強度が低



図一6 長さ変化率の経時変化⁶⁾



図一7 質量減少量の経時変化⁶⁾



※ グラフ上部の数値はコンクリートの空気量

図一8 凍結融解試験結果

下するため、水結合材比および、単位水量または混和剤の調整で、圧縮強度およびスランプ性状を満足する配(調)合を設計することが可能である。

2. 木粉コンクリートの中酸化抵抗性は、木粉内に保持された水分による二酸化炭素の侵入経路遮断と、木粉を添加したことによるモルタルマトリクスの変化による複合的な影響を受けたと考えられる。
3. 木粉コンクリートの乾燥収縮による自由ひずみは、木粉の保水による自己養生効果と、木粉を添加したことによるモルタルマトリクスの変化による複合的な影響を受けると考えられる。
4. 木粉を添加することによって凍結融解抵抗性が

500g/m²の目標値を満足する試験水準もあるが、木粉の添加による凍結融解抵抗性への有害な影響は否定できないため、凍結融解作用に有効な手段を講じる、あるいは凍結融解作用を受けない所への適用に限定する必要がある。

木粉コンクリートは水結合材比や混和剤の調整が必要となるが、本論文の検証結果から、適切な量の木粉をコンクリートに添加することで、自己養生効果による乾燥収縮による自由収縮ひずみの抑制や、中性化抵抗性の向上が示唆され、木粉コンクリートの実現が可能であると考えられる。また、少量ではあるが、CO₂固定材料である木粉をコンクリート内にストックすることができ、カーボンニュートラルへの貢献も期待できる。

今後は、木粉を添加することによるモルタルマトリクスの微視的な評価からコンクリートの各種物性をより詳細に検討することが必要である。また、木粉の添加率と養生期間の違いがコンクリートへ与える影響を検証し、自己養生効果をさらに詳しく評価することで、養生期間の短縮に繋げていきたい。

【参考文献】

- 1) 田中泰司: 粉末状自己養生材料による自己収縮低減効果, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, V-449, pp.897-898, 2010.9
- 2) 須藤太貴, 濱永康仁, 吉川優夏: 竹の粉末を混入したモルタルの収縮低減効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 1583, pp.1165-1166, 2022.9
- 3) 幸田圭司, 木原亮太, 山本伸也, 清水和昭, 田中博一, 久保昌史: バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートのフレッシュ性状, 土木学会第 77 回年次学術講演会概要集, V-244, 2022.9
- 4) 土木学会: 混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー, 152, 2018.9
- 5) 金子泰明, 折田現太, 槇島修: 木粉を添加したコンクリートの配合設計手法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol47, No.1, pp.1836-1814, 2025.7
- 6) 折田現太, 金子泰明, 槇島修: 木粉を添加したコンクリートの基礎的物性に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概 (九州) 1254, pp.507-508, 2025.9
- 7) 日本木材総合情報センター: 木 net~木と森の情報館~, 木材の種類と特性 木材の一覧と検索「スギ 杉, 桧」, <https://www.jawic.or.jp/woods/sch.php?nam0=sugi> (閲覧日: 2024 年 12 月 25 日)
- 8) 「世界の有用木材 300 種」農林省林業試験場木材編, 公益社団法人日本木材加工技術協会, 1975
- 9) 三輪茂雄: 粉体材料の基礎的性質の測定 (II) 粉体材料の密度, 材料, 第 19 巻, 第 200 号, pp.476-483, 1970.5
- 10) 藤原健: 木材の密度について, 海外の森林と林業 No.90, pp.37-39, 2014
- 11) 南享二: 木材とセメントの相互的作用について-硬化不良に関連して-, コンクリートジャーナル, Vol.4, No.5, pp.1-8, 1966.5
- 12) 国土交通省 東北地方整備局: 東北地方における凍害対策に関する参考資料 (案), 2019.3

Summary To strike a balance between ensuring the quality of high GGBFS replacement ratio concrete, which requires long-term wet curing, and reducing CO₂ emissions, we conceived the idea of adding a type of wood powder supposed to promote the self-curing of concrete. We considered the mix design method for this type of concrete and verified its basic physical properties. The verification results confirmed that the mix design could be determined by adjusting the water-binder ratio, the water content per unit volume, and the admixtures. Regarding the durability of the concrete, the synergy between the self-curing and strength-reducing effects caused by the added wood powder likely impacted the neutralization resistance of the concrete and the free contraction strain in it during the drying process. We found no correlation between the addition of wood powder and the freeze-thaw resistance of the concrete. However, the verification results indicated the need to implement effective measures against freeze-thaw resistance or to add wood powder only to areas where freeze-thaw action did not occur.

Key Words : Wood Powder, Blast Furnace Slag, Neutralization Resistance, Length Change Rate, Freeze-Thaw Resistance