

再生骨材の迅速吸水率試験と実機プラントにおける品質管理

今本 啓一*

要旨： 再生粗骨材の吸水率を JIS に示される自然吸水によって正確に求めようとする場合、約 7 日間を要する。一方、実際に再生骨材を製造するプラントでは、原料となる解体がらは、複数の現場から発生するものが混在した状態で搬入される。すなわち、プラントで製造される再生骨材は、複数の品質のものが入り混じった状態となる。本論は、再生粗骨材の吸水率を約 2 時間で求める簡易な方法（迅速吸水率試験）を提案するとともに、品質管理試験における再生粗骨材の合理的なサンプリング回数と管理基準値を、統計理論に基づいて決定する手法を示すものである。

キーワード： 再生粗骨材、吸水率試験、迅速法、統計理論、サンプリング回数、管理基準値

- 目次： 1. はじめに
 2. 再生骨材の吸水性状
 3. 再生骨材迅速吸水率試験方法の開発
 4. 実機プラントにおける品質管理システムへの適用
 5. まとめ

1. はじめに

再生骨材を用いたコンクリート（以下、再生コンクリート）の性能を検証する研究は、大きく 3 つのタイプに分けられる。すなわち、① 1 種に相当する高品質な再生粗骨材（以下、再生骨材）を製造し、それを用いて、構造体にも適用可能な再生コンクリートを製造する研究¹⁾、② 高度処理を行っていない再生骨材を、相応する部位に適用する研究²⁾、③ 低品質な骨材であっても、材料・練り混ぜ方法を工夫して、構造体にも適用可能な再生コンクリートを志向する研究^{3), 4)}である。

上記①～③のいずれの方法をとっても、再生コンクリートの実用化を図るためには、再生骨材の特性を考慮した、適切な品質管理方法を確立することが必要である。

天然骨材の吸水率が一般に 1%前後であり、産地が限定されるのに対し、再生骨材は原骨材表面にモルタルが付着しているため、吸水率が天然骨材よりも大きい傾向にある。また、再生骨材は複数の現場からほぼ同時に発生する解体がらを原料として製造される。

本研究の位置づけを図 1 に示す。本研究は、品質管理項目の中で、特に再生骨材の吸水率試験方法とそのサンプリング方法及び管理基準値について検討を加えるものである。吸水率試験については実験的に検討し、サンプリング方法及び管理基準値については統計的なアプローチを行った。さらに、実機プラントにおいて再生骨材の品質管理試験を行うにあたり、本方法を品質管理システムの一環として適用した結果について述べるものである。

