

論文 木粉を添加したコンクリートの配合設計手法の提案

金子 泰明*¹・折田 現太*¹・槇島 修*²

要旨：近年、コンクリートの低炭素化や CO₂ が固定化された材料をコンクリートに添加することで環境配慮型の材料とする方法が検討されている。その中で、コンクリートの自己養生材料として検討されている木粉や竹粉が、CO₂ 固定材料として有効であると考えられる。しかし、木粉をコンクリートに添加する場合、木粉の水分の保持状態や吸水特性を考慮して配(調)合設計をする必要があるが、その手法は明確になっていない。本研究では、木粉の表乾状態の考え方を整理するとともに、コンクリートに木粉を添加したコンクリートの空気量や圧縮強度への影響を実験的に評価し、配(調)合設計の考え方を提案した。

キーワード：木粉、フレッシュ性状、空気量、圧縮強度

1. はじめに

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて CO₂ を始めとした温室効果ガスの排出量削減技術が検討されている。コンクリート分野では、混和材の添加によるコンクリートの低炭素化、CO₂ 養生によるコンクリートへの CO₂ 固定化、CO₂ 固定材料の添加などがあり、これらを組み合わせることで、より効果的な CO₂ 排出量の削減が期待されている¹⁾³⁾。

このうち、CO₂ 固定材料の添加では、スラッジ水由来の水酸化カルシウムと CO₂ との反応によって生成した炭酸カルシウムをコンクリートに添加する方法⁴⁾や、木炭微粉末を添加する方法⁵⁾などが提案されている。一方で、コンクリートの自己養生材料として木粉や竹粉を添加する試みがあり⁶⁾⁷⁾、これらも CO₂ 固定材料の添加として有効であると考えられる。なお、事前の確認試験にて、竹粉の添加による凝結遅延が確認されたため、本研究では木粉を対象とした。

しかし、木粉をコンクリートに添加する場合、木粉に水分が吸水されることによるワーカビリティの低下や、強度の低い材料が添加されることによる圧縮強度の低下が想定される。そのため、この方法による低炭素化手法について検討する際、これらを考慮した配(調)合設計方法が必要と考えられる。

そこで、本研究では、木粉の添加がコンクリートの性状に与える影響を実験的に評価し、目標とするワーカビリティや圧縮強度を満足する配(調)合設計方法を提案

する。

2. 木粉の添加がフレッシュ性状に与える影響

木粉をコンクリートに添加した場合のフレッシュ性状を把握するため、表-1に示す配(調)合でスランプおよび空気量を測定した。コンクリートに添加する木粉は、入手の容易さから、写真-1に示すスギの木粉(3mm以下)とした。木粉のふるい試験の結果を図-1に示す。粗粒率は2.75となり、コンクリートに使用する細骨材と同程度であった。

結合材は、セメントの50%を高炉スラグ微粉末に置き換えた高炉セメントB種相当とした。使用した材料の諸



写真-1 使用した木粉の外観

表-1 検討配(調)合

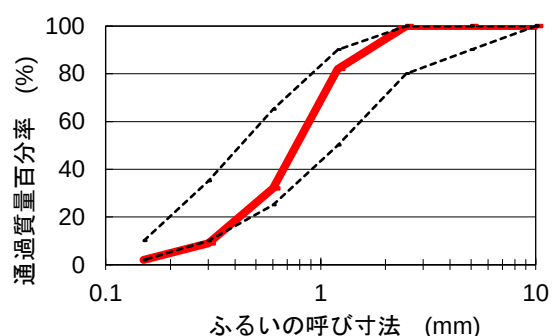
W/C(%)	s/a(%)	BFS/B	単位量(kg/m ³)							
			W	C	BFS	S1	S2	G	Ad	WP
50.8	45.0	0.5	179	176	176	603	245	1023	3.52 (B×1.0%)	16.5 (5 vol%)

