

論文 骨材の初期含水量が超軽量コンクリートの特性に及ぼす影響

柿沢忠弘^{*1}、大野定俊^{*2}、米澤敏男^{*2}

論旨：超軽量コンクリートに用いる絶乾状態の軽量骨材は、その表面層で初期に急激な吸水を起し、それ以降は骨材内部での緩やかな吸水を生じる。調合通りのコンクリートの材料特性を得るためには、練混ぜ中に単位水量を変化させないことが重要であり、そのためには単位水量に影響しない程度の量の水（以下、補正水）を練混ぜ前に骨材に吸水させることが必要である。補正水によりコンクリートのスランプ変化をある程度抑えることが可能であり、練上がり後には骨材中に吸水されるので、調合通りの材料特性が確保できる。

キーワード：軽量骨材, 超軽量コンクリート, スランプ, 吸水, 比重, 乾燥収縮

1. はじめに

コンクリート部材の軽量化のニーズは高く、気泡の導入や各種の軽量骨材を用いた軽量コンクリートに関する研究が行われている。最近では絶乾比重が1.0以下の膨張頁岩系人工超軽量粗骨材の使用により、気乾単位容積質量が1.40 (ton/m³)以下の超軽量コンクリートを製造することが可能になってきた。¹⁾ この場合、軽量骨材を絶乾状態で用いると骨材の品質管理も容易になり、コンクリートは十分な耐久性・耐火性を確保できる。しかし、練混ぜから打設にいたる間に骨材が周囲のペーストから吸水し、コンクリートのフレッシュな性状と硬化特性に影響することが報告されており²⁾、強度特性をはじめ調合通りの材料特性が得られない場合が考えられる。所定の材料特性を得るためには練混ぜ中に調合上の単位水量を変化させないことが重要であり、そのためには、骨材の吸水量がほぼ一定となるまでの水（補正水）を予め軽量骨材に添加する方法が効果的である。本論文では、補正水を添加した絶乾状態の軽量骨材がフレッシュコンクリートの特性に及ぼす影響を定量的に評価すると同時にコンクリートの硬化特性について検討し、補正水の効果を実験的に検証した。

2. 実験概要

2.1 実験項目

測定項目を表-1に示す。実験1では、水中に浸した絶乾状態の軽量骨材（以下、絶乾骨材）の吸水率の経時変化を調べたが、特に超軽量粗骨材については吸水状態を可視化するために、赤インクに0~60分間浸してカットし、内部の状況を観察した。さらに補正水を添加した軽量骨材の、水中とフレッシュコンクリート中での吸水特性についても検討した。補正水を添加した絶乾骨材が超軽量コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を調べる実験（実験2）では、補正水量を要因として練上がり後のスランプ（JIS A 1101）と単位容積質量（JIS A 1116）の経時変化、ならび

表-1 測定項目

シリーズ	測定項目
実験1	1)絶乾骨材の吸水状態の可視化 2)骨材の吸水率の経時変化 絶乾状態 : 水中 補正水添加 : 水中、フレッシュコンクリート中
実験2	1)スランプ経時変化:絶乾状態、補正水添加 2)骨材の吸水率 :フレッシュコンクリート中 3)練り上がり単位容積質量の経時変化
実験3	1)圧縮強度 2)気乾単位容積質量 3)乾燥収縮

補正水：絶乾状態の骨材の30分吸水量

*1 竹中工務店 技術研究所 生産研究開発部 工修（正会員）

*2 竹中工務店 技術研究所 生産研究開発部 Ph.D.（正会員）

に空気量 (JIS A 1128) を測定した。また硬化後の特性を調べる実験 (実験3) では骨材の初期含水状態が影響を及ぼすと考えられる気乾単位容積質量と乾燥収縮についておもに検討した。蒸気養生後に気乾養生 (20℃, 60% R.H.) した試験体 (φ 10 × 20cm) により材齢 28 日で圧縮強度 (JIS A 1108) を測定する一方で、気乾単位容積質量 (φ 15 × 30 : 20℃, 60% R.H.), 乾燥収縮 (JIS A 1129) は蒸気養生後から測定を開始した。