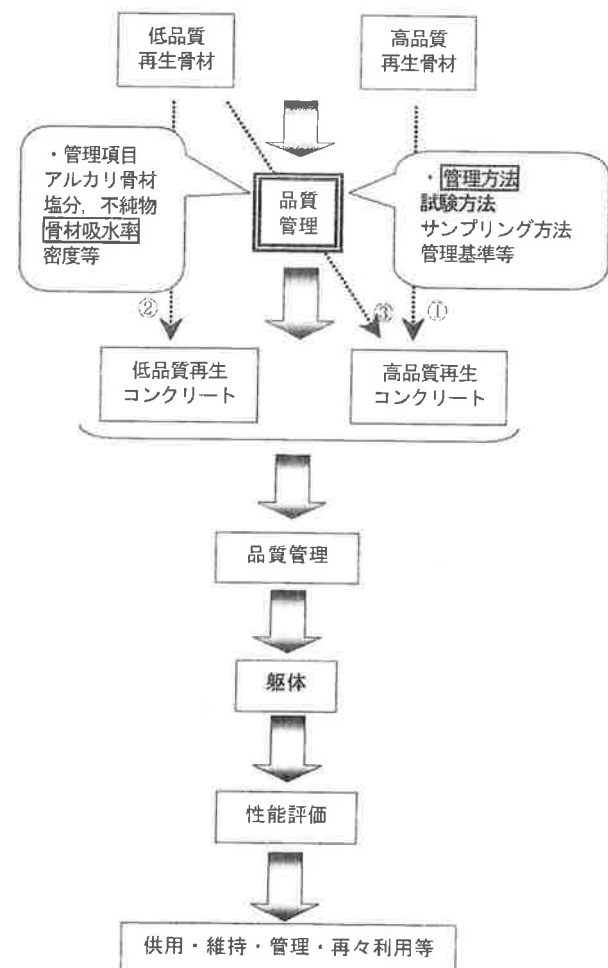


図 1 本研究の位置づけ

2. 再生骨材の吸水性状

2.1 再生骨材の吸水履歴

再生骨材の吸水性状の一例として、2種に相当する再生骨材の吸水率履歴曲線を図2に示す。

図に示すように、骨材の吸水率は時間とともに緩やかに増加する傾向にあり、JIS A 1110(粗骨材の密度及び吸水率試験方法)に示される24時間自然吸水では、十分に吸水しきっていないことが示されている。同図において、再生骨材が十分に吸水したと見なせるのに要する時間は概ね7日程度であることが示されている。

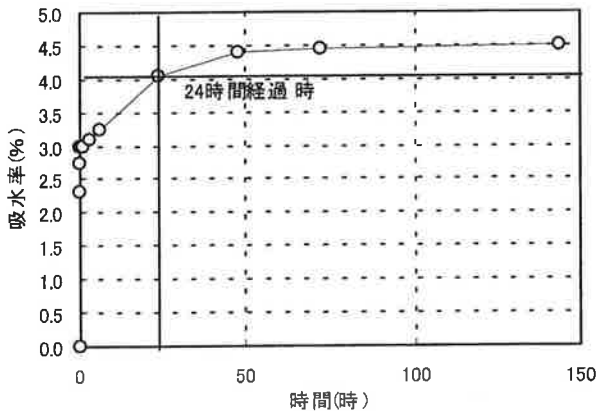


図2 自然吸水による再生骨材(2種)の吸水履歴

2.2 骨材の物性

図2に示される結果を踏まえ、各種再生骨材及び天然骨材の吸水性状を検討した。天然骨材は石英片岩(段戸産碎石)である。再生骨材としては、再生骨材1種及び3種を対象とした。再生骨材1種は、共同著者の所属するプラントにおいて日常的に製造されているものである。再生骨材3種は、表1に示す使用材料及び物性の原コンクリートより製造されたものである。

表1 原コンクリートの使用材料。調合及び物性(3種)

使用セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16(g/cm ³)
使用細骨材	陸砂(密度 2.61 g/cm ³):山砂(密度 2.67 g/cm ³)=5:5(容積比)
使用粗骨材	石灰岩碎石 密度 2.77(g/cm ³) 吸水率 1.04% 実積率 59.5%
調合 W/C(%)	60.0%
調合 s/a(%)	49.0%
調合 W(kg/m ³)	167 kg/m ³
材齢 28 日現場気中養生強度	32.0 N/mm ²

2.3 試験方法

骨材の吸水性状を検討するにあたり、骨材は乾燥炉によって一旦絶乾状態にしたものを、約 20℃まで自然冷却した後水中に浸し、自然吸水させた。骨材試料はそれぞれ約 500g とした。

2.4 試験結果及び検討

約 10 日間の時点の吸水率に対する、各骨材の 24 時間における吸水率を図3に示す。

図に示すように、吸水 24 時間の時点において、再生骨材1種では約 0.4%、再生骨材3種では約 1.0%の差が生じている。再生骨材1種の吸水率の上限は3%であり、2,3種の品質基準は吸水率として2%毎に区分けされていることから、上記の誤差は無視し得ない大きさであると考えられる。一方、再生骨材の正確な吸水率を求めるためには、図2にも示されるものも含め、約7日間要することになり、品質管理においては、より迅速に骨材の吸水率を把握する必要がある。なお、天然粗骨材についても0.16%の差が生じているが、再生骨材と比較してその差は小さく、実用上問題にはならないと考えられる。

