

論文 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^{*1}・伊藤 信孝^{*2}・西尾 篤志^{*3}・田村 博^{*4}

要旨: 再生粗骨材は、天然骨材と比較して吸水率が大きいため、吸水率を自然吸水によって正確に求める場合、約7日間を要する。また、天然骨材がほぼ1ヶ所の埋蔵場所から産出されるのに対し、再生粗骨材は、複数の現場から発生する解体ガラが混在した状態で製造される。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サンプリング回数と管理基準値を、統計理論に基づいて合理的に決定する手法を示した。さらに、提案する試験及び管理方法を、実機プラントにおける品質管理に適用した結果について述べる。

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

1. はじめに

解体ガラの有効利用を図ることを目的とし、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が数多く行われている。これらの研究は、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・練り混ぜ方法等を工夫して、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のいずれを経由しても、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。

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について検討を加えるものである。また、実機において再生骨材の品質管理試験を行うにあたり、サンプリング回数について、統計理論に基づく裏付けを与えるとともに、管理基準についての提案

を行う。さらに、提案する試験及び管理方法を、実機プラントにおける品質管理に適用した結果について述べる。

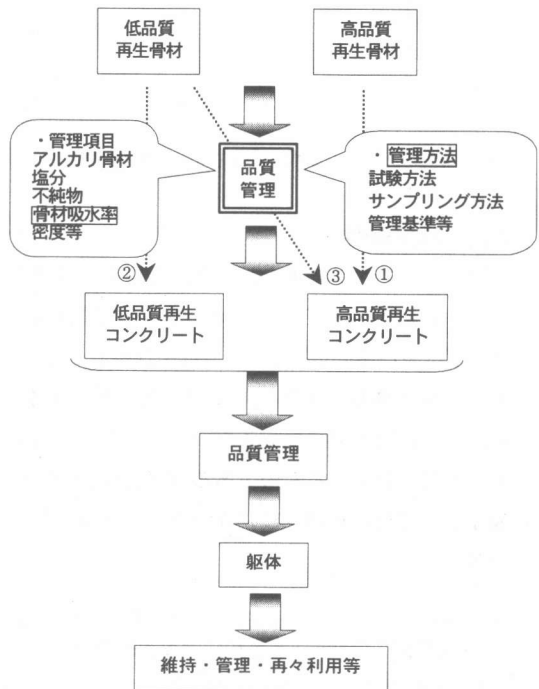


図1 本研究の位置づけ

*1 東急建設（株）技術研究所 建築研究室 工修 （正会員）
 *2 （株）京星 エコ生コン部 課長
 *3 （財）日本建築総合試験所 材料試験室 室員
 *4 同上 室長 工博 （正会員）

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、再生骨材が充分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。

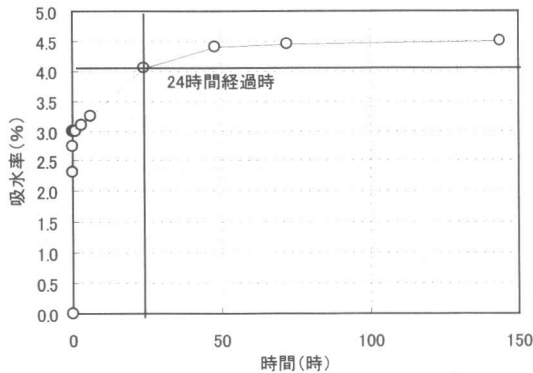


図2 自然吸水による再生骨材(2種)の吸水履歴

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。調査及び物性(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%
調査 W/C(%)	60.0%
調査 s/a(%)	49.0%
調査 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に水中に浸し、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。