2.2 使用材料と調合、練混ぜ方法

表-2, 3にコンクリートの使用材料と調合を示す。また図-1には絶乾骨材 (初期含水率0%) を用いたコンクリートの練混ぜ方法を示す。絶乾骨材が練混ぜから打設にいたる間 (30分間) に吸水すると予想される補正水量を骨材に添加した後、セメント、水、混和剤をミキサー (100リットル強制攪拌式) に投入し、所定の時間練混ぜた。プレソーキングした骨材 (含水率: 20~27%) はセメント、水、混和剤とともに一括投入して練混ぜた。

表-2 使用材料

材料	種類	
セメント	早強セメント	比重 3.14
粗骨材	膨張頁岩系超軽量骨材	比重 0.90 (絶乾)
	膨張頁岩系軽量骨材	比重 1.30 (絶乾)
細骨材	膨張頁岩系軽量骨材	比重 1.68 (絶乾)
混和剤	AE減水剤・標準型I種 (空気量調整剤含む)	リグニンスルホン酸・ポリオール複合体

表-3 調合

W/C (%)	s/a (%)	補正水 (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)					C×1.25%
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
45	45	54.0	158	351	515	337		

補正水: 骨材の30分吸水量
骨材は絶乾重量を示す

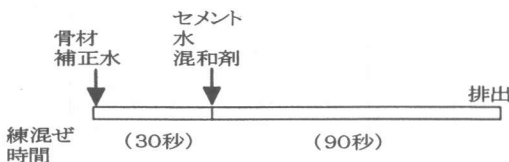


図-1 練混ぜ方法 (絶乾骨材使用)

3. 実験結果と考察

3.1 軽量骨材の吸水特性 (実験1)

(1) 骨材の水中における吸水特性

絶乾状態の超軽量粗骨材と軽量細骨材を水中に浸した場合の吸水特性を、図-2に示す。粗骨材では初期の2分間、細骨材では5分間での吸水が大きく、それ以降で吸水量は一定に近づく傾向にある。超軽量粗骨材では、2分経過後 (吸水率3.5%) には60分後の吸水 (5.4%) の約70%が終了していることになり、また軽量細骨材は5分経過後 (5.9%) には60分後の吸水 (6.8%) の約85%の吸水が終了している。

超軽量粗骨材について、吸水速度が2分前後を境に変化する理由を検討するために、絶乾状態の超軽量粗骨材 (平均粒径約10mm) を赤インクに浸し、カットした後で骨材内部の着色の状態を観察した。インクの含浸状況の一例を写真-1, 2に示すが、着色の状態から2~30分の吸水状況は以下のように変化することがわかる。

2分後: 骨材表面層 (骨材焼成過程で生じるガラス質層、厚さ約0.2mm) が部分的に含水している。表面層の薄い部分では骨材内部の含水が一部で見られる。

5分後: 表面層のほぼ全域が含水している。

30分後: 表面層から骨材内部にかけての含水が部分的に進行している。含水層の厚さは平均で約0.5mmである。

表面層の厚さは部分的にバラツキがあり、また個々の骨材の吸水状況には差があると思われる

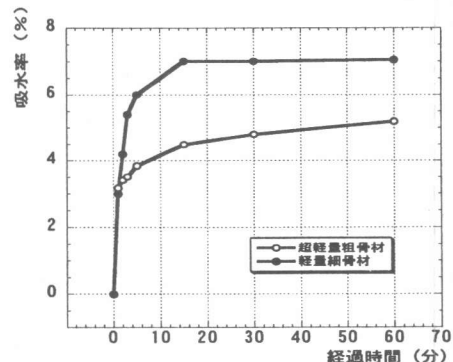


図-2 絶乾骨材の吸水特性 (水中)

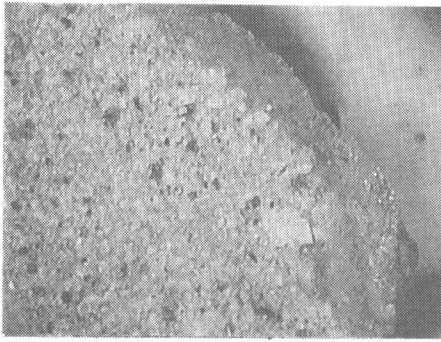


写真-1 超軽量粗骨材表面層での吸水
(5分後)

