

論文 減圧吸水法による細骨材の密度測定に及ぼす微粒分の影響

黒井登起雄^{*1}・松村仁夫^{*2}・宮澤伸吾^{*1}・鄭 仁沢^{*3}

要旨： 近年、コンクリート用細骨材は、川砂の枯渇に伴い、山砂、海砂、砕砂の使用増加、さらに高炉スラグ、フェロニッケルスラグ、銅スラグなど産業副産物の使用などにより、多様化の傾向が顕著である。本研究は、栃木県産の40種類の各種細骨材を対象にして、密度および吸水率測定に、減圧吸水法によって表乾状態に相当する骨材表面の見掛けの絶対容積を求め算出する方法と、JIS A 1109による方法を適用し、それらの比較検証を行うとともに、減圧吸水法による密度測定に及ぼす微粒分（ダスト）の影響を実験によって検討した。減圧吸水法による細骨材の密度および吸水率は、0.15mm未満の微粒分量の影響をかなり受けることが明らかとなった。

キーワード： 細骨材、密度、吸水率、減圧吸水法、微粒分

1. まえがき

近年、コンクリート用細骨材は、川砂の枯渇に伴い、山砂、海砂、砕砂の使用増加、さらに高炉スラグ、フェロニッケルスラグ、銅スラグなど産業副産物の使用などにより、多様化の傾向が顕著である。このように多様化した細骨材の表面乾燥飽水状態（表乾状態）の判定および密度、吸水率の測定は、一般に JIS A 1109（細骨材の密度及び吸水率試験方法）に従って行われる。この方法による密度、吸水率の測定値は、0.15mm 未満の微粒分の多い砂、粒度に片寄りのある砂、丸い粒形の砂などの場合、疑問視する向きが多い。著者らは、JIS 法による測定値の不正確さの原因が試験時の表乾状態の再現による誤差と考え、絶対乾燥状態を基準にし、データの処理によって表乾状態の判定および密度、吸水率を測定する方法に着目した^{1), 2)}。本研究では、栃木県産の各種細骨材の密度および吸水率測定に、『減圧処理時間と見掛けの絶対容積との関係』から表乾状態に相当する骨材表面の見掛けの絶対容積を求め算出する方法²⁾と、JIS

A 1109 による方法を適用し、それらの比較検証を行うとともに、減圧吸水法による密度測定に及ぼす微粒分（ダスト）の影響を基礎的な実験によって検討した。

2. 実験概要

2.1 試料

研究に使用した細骨材試料は、栃木県内の各地域に産出する川砂、陸（山）砂、砕砂で、40種類を対象とした。

2.2 実験方法

(1) 細骨材の密度および吸水率試験

細骨材の密度および吸水率は、JIS A 1109 に従う試験と減圧吸水による試験の両方法で測定した。1回の試料個数は、両試験方法ともそれぞれ3個とした。減圧吸水による方法²⁾は、①絶対乾燥状態にした減圧吸水実験からの「減圧処理時間と見掛けの絶対容積との関係」の作成、②「減圧処理に伴う見掛けの絶対容積の変化」からの表乾状態に相当する骨材表面（表乾相当状態と称する）の見掛けの絶対容積の決定、③

*1 足利工業大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 足利工業大学教務職員 工学部土木工学科（正会員）

*3 足利工業大学研究生 工学部土木工学科

細骨材の密度および減圧吸水率の計算、の手順で行った。②の表乾相当状態における骨材表面の見掛けの絶対容積の決定、すなわち、表乾相当状態の判定は、絶対容積の減少速度が急激に小さくなり、0.1ml/min.以下になる時間を目安に行った。細骨材の表乾密度 d_s (g/cm³)、絶乾密度 d_d (g/cm³)、見掛けの真密度 d_r (g/cm³) および減圧吸水率 Q (%) は、式 [1] ～式 [4] によって計算した。

$$d_s = (W_d + q) / V_s \quad \cdots \cdots [1]$$

$$d_d = W_d / V_s \quad \cdots \cdots [2]$$

$$d_r = W_d / V_{24} \quad \cdots \cdots [3]$$

$$Q = (q / W_d) \times 100$$

$$= \{ (V_s - V_{24}) / W_d \} \times 100 \cdots [4]$$

ここで、 W_d は絶乾状態の試料の質量 (g)、 q は吸水量 (g)、 V_s は減圧により巻き込み気泡を取除いたときの絶対容積である (表乾状態の絶対容積に相当)。 V_{24} は減圧吸水 24 時間後の絶対容積である。