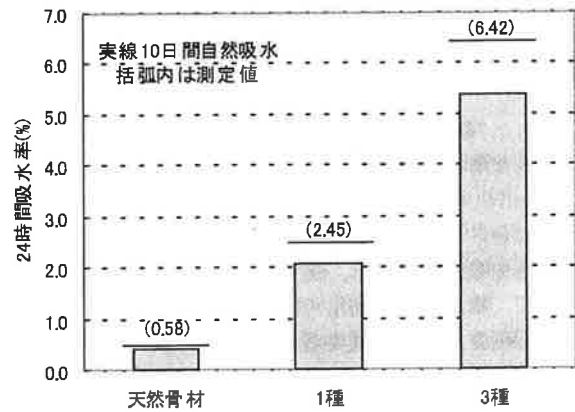


図3 各骨材の24時間における吸水率

3. 再生骨材迅速吸水率試験方法の開発

前述の試験結果を踏まえ、再生骨材の吸水率を迅速に求める方法について検討を行う。本論で検討した手法は、図4に示す3種類(減圧吸水法、オートクレープ処理法及び3MPa加圧吸水法)とした。いずれも、比較的簡易な装置で検討可能なものとした。

図4の加熱乾燥は、時間短縮のため、出力 500W の家庭用電子レンジを用いた。乾燥終了時点で、骨材は約 200~250℃に加熱されており、骨材-ペースト界面のマイクロクラック発生が考えられるが、乾燥炉を用いた図3及び電子レンジを用いた図6(後述)では、同一ロットの試料の吸水率に違いはほとんど認められない。従って、この影響は小さいものとする。

試験にあたっては、同一試料の1種再生骨材約 500g を用いた。上図の各方法による、骨材の含水率の変化を図5に示す。

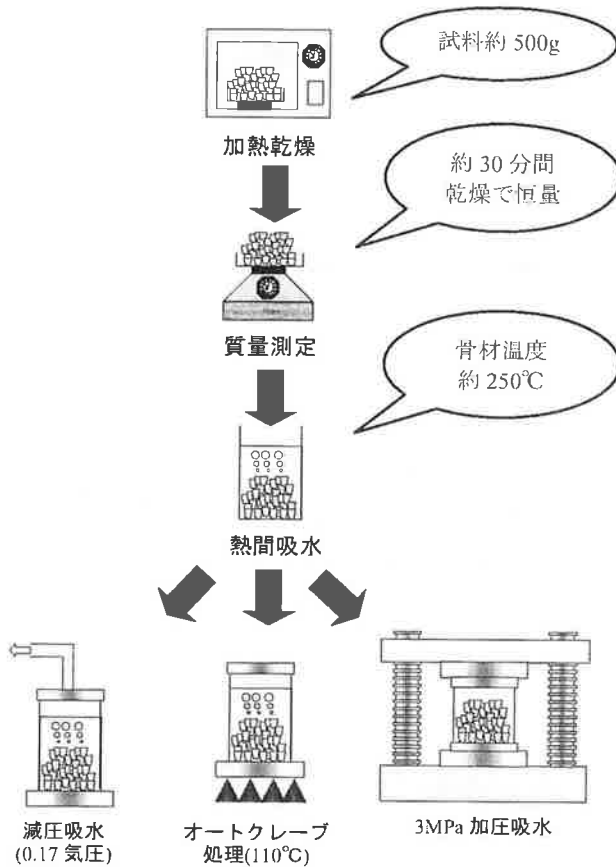


図4 検討方法

図より、減圧処理 (0.17 気圧) 及びオートクレープ処理 (110℃) を行ったものは、1 時間程度では含水率に顕著な変化は認められない。一方、3MPa で加圧したものは、1 時間で 10 日間自然吸水による試験結果に近い値が得られている。これより、本方法において付与圧力を若干大きくすることにより、骨材の正確な吸水率が約 1 時間程度の短時間で求めることが可能になる