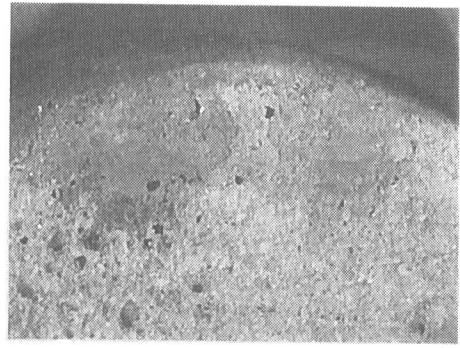


写真-2 超軽量粗骨材内部での吸水
(30分後)

るが、以上の結果から、2分程度までは超軽量粗骨材表面層での吸水が支配的であり、それ以降の吸水は骨材内部への水の浸透により生じていると判断できる。吸水開始から5分で表面層がほぼ含水していると考えて、表面層の空隙率を計算すると約20%となるが、断面の画像観察から気泡の最大径は約20(μm)であることがわかる。また骨材内部の空隙率は約63%であることが報告されているが⁹⁾、気泡の最大径は200(μm)程度である。気泡径分布、ならびに気泡平均径の正確な値は未知であるが、断面の画像から表面層と内部で気泡平均径の値は大きく異なると推察される。ここで骨材中の吸水速度は気泡の毛細管張力(式(1))に支配されると考えられるが、式(1)中のメニスカスの曲率半径は気泡径に比例すると考えれば、表層部と骨材内部の吸水速度の比は気泡平均径の比の逆数と等価となる。その結果、骨材内部での吸水速度は表層部よりも小さくなるのが定性的に理解できる。

$$\Delta p = 2\gamma / r_s \quad (1)$$

ここに、 γ : 表面張力、 r_s : メニスカス曲率半径

また内部の気泡への水の浸透は、空気の抜け出しがなければ毛細管張力と気泡内部の空気圧がバランスする時点で終了するので、吸水速度は更に小さくなると考えられる。骨材内部へ水が浸透し始める2分前後で吸水速度が低下するのはこのような理由からである。以上の傾向は細骨材についても同様と考えられる。

(2) 補正水を添加した骨材の吸水特性

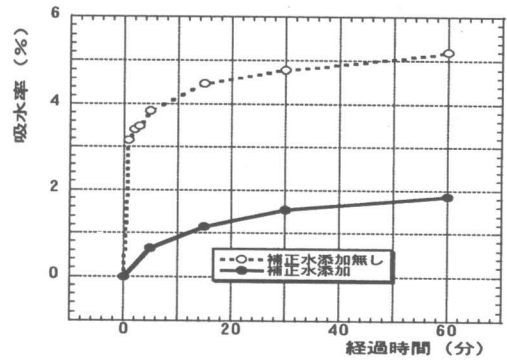


図-3 補正水を添加した骨材の吸水特性(水中)

補正水(30分吸水量)を添加して2分間空練りした超軽量粗骨材を水中に浸したときの吸水率の変化を図-3に示す。この図から補正水を添加した骨材では、水に浸した後の吸水率の変化は絶乾骨材を2分間水中に浸した後の吸水率変化とほぼ一致していることがわかる。これは補正水の添加により初期(0~2分)の急激な吸水がほぼ終了しているためであり、水に浸した後は吸水速度の小さい骨材内部での吸水が生じていると推測できる。従って、補正水を骨材に添加することで、その後の加水に対しては吸水を抑えることが可能であり、コンクリートに練混ぜた場合は吸水によって生じるフレッシュコンクリートの性状の変化を小さくできると考えられる。

3.2 フレッシュコンクリートの特性(実験2)

絶乾状態の軽量骨材を用いる場合、調合通りのコンクリートの材料特性を得るためには、単位水量を変化させないことが重要である。その

ためにはコンクリート中での骨材の吸水を低減させることが必要であり、絶乾骨材に補正水を添加することが効果的である。この場合、コンクリートの特性を変化させない適切な補正水の量を設定することが重要となる。補正水量が過剰な場合は、練混ぜ後に骨材に吸水されない補正水は、コンクリートの見かけの単位水量を増加させることになり、その結果、スランプや強度などの材料特性に影響する。逆に補正水量が不足すると、単位水量が骨材に吸水されるので、この場合も調合通りの材料特性が得られないことになる。骨材の吸水特性を考慮すると、吸水率の変化が小さい30分後の吸水量が補正水量として適切と思われるが、補正水量は練上がり後のコンクリートのスランプや単位容積質量の変化と密接な関係がある。