*1 飛島建設(株) 研究開発グループ第三研究室 副主任研究員 工修 (正会員)

*2 飛島建設(株) 研究開発グループ第三研究室 室長 工博 (正会員)

表－2 使用材料

使用材料		物性値
セメント	/C	密度：3.14g/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
減水剤	/Ad	AE 減水剤 標準型
木粉	/WP	スギ，3mm 以下，



図－1 木粉のふるい試験結果

表－3 フレッシュ試験結果

種類	スランプ (cm)	空気量(%)	CT(℃)
ベース	20.0	2.9	21
木粉添加	2.0	6.8	21

元を表－2に示す。

ベースコンクリートの練上がり後に木粉を添加し，再度練混ぜることで，木粉を添加したコンクリートを作製した。試験に用いた木粉は，温度 20℃相対湿度 60%の環境に 72 時間静置した状態（後述する気乾状態）で使用した。空気量の測定は JIS A 1128 に準拠した。

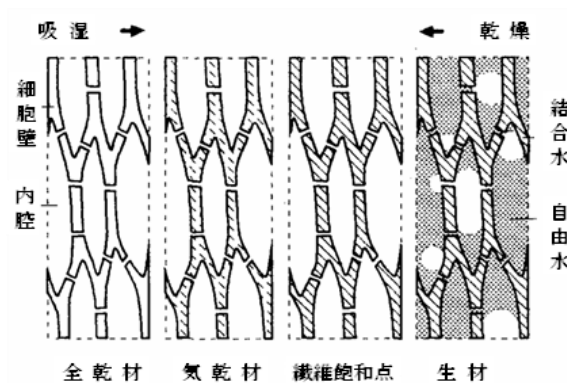
フレッシュ試験の結果を表－3に，スランプの状態を写真－2に示す。木粉の添加によってスランプは 18.0cm 低下し，空気量は 3.9%増加する結果となった。スランプが低下した原因は，コンクリート中の水分が木粉に吸収されたためと考えられる。また，空気量に関しては，木粉中に存在した空気が水と置換されたことで増加した可能性がある。そのため，木粉を添加したコンクリートが所定の品質を満足するためには，スランプの低下を補い，空気量を調整する必要がある。木粉の吸水によるスランプの低下に対しては，木粉が吸収する水量を次章に示す考え方によって算定した調整水を，練り混ぜ時に添加することで，空気量の増加に対しては消泡剤の添加によって対応した。



(a) ベースコンクリート



(b) 木粉添加コンクリート(5 vol%)
写真－2 スランプの状態（木粉添加）

図－2 木材中での水分の存在状態（模式図）⁸⁾

3. 配(調)合設計における木粉の取り扱い

3.1 木粉の物理的な性質

木粉がコンクリート中の水分を吸収することでスランプが大きく低下してしまうため，木粉内部の空隙が全て水で満たされ，表面に水がない状態である表面乾燥飽水状態（以下，表乾状態と称する）に木粉を調整することでスランプ低下を防ぐ必要がある。

木材は，図－2に示すように内腔と呼ばれる空洞部分

と細胞壁で構成されていることが既往の文献⁸⁾にて示されており、木材中に含まれる水分については、「木材中に含まれる水分は自由水と結合水に分けられ、自由水は細胞内腔などに液状で含まれている水分であり、結合水は細胞壁中で木材と結合している水分である。自由水は、その量が増減しても木材の基本的な性質にあまり影響しないが、結合水の変化は木材の体積、電気抵抗、強度および剛性などに影響する。」と示されている。

また、吸湿、乾燥の状態に応じて「全乾材」「気乾材」「繊維飽和点」「生材」に区分され、細胞壁が結合水で飽和し、自由水が含まれない状態を「繊維飽和点」、繊維飽和点を超えて内腔にも水が存在する状態の木材を「生材」、大気中に長時間置かれ、乾燥によって細胞壁中の結合水が少なくなった状態の木材を「気乾材」、気乾材を 100℃ 付近まで加熱乾燥させて結合水が取り除かれた状態の木材を「全乾材」と区分されている。