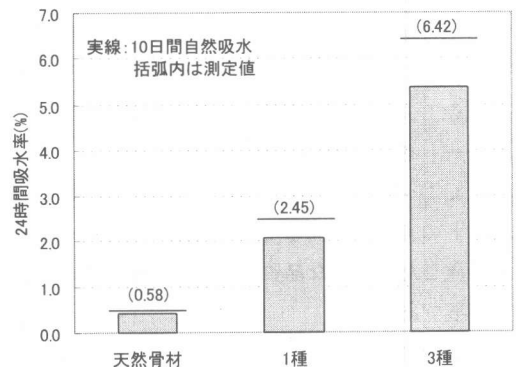


図3 各骨材の24時間における吸水率

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種類とし、比較的簡易な装置で検討可能なものとした。

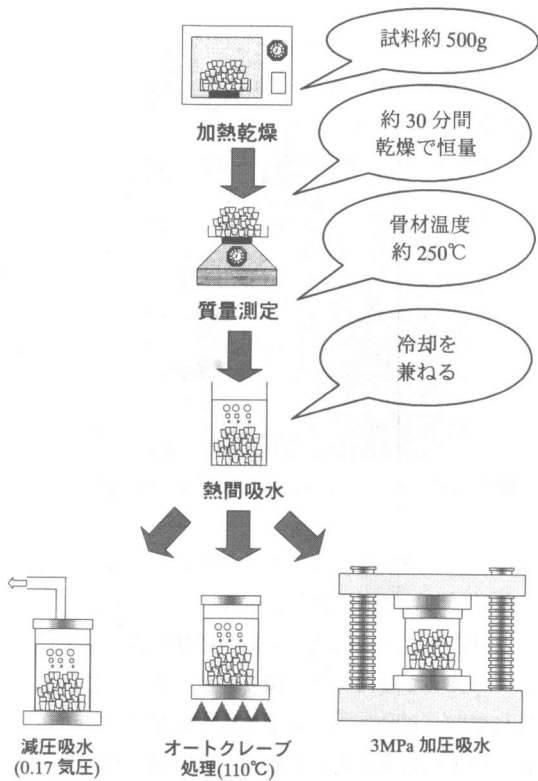


図4 検討方法

図4の加熱乾燥は、時間短縮のため、出力500Wの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。

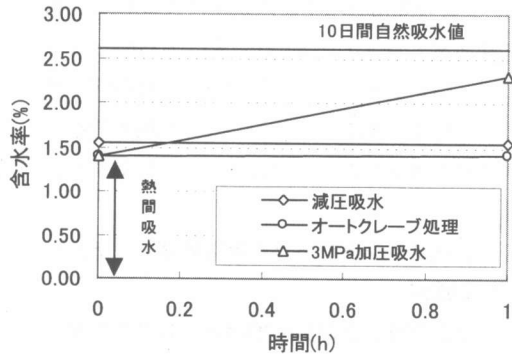


図5 骨材含水率の変化

図より、減圧処理(0.17気圧)及びオートクレーブ処理(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

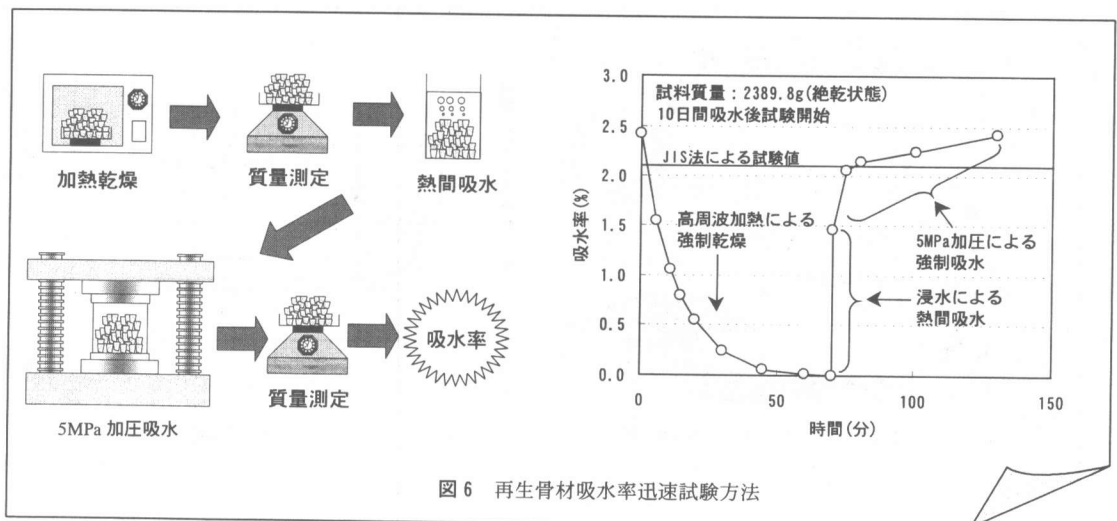


図6 再生骨材吸水率迅速試験方法

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 サンプル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、



図 7 処理プラントと解体ガラ発生現場の位置関係(例)

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ルング回数を、古典的統計理論⁹⁾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