(1) 練上がり後のコンクリートのスランプ変化

絶乾状態の骨材を用いてコンクリートを練混ぜると、図-4に示すように練混ぜ後10分までに急激なスランプ変化を起こす。この実験では絶乾骨材の急激な吸水が初期の10分間に生じているためと思われる。10分以後のスランプ変化は小さく、これらの現象は吸水速度が変化するという絶乾骨材の吸水特性と一致している。

一方、図-4には細骨材、粗骨材の30分吸水量を補正水(合計で54.0kg/m³)として絶乾骨材に添加して練混ぜた超軽量コンクリートのスランプ変化を同様に示す。練混ぜ後5分間でスランプが低下するものの、それ以後の変化は緩やかであり、15分以後では変化の割合はさらに小さくなっていることがわかる。絶乾骨材を使用し

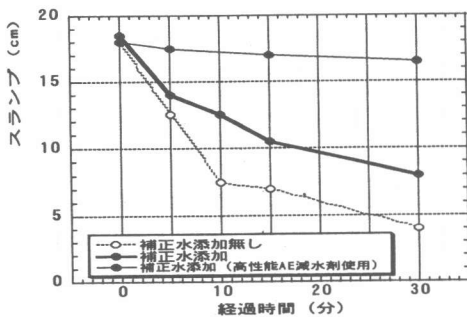


図-4 スランプの経時変化

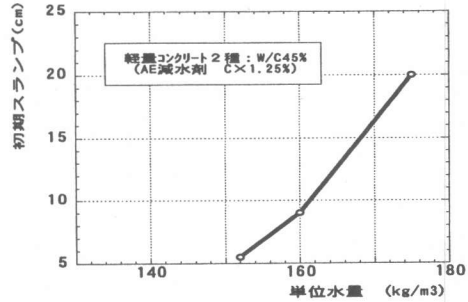


図-5 単位水量とスランプの関係

表-4 余剰水量の変化

練上がり後の時間(分)	骨材の吸水量(kg)	余剰水(kg) : 補正水-骨材の吸水量
0	34.2	19.8
2	43.8	14.0
5	48.3	7.4
10	51.5	4.2
15	53.3	2.4
20	53.6	2.1
30	54.6	0.0

た場合と比べてスランプ変化は小さく、補正水の効果が現れていると解釈できる。なお高性能AE減水剤を使用することでスランプ変化を更に低減することも可能である。

練混ぜ中には骨材は練混ぜ時間(2分)に相当する水量しか吸水しないので、30分吸水量に相当する補正水量のうち2~30分間の吸水量(余剰水)が練混ぜ後にコンクリート中に存在する。スランプ変化はこの余剰水の吸水によって生じていると考えられるが、余剰水をすべて吸水した30分後のスランプは、練混ぜ中に水を吸水しないプレソーキングした軽量骨材を用いたコンクリートのスランプとほぼ一致するはずである。ここで、プレソーキングした軽量骨材を用いた超軽量コンクリート2種の単位水量とスランプの関係を図-5に示すが、単位水量が25(kg/m³)変化するとスランプが15cm変化する関係にある。超軽量コンクリートの余剰水量の経時変化(計算値)は表-4に示すとおりであり、練上がり直後から30分経過するまでに見かけの単位水量は約19.8(kg/m³)変化することがわかる。これに図-5の関係を当てはめてスランプ変化を計算すると、30分間で約11.7cm(15cm/25kg×19.8kg)

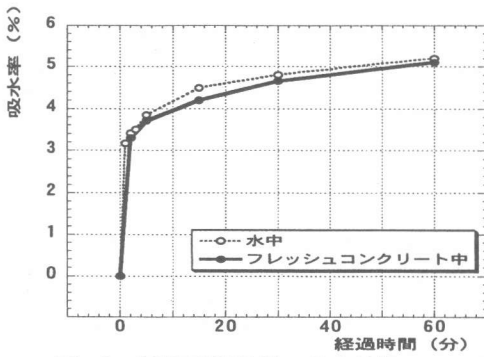


図-6 超軽量粗骨材の吸水特性 (フレッシュコンクリート中)