ただし、木粉の表乾状態は、骨材の様に目視や表乾コーン等によって容易に評価できないため、表乾状態とするためには、木粉の体積のうち吸水可能な空隙の量を推定し、木粉が含水可能な水量を算定する必要がある。

なお、木材の細胞壁の密度は真密度と呼ばれ、樹種によらず約 1.5g/cm³ で一定とされている⁹⁾。木粉の真密度を確認するために土粒子の密度試験 JISA1202 に準拠して絶乾状態の木粉の密度を測定した結果、測定された密度は 1.528g/cm³ となり、既往の文献に示されている 1.5g/cm³ と同程度となることを確認した。

3.2 木粉の調整水量

既往の文献⁹⁾より、若齢時に形成された材の密度はそれよりも樹皮側の材に比べて密度が低い傾向にあることが示されている。そのため、木粉の密度にはばらつきがあると考えられるが、既往の資料¹⁰⁾⁻¹²⁾にて、一般的なスギの気乾材の密度（以下、気乾密度と称する）および含水率が 0.38g/cm³、15%であることが示されていることから、本検討では上記の値を採用した。ここで、含水率とは、絶乾状態の木材（全乾材）の質量に対して、含まれている水の質量である。単位体積当たりの気乾状態の木材の質量は以下の式で表される。

$$W_{adw} = W_{dw} + 0.15W_{dw} \quad (1)$$

W_{adw} : 単位体積当たりの気乾状態の木材質量(g)

W_{dw} : 単位体積当たりの絶乾状態の木材質量(g)

気乾状態の木材密度は 0.38g/cm³ であるため、単位体積当たりの絶乾状態の木材質量は 0.33g となる。次に、単位体積当たりの気乾状態の木材に含まれる水の質量は式(2)で表される。

$$W_w = W_{adw} - W_{dw} \quad (2)$$

W_w : 単位体積当たりの気乾状態の木材に含まれる水の質量(g)

このとき、真密度を 1.5 g/cm³ とすれば、細胞壁の体積は式(3)となるため、

$$V_{dw} = W_{dw} / \rho_w \quad (3)$$

V_{dw} : 細胞壁の体積(cm³)

ρ_w : 真密度(g/cm³)

細胞壁の体積 V_{dw} は 0.22cm³ と算定される。水の密度が 1.0 g/cm³ であれば、単位体積当たりの木材に含まれる水の体積は式(2)より 0.05cm³ となることから、単位体積当たりの気乾状態の木材に存在する空隙の量は式(4)で表される。

$$V_{air} = 1 - V_{dw} - V_w \quad (4)$$

V_{air} : 単位体積当たりの気乾状態の木材の空隙体積(cm³)

V_w : 単位体積当たりの気乾状態の木材の水の体積(cm³)

単位体積当たりの気乾状態の木材の空隙体積が 0.73cm³ となるため、木粉が気乾状態であると仮定すると、気乾状態の木粉 1cm³ あたりに 0.73g の水を添加することで表乾状態にできるものと考えられる。