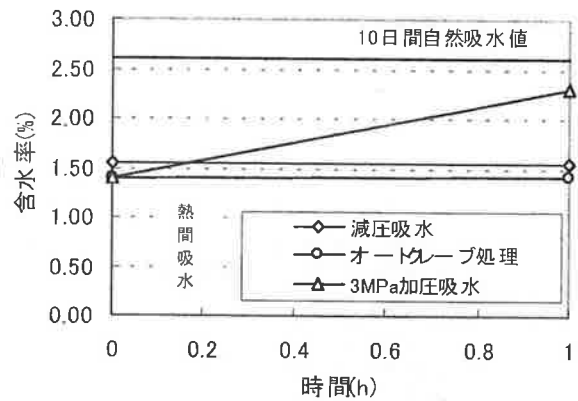


図5 骨材含水率の変化

と考えられる。そこで、圧力を 5MPa とし、試料とする骨材の質量を約 2kg として、図 6 左に示すフローで再度試験を行い、各時点での含水率の変化を測定した。含水率の変化を図 6 右に示す。骨材は約 1 時間程度で絶乾状態となり、水中に浸すことによる熱間吸水によって約 60%瞬間的に吸水する。さらに気密容器を用いて 5MPa の圧力を約 1 時間付与することにより、合計約 2 時間で、約 10 日間自然吸水した場合とほぼ等しい吸水率が求められた。1 種再生骨材を用いた本迅速試験による値は、JIS による試験結果よりも約 20%大きいものとなっており、品質管理上、安全側の管理を短時間で可能としている。本論において、この試験方法を、再生骨材の迅速吸水率試験方法として提案する。

4. 実機プラントにおける品質管理システムへの適用

4.1 サンプリング回数の検討と品質管理基準

一般に天然骨材は、ほぼ 1 ヶ所の埋蔵場所から採取される。このため、骨材の品質管理項目中で、吸水率については 1 ヶ月に 1 回の頻度で試験を行い、その試

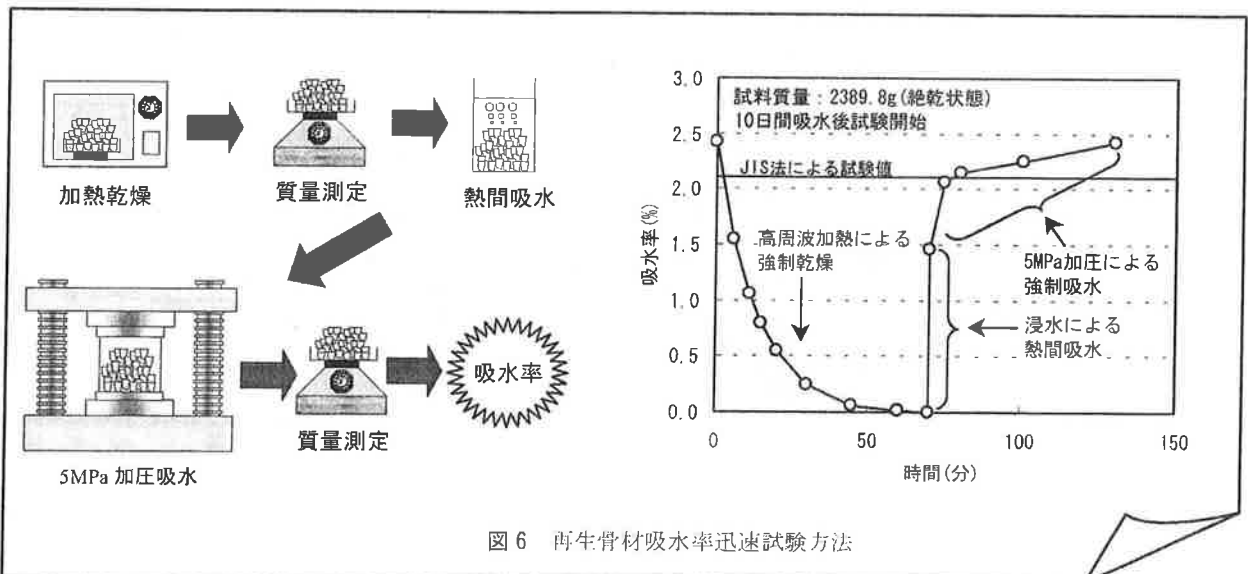


図6 再生骨材吸水率迅速試験方法



図7 処理プラントと解体ガラ発生現場の位置関係

験結果が基準値（例えば碎石の場合3%）を満足すれば合格とされている。しかし再生骨材については状況が若干異なることが考えられる。

例えば図7に示すように、実際の再生骨材製造プラントには、1日平均約30~50ヶ所の現場から発生した解体ガラが搬入され、これらを用いて骨材が製造される。原料となる解体ガラの品質が多様で日々変動する特徴を有する点において、再生骨材の流通経路は、天然骨材のそれとは大きく異なる。従って、再生骨材の品質管理においては、この点を考慮する必要があると考える。