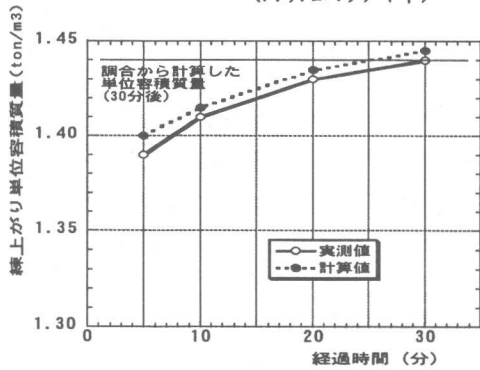


図-7 練上がり単位容積質量の変化

変化することになり、初期スランプが18cmの場合、30分後では約7.0cm (18cm-11.7cm) に低下することになる。今回の実験では、図-4に示すとおり、30分経過後にスランプは18cmから8cmに変化しており、余剰水の吸水による現象がほぼ理解できる。従ってスランプの特性から判断すると、補正水量は30分吸水量で妥当であると考えられる。

(3) 練上がり後のコンクリートの単位容積質量の変化

コンクリート中から超軽量粗骨材を洗い出して吸水率を調べると図-6のようになり、コンクリート中での吸水特性は水中とほぼ同じと判断してよい。この傾向は細骨材でも同じである。³⁾

コンクリート中の余剰水はコンクリート容積を変化させるので、その結果、コンクリートの練上がり比重も変化する。コンクリートの練上がり比重は、所定の空気量が導入されていれば構成材料の質量の総和に等しく、本調査ではその値は1.44 (ton/m³) 程度である。図-7から

明らかのように、練上がり比重は調査から計算される値よりも小さく、練上がり後5分で1.39 (ton/m³) であるが、30分経過すると1.44 (ton/m³) となり、調査から推定される値に近づく傾向にある。また、空気量と余剰水量を考慮してコンクリートの練上がり比重を計算すると、実測値とほぼ一致する。これらの実験結果は、添加した補正水の余剰水分は練上がり後30分程度で骨材中に吸水されることを示している。このことから補正水量として30分吸水量は適切であると判断され、調査上の単位水量は練混ぜ後にも骨材中に吸水されることはなく、コンクリートの材料特性は硬化後もほぼ調査計画通りに確保できると考えられる。

3.3 硬化コンクリートの特性 (実験3)

(1) 気乾単位容積質量

軽量骨材を絶乾状態で用いると、結果的にコンクリート中の初期含水量が少なくなるため、水分量が影響を与える気乾単位容積質量と乾燥収縮を検討した。超軽量コンクリートの圧縮強度 (材齢28日) は33.3 (N/mm²) であり、同じ調査の軽量コンクリート2種 (39.2N/mm²:プレキャスト骨材使用) と比較すると低い。これは超軽量粗骨材の破壊強度が従来の軽量粗骨材よりも低いためである。

硬化した超軽量コンクリートの気乾単位容積質量は図-8に一例を示すように、材齢の経過とともに減少するが、骨材比重のバラツキなどを考慮すると材齢91日では1.36~1.39 (ton/m³) となる。一般に軽量コンクリートの気乾単位容積質量