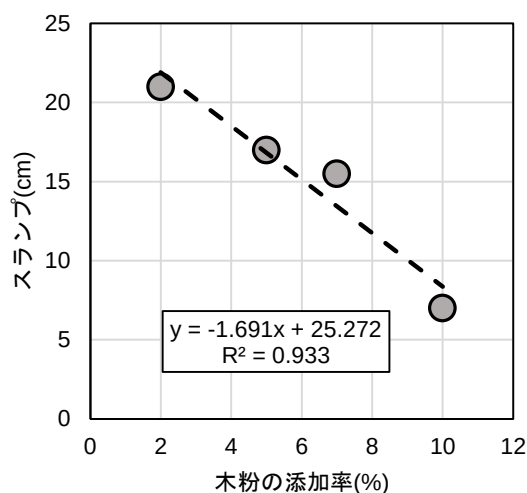
使用する木粉が気乾状態であることを確認することは困難であるため、温度 20℃、相対湿度 60%の環境 72 時間静置した木粉を気乾状態と仮定した。なお、温度 20℃、相対湿度 60%の環境に木粉を静置すると、72 時間で質量が一定となることを事前に確認している。その気乾状態の木粉をコンクリートに添加する際に、表乾状態となるために必要な水量を添加して圧縮強度を確認することで、木粉の表乾状態を評価した。以降より、気乾状態の木粉を表乾状態にするために添加する水を「調整水」と呼称する。

表－4 木粉添加率および調整水量

木粉添加率 (vol %)	木粉添加量 (kg/m ³)	調整水量 (kg/m ³)
2.0	7.6	14.8
5.0	19.0	37.1
7.0	26.6	51.9
10.0	38.0	74.2

表－５ フレッシュ試験結果

木粉添加率 (vol %)	スランプ(cm)	Air(%)	CT(°C)
2	21	0.8	21
5	17	1.3	21
7	15.5	2.3	21
10	7	2.4	21



図－３ 木粉添加率とスランプの関係

4. 木粉添加がコンクリート性状に与える影響

4.1 試験方法

気乾状態の木粉の添加率および調整水量の関係を表－４に示す。配(調)合は表－１と同じものとした。気乾状態の木粉の添加率は、コンクリート体積に対して 2%、5%、7%、10%とした。また、全ての配(調)合に消泡剤を添加してベースコンクリートと同等以下の空気量になるように調整した。調整水、消泡剤および木粉は、ベースコンクリートの練上がり後に添加して練り混ぜた。

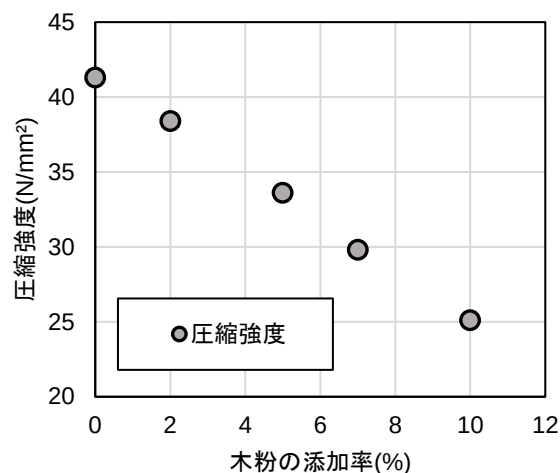
練り上がり後のスランプと空気量を測定することで、木粉の添加がフレッシュコンクリートの性状に与える影響を把握した。空気量の測定は JIS A 1128 に準拠した。

また、木粉の添加が強度に与える影響を把握するために圧縮強度試験を実施した。試験体作製から 3 日後に脱枠し、20℃の水中で材齢 28 日まで養生した。

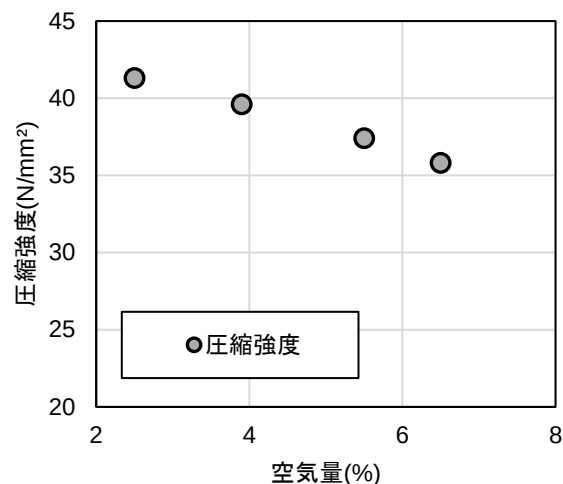
4.2 フレッシュコンクリート試験結果

試験結果を表－５に示す。ベースコンクリートの空気量に対して、木粉添加コンクリートの空気量が同等以下(0.5～3.0%)になっていることを確認した。

木粉の添加によるスランプへの影響を図－３に示す。表乾状態の木粉の添加率が増加するほど流動性が低下することが確認された。木粉の添加率とスランプの関係は直線関係がみられ、木粉の添加率が 1%増加するとスラ