本論において、品質管理試験におけるサンプリング回数を、古典的統計理論⁵⁾に基づき、以下に示す考え方で検討した。

図8左に示すように、ある母集団からサンプルを抽出して試験を行い、仮に、以下に示す平均値と標準偏差が得られたとする。

サンプル群（標本）の平均値： X
 サンプル群（標本）の標準偏差： S

ここで、
 母集団（無限母集団）の平均値： μ
 母集団（無限母集団）の標準偏差： σ
 とする。

・母集団平均値の信頼区間

母集団の分散が正規（ガウス）分布することを仮定すれば、 $(X-\mu)/(S/n^{0.5})$ の確率分布は、自由度 $(n-1)$ のt分布に従う。これより、確率変数 $(X-\mu)/(S/n^{0.5})$ について、式(1)に示すような確率的表現が可能となる。

$$P\left\{-t_{\alpha/2, n-1} < \frac{(X-\mu)}{(S/n^{0.5})} \leq t_{\alpha/2, n-1}\right\} = 1-\alpha \quad \dots(1)$$

ここで、
 $t_{\alpha/2, n-1}$ ：自由度 $(n-1)$ のt分布の確率に対応する値
 α ：有意水準（95%信頼区間を求める場合、 $\alpha=0.05$ となる）

式(1)を整理して、正規無限母集団平均値の信頼区間として、次式(2)を得ることができる。

$$\langle \mu \rangle_{1-\alpha} = \left[X - t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{n^{0.5}} ; X + t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{n^{0.5}} \right] \quad \dots(2)$$

ここで、本検討においては、上側信頼限界が問題となる。 $(1-\alpha)$ 上側信頼限界は式(3)のように示される。

$$(\mu)_{1-\alpha} = X + t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{n^{0.5}} \quad \dots(3)$$