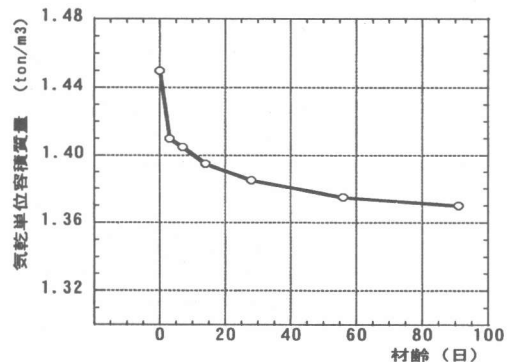


図-8 超軽量コンクリートの気乾単位容積質量の変化

W_0 は JASS5 に定める式(2)によって推定する。

$$W_0 = (G_0 + S_0 + 1.25C_0 + 120) / 1000 \quad (\text{ton/m}^3) \quad (2)$$

ここに、 G_0 、 S_0 ：粗骨材、細骨材の絶乾質量
 C_0 ：セメントの質量

この式の中で超軽量コンクリート特有の性状として再考すべき点は、長期材齢におけるコンクリートの含水量(式(2)では $120 \text{ (kg/m}^3)$)である。超軽量コンクリートの気乾単位容積質量の実測値(1.36～1.39：材齢91日)から含水量を計算すると約 $80 \text{ (kg/m}^3)$ となるが、JASS5 に示される含水量との差 $40 \text{ kg (} 120 \text{ kg} - 80 \text{ kg)}$ は絶乾骨材の初期吸水量の影響で生じているものと思われる。本実験の範囲では、超軽量コンクリートの気乾単位容積質量の推定式は以下のように示される。

$$W_0 = (G_0 + S_0 + 1.25C_0 + 80) / 1000 \quad (\text{ton/m}^3) \quad (3)$$

W/C が異なる調合(単位水量一定)においても、W/C40%で推定値1.424(実測値1.411)、W/C50%で1.357(1.372)となり、推定値と実測値がよく一致していることから、超軽量コンクリートの気乾単位容積質量はこの式により適切に推定可能であると思われる。

(2) 乾燥収縮

図-9に示すように、軽量コンクリート1種(W/C45%、s/a45%)と比較すると、絶乾軽量骨材を用いた超軽量コンクリートは初期材齢でやや乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向にあるものの、約1年の長期材齢ではほぼ同じ値(600μ)に収束することがわかる。補正水の添加で

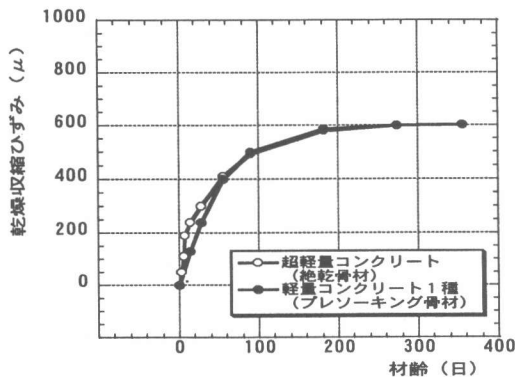


図-9 乾燥収縮ひずみ

は軽量骨材中の含水量は5～7%であるので、硬化後にコンクリート中の自由水が骨材に吸水され、これが初期の乾燥収縮を促進していると考えられる。

4. 結論

軽量骨材中の初期含水量が超軽量コンクリートのフレッシュ性状と硬化特性に及ぼす影響を検討した結果、本実験の範囲内と言えることは以下のようにまとめられる。

(1) 絶乾状態の軽量骨材は骨材表面層において初期(2～5分)に急激な吸水を起こし、それ以降の吸水は骨材内部で生じている。骨材表面層と内部では吸水速度が異なる。

(2) 骨材の吸水量がほぼ一定になるまでの水量を補正水として練混ぜ前に骨材に添加することにより、練上がり後のコンクリートのスランプ変化を抑えることが可能である。

(3) 補正水中の余剰水は骨材中にほぼ吸水されるので、調合通りの材料特性が確保できる。

(4) 超軽量コンクリートの長期の乾燥収縮量は、プレソークした軽量骨材を用いた軽量コンクリート1種とほぼ同程度である。

(5) 超軽量コンクリートの気乾単位容積質量は提案式により適切に評価できる。

参考文献

- 1) 大野定俊ら：短繊維補強軽量コンクリートを用いたRC部材の曲げ特性、コンクリート工学年次論文報告集、第19巻、第2号、pp.1527-1532、1997
- 2) 塩田ら：絶乾状態の人工軽量骨材を用いた高強度軽量コンクリートの特性およびPCa部材への適用について、日本建築学会技術報告集、No.4、pp.8-13、1997
- 3) 藤木英一、梶原啓一ら：超軽量人工骨材とその性能、セメント・コンクリート、No.596、pp.17-22、1996.10