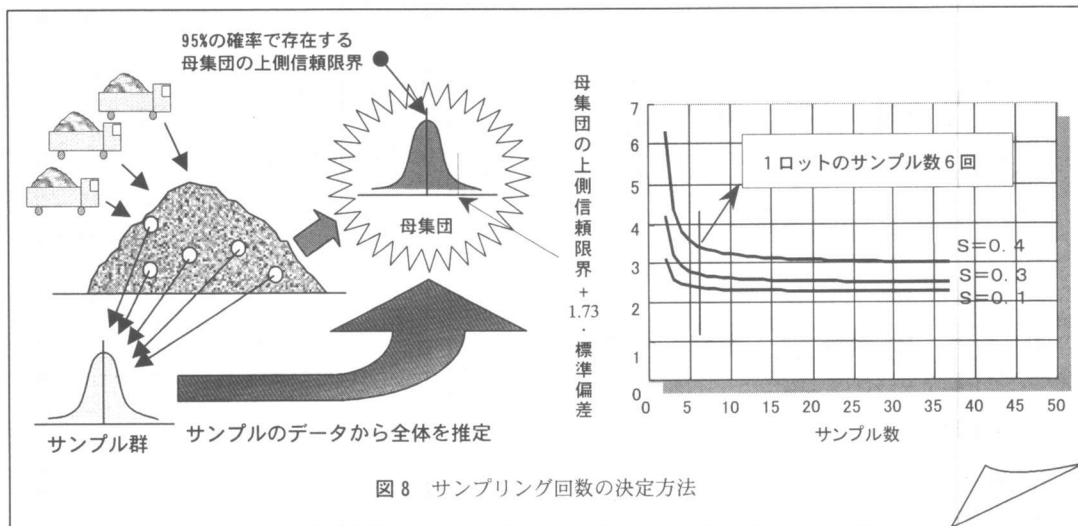


図 8 サンプルング回数の決定方法

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。

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

・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 S^2 とすると、 $n S^2 / \sigma^2$ は自由度 $(n-1)$ の χ^2 -分布に従う。さらに、 χ^2 -分布の定理より、 $n^{0.5} S / \sigma$ 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 $c_2(n)$ は、式(5),(6)のように示される。

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

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

$$c_2(n) = E(\chi) = \int_0^{\infty} \frac{\chi \cdot \chi^{n-1} e^{-\chi^2/2}}{2^{n/2-1} \Gamma(n/2)} d\chi = \frac{\sqrt{2} \Gamma((n+1)/2)}{\Gamma(n/2)} \quad \dots(6)$$

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、 $\sigma \neq \sigma'$ であることに注意が必要である。 σ' の平均 $E(\sigma')$ 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 $c_2^*(n)$ と記述され、 $1 / c_2^*(n)$ が³⁾、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、

$$\begin{aligned} &(\mu >_{1-\alpha} + 1.73\sigma \leq 3 \\ \Leftrightarrow &X \leq 3 - t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{(n-1)^{0.5}} - 1.73 \cdot \frac{1}{c_2^*(n)} S \end{aligned} \quad \dots(10)$$

ここで、仮にサンプル群の平均値を 2.26 (共同著者の所属するプラントにおける, 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 $\mu >_{1-\alpha}$ 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 ($1/c_2^*(n)=1.15$), 95% の確率で存在する母集団平均値 ($t_{\alpha/2, n-1}=2.57$) より, 管理基準値を設定した (式(10)の X)。

表 2 n と $1/c_2^*(n)$ 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 種コンクリートを用いて現場造成杭 (38 本) を施工するにあたり⁹⁾, 迅速吸水率試験及び 4.1 で検討した管理方法を, 再生骨材の品質管理の一貫として実施した。吸水率試験結果を図 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。プラントと解体ガラの発生現場との位置関係の一例は, 図 7 に示す通りである。

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。なお, 工事期間中に製造された再生骨材の吸水率は, 式(10)の管理基準値を満足するものであった。

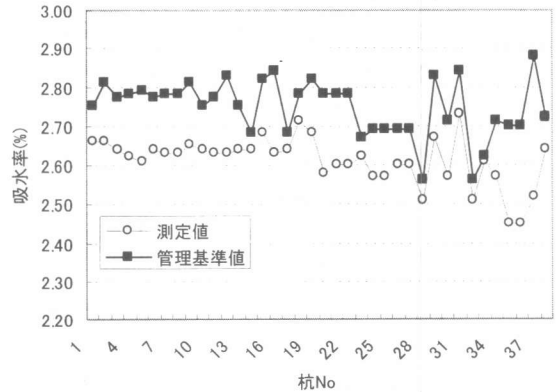


図 9 吸水率の変動

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 馨郎他 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.