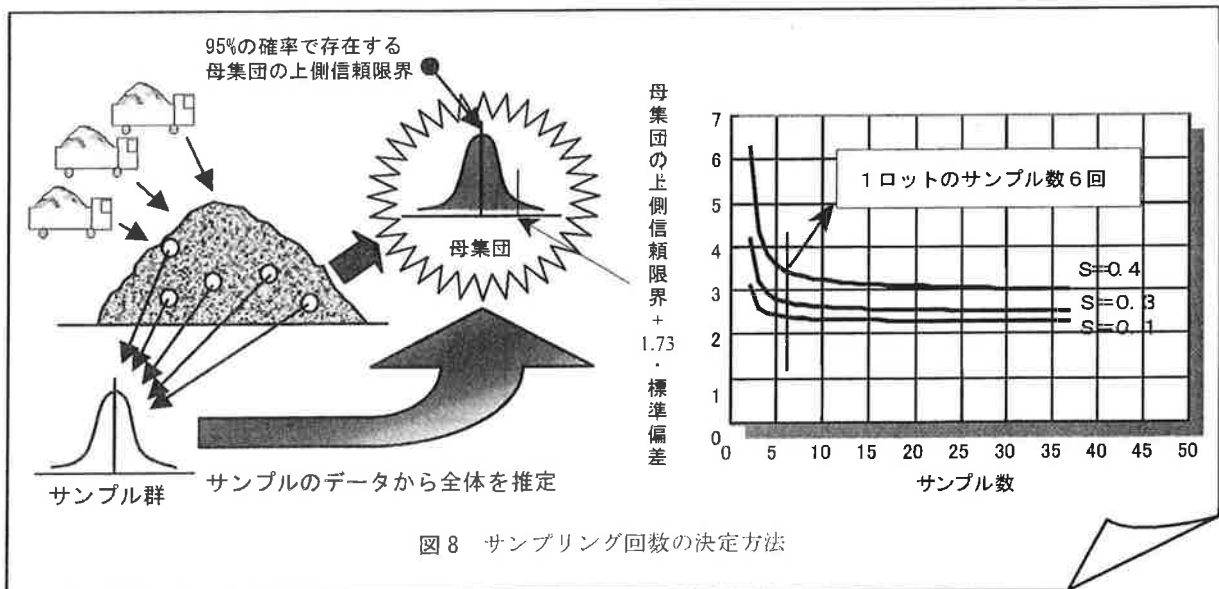


図8 サンプリング回数の決定方法

・母集団標準偏差の不偏推定値

正規分布母集団からの大きさ n の標本分散を S² とすると、n S²/σ² は自由度(n-1)のχ²-分布に従う。さらに、χ²-分布の定理より、n^{0.5}S/σ は自由度(n-1)のχ-分布に従う(式(4))。ここで、自由度 n のカイ分布の密度関数及び平均 c₂(n)は、式(5),(6)のように示される。

$$n^{0.5} \frac{S}{\sigma} = \chi \quad \dots(4)$$

$$f(\chi) = \frac{\chi^{n-1} e^{-\frac{\chi^2}{2}}}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \quad \dots(5)$$

$$c_2(n) = E(\chi) = \int_0^{\infty} \frac{\chi \cdot \chi^{n-1} e^{-\chi^2/2}}{2^{n/2-1} \Gamma(n/2)} d\chi$$

$$= \frac{\sqrt{2} \Gamma((n+1)/2)}{\Gamma(n/2)} \quad \dots(6)$$

但し、Γはガンマ関数で、

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} t^{n-1} e^{-t} dt \quad \text{で定義される。}$$

ここで、母集団標準偏差の推定をσ'とすると、σ'は下式(7)で示される。

$$\sigma' = n^{0.5} \frac{S}{(n-1)^{0.5}} \quad \dots(7)$$

式(4)より、

$$(n-1)^{0.5} \frac{\sigma'}{\sigma} = \chi \quad \dots(8)$$

となり、自由度(n-1)のカイ分布に従うことになる。ここで、σ ≠ σ'であることに注意が必要である。σ'の平均 E(σ')は、式(6)及び(8)より、下式(9)となる。

$$E(\sigma') = \frac{c_2(n-1)}{\sqrt{(n-1)}} \sigma \quad \dots(9)$$

この右辺σの係数は、一般に c₂* (n)と記述され、1/c₂* (n)・(n/(n-1))^{0.5}が、サンプル群の標準偏差 S から母集団の標準偏差σを推定するための補正係数となる。サンプル数 n と補正係数の関係を表2に示す。

これより、サンプル数とサンプルの平均値、標準偏

差より、母集団の分布がある信頼区間をもって求められる。母集団の上側信頼限界(式(3))において、例えば吸水率の品質基準 3%を超える確率が 4%以下となるためには、下式(10)を満足する必要がある。すなわち、

$$(\mu >_{1-\alpha} + 1.73\sigma \leq 3$$

$$\Leftrightarrow X \leq 3 - t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{(n-1)^{0.5}} - \frac{1.73 \cdot n^{0.5}}{c_2^*(n) \cdot (n-1)^{0.5}} \cdot S \quad \dots(10)$$

ここで、仮にサンプル群の平均値を 2.26 (プラントにおける、H.11.1~11.6 までの JIS による吸水率試験結果の平均値)とし、サンプル群の標準偏差を 0.1~0.4 に変化させた場合の、サンプル数 n と <μ>_{1-α} の関係は図8右に示すものとなる。

同図より、再生骨材の品質管理試験において、一日6回が母集団を推定するための十分なサンプル数であると判断し(1/c₂* (n)・(n/(n-1))^{0.5}=1.15)、95%の確率で存在する母集団平均値 (t_{α/2, n-1}=2.57) より、管理基準値を設定した(式(10)の X)。