図－４ 木粉添加率と圧縮強度の関係



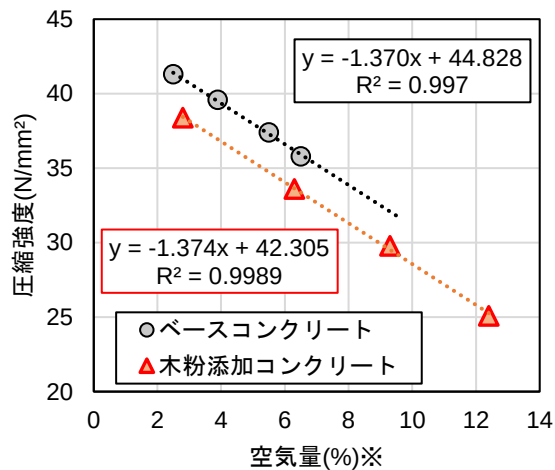
図－５ 空気量と圧縮強度の関係
(ベースコンクリート)

ンプが 1.7cm 程度低下した。このことは、木粉の表面にモルタルが付着することが流動性に影響し、スランプが低下したものと考えられる。このことから、理論上の表乾状態の木粉を添加したコンクリートでは、ベースコンクリートと同等のスランプにするために、単位水量の増加や混和剤の使用によって調整する必要がある。

4.3 圧縮強度試験結果

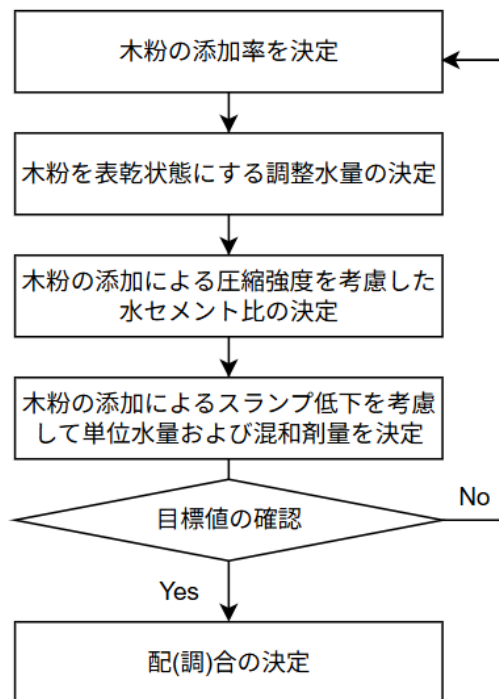
木粉の添加率と圧縮強度の関係を図－４に示す。木粉の添加率の増加に伴って圧縮強度が直線的に低下する傾向が確認された。AE 剤を用いて空気量を変化させたベースコンクリートの空気量と圧縮強度の関係を図－５に示す。ベースコンクリートに対して 2A, 3A, 6A の AE 剤を添加した。なお、カタログに記載されている関係式から、空気量が 1%増加する AE 剤の添加率を 1A として求めた。多くの文献で示されている通り、空気量の増加に伴って強度が低下する傾向となった。