表2 n と 1/c₂* (n)・(n/(n-1))^{0.5} の関係 (サンプル数 n に応じた、σ推定のための補正係数)

サンプル数 n	補正係数 1/c ₂ * (n)
2	1.77
3	1.38
4	1.25
5	1.19
6	1.15
7	1.13
8	1.11
9	1.10
10	1.08
20	1.04
30	1.03
50	1.01

4.2 品質管理システムへの適用

再生骨材1種コンクリートによる現場造成杭(38本)施工の品質管理にあたり⁶⁾、迅速吸水率試験及び4.1で示した考え方を適用した。

試験結果を図9に示す。杭と再生骨材の製造ロットが概ね対応しているため、杭番号毎に吸水率測定結果を示している。図に示すように、サンプルデータのばらつきにより管理基準値(式(10))も変動し、この変動はサンプルデータのばらつきとともに大きくなる。当然のことながら、管理基準値は再生骨材1種の品質基準値である3%を下回るものとなっている。

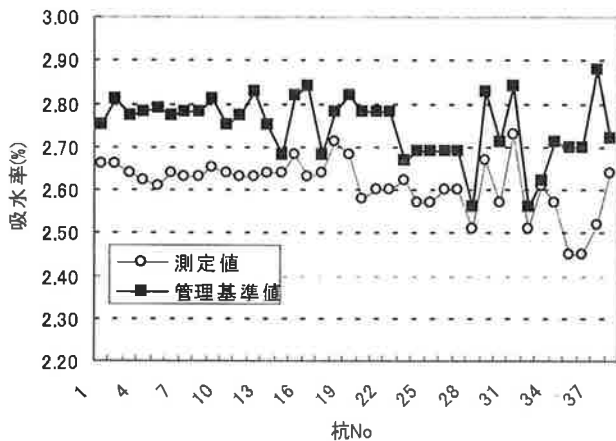


図9 吸水率の変動

5. まとめ

本論は以下にまとめられる。

- 1) 再生骨材の吸水率は、JISによる24時間自然吸水では、正確に求められない可能性のあることを示した。
- 2) 再生骨材の迅速吸水率試験を提案した。本試験方法は、加圧を付与することに特徴を有しており、約2時間で再生骨材の正確な吸水率を求めることが可能である。
- 3) 再生骨材は、複数の現場から発生する多様な種類の解体ガラから製造される。この点を踏まえ、古典的統計理論に基づくサンプリング回数と品質管理基準値を提案した。
- 4) 迅速吸水率試験と統計理論に基づく品質管理方法を実機プラントに適用した。

参考文献

- 1) 例えば、石倉 武他 6名, 高品質再生骨材製造技術に関する開発 [II] (その1~5), 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.697~706, 1998.
- 2) 例えば、山路 徹他 2名, コンクリート塊を用いた再生コンクリートの施工実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, 1999.
- 3) 南波 篤志他 2名, 再生コンクリートの品質改善に関する研究 コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.65-70, 1995.
- 4) 今本 啓一他 3名, 減圧工法による再生骨材コンクリートの品質向上, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.175-180, 1999.
- 5) 高橋 磐郎他 2名, 統計解析, 培風館.
- 6) 森 富雄他 3名, 再生粗骨材コンクリートの実躯体への適用, GBRC, Vol.25, No.1, pp.27-33, 2000.

A Rapid Test Method for Water Absorption Ratio of Recycled Aggregate and Its Application to An Reprocessing Plant of Concrete Rubble

Keiichi IMAMOTO

In general, over 7 days are needed in order to measure a water absorption ratio of recycled aggregate, and the recycled aggregate is manufactured from various kinds of concrete rubbles. In this paper, a rapid test method for the water absorption ratio of recycled aggregate was developed and applied to an actual reprocessing plant of concrete rubble. The water absorption ratio of recycled aggregate was measured within 2 hours by this method and the sampling times and the upper limitation value of the water absorption ratio was determined based on a statistical theory. The rapid test method and statistical approach presented in this study was found to be useful in controlling the quality of recycled aggregate at the actual reprocessing plant of concrete rubble.