木粉を空気量として計算して、圧縮強度をプロットし



※木粉添加コンクリートの空気量は、実測の空気量+木粉添加率である

図－6 空気量と圧縮強度の関係（材齢 28 日）



図－7 木粉を添加したコンクリートの設計フロー

た結果を図－6 に示す。空気量と圧縮強度の関係も併せて示す。切片が約 2.5N/mm² 変化しており、木粉の添加によるモルタルマトリクスが変化している可能性がある。また、木粉の添加による圧縮強度の変化率は-1.374、空気量の変化による圧縮強度の変化率は-1.370 であり、木粉の添加率が 1% 増加することによる圧縮強度の低下率と、空気量が 1% 増加することによる圧縮強度の低下率が同程度となった。木粉はコンクリートに比べて圧縮強度が低いことから、木質材料の添加がコンクリートの圧縮強度へ与える影響は、空気量と同程度であると考えられた。

以上のことから、木粉を理論的な表乾状態とするため

の調整水の添加による圧縮強度の低下は生じていないとみられ、木粉の表乾状態の調整方法が妥当なものであったと考えられる。また、調整水を計算するために用いた値は適当であったと考えられる。

木粉をコンクリートに添加することによる圧縮強度の低下を考慮して配(調)合設計する場合には、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。

5. 木粉を添加したコンクリートの配(調)合設計

木粉の添加に併せて理論的な表乾状態となる水量を添加することで、木粉の添加率とスランプおよび圧縮強度の関係を確認した。木粉を添加するコンクリートの配(調)合設定のフローは図－7 のように考えられる。木粉の添加によって低下する圧縮強度を考慮して水セメント比を決定する必要がある。そして、単位水量の増加または混和剤の添加によってスランプを確保することで、木粉を添加したコンクリートの配(調)合を決定することができる。

また、乾燥収縮、促進中性化や凍結融解などの耐久性試験に関しては今後検討していく予定であるが、既往の研究^{6),7)}のように自己養生効果が得られるのであれば、長期強度の増進や乾燥収縮の抑制などが期待される。

6. まとめ

本研究によって得られた結果を以下に示す。

- (1) 気乾状態の木粉をコンクリートに添加した場合、スランプは低下し、空気量が増大する。
- (2) コンクリートに添加する木粉は、真密度と気乾密度および気乾状態の含水率から表乾状態にするための空隙量が算定できる。
- (3) 木粉を理論的な表乾状態とするための調整水を加えてもスランプが低下することから、スランプ確保のためには単位水量の増加または減水剤などの混和剤の使用が必要となる。
- (4) 木粉を添加したコンクリートは、木粉の添加割合に応じて圧縮強度が低下するため、必要強度を得るためには、木粉の添加割合分の強度低下を見込んだ水セメント比の設定が必要となる。

なお、本稿は木粉をコンクリートに添加した場合のフレッシュ性状と圧縮強度に着目して配(調)合設計手法を検討したものである。今後は、木粉を添加したコンクリートの乾燥収縮、中性化抵抗性および凍結融解抵抗性などを把握し、コンクリート部材への適用を検討する予定である。

参考文献

- 1) 土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会，大林組，大成建設，前田建設工業，戸田建設，西松建設，鐵鋼スラグ協会，電源開発：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅰ）低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案），共同研究報告書整理番号第 471 号，2016.1
- 2) 取違剛，横関康祐，吉岡一郎，盛岡実：炭酸化養生を行ったコンクリートの CO₂ 収支ならびに品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，2012
- 3) 取違剛，横関康祐，吉岡一郎，盛岡実：炭酸化したセメント系材料における CO₂ 固定量の評価手法および物性変化に関する研究，土木学会論文集 E2，Vol.77，No.2，pp.37-54，2021
- 4) 梅津真見子，宮原茂禎，橋本理，松元淳一，本田和也，小西正芳：リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本性状，土木学会第 78 回年次学術講演会概要集，V-588，2023.9
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 佐道健：水分変化による木材の寸法と形状の変化，木材保存，Vol.22-2，pp.2-9，1996
- 9) 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
- 10) 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）
- 11) 「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
- 12) 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