なお、減圧処理は、真空定温恒温器 (株式会社製作所製 SVK-12PS) を用いて行い、絶対容積の測定時間は、10、20、30、45、60、75、90、120、150、180 分および 24 時間とした。減圧吸水時の圧力は、試験開始後 90 分までを、-90.7kPa、90～180 分までを、-101.3 kPa とした^{1), 2)}。なお、180 分からは、長時間減圧による温度上昇を抑制するため、大気圧中に放置した。

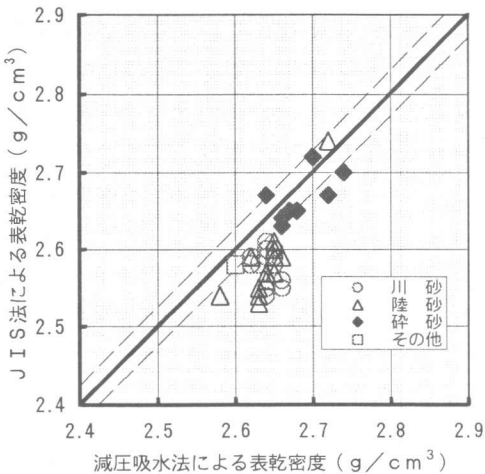


図-1 JIS法と減圧吸水法との表乾密度の相関

(2) 粒度試験

細骨材の粒度試験は、JIS A 1102 に従って行った。なお、この試験は、細骨材中の 0.15mm (150μm) 未満の微粒分量を把握するために行ったものである。

(3) 粒子の形状および表面特性の観察

細骨材粒子の形状および表面特性の観察は、実体顕微鏡によって視覚的に行った (定性的観察)。

3. JIS法と減圧吸水法との測定値の比較

産地および分類の異なる 40 種類の細骨材について JIS 法および減圧吸水法によって密度および吸水率 (減圧吸水率) 試験を行ない比較検証した。

3.1 表乾密度および絶乾密度

図-1 は、40 種類の細骨材の表乾密度を JIS 法と減圧吸水法によって求めたときの相関を示す。図-1 より、JIS 法と減圧吸水法により求めた細骨材の表乾密度は、砕砂の場合、おおそ一致し、±2% の変動の範囲である。その値は、2.64～2.74 g/cm³ である。しかし、川砂、陸 (山) 砂などの場合、減圧吸水法による表乾密度は、JIS 法による値より大きく、2% 以上大きくなるものも多数認められる。川砂の表乾密度は、減圧吸水法による場合、2.62～2.65 g/

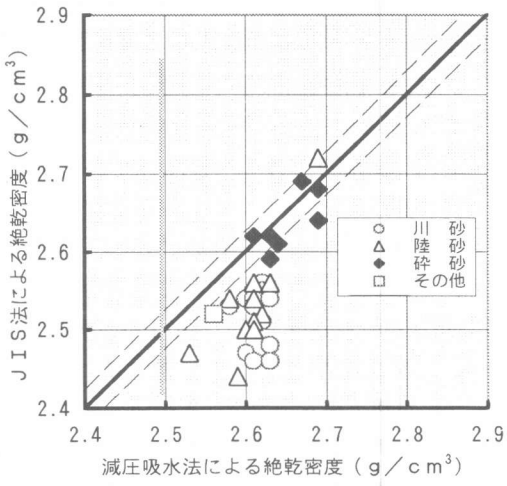


図-2 JIS法と減圧吸水法との絶乾密度の相関

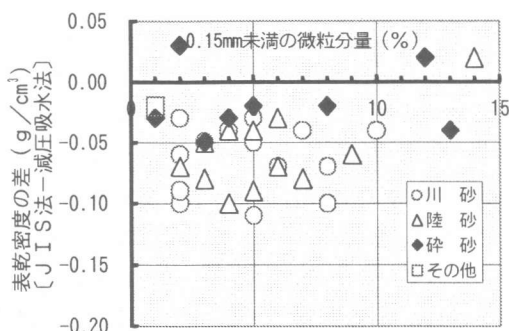


図-3 微粒分量と表乾密度との関係

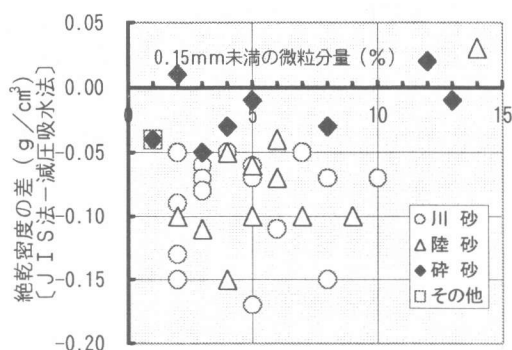


図-4 微粒分量と絶乾密度との関係

cm^3 であるのに対して、JIS 法による場合、 $2.54 \sim 2.60 \text{ g/cm}^3$ である。また、図-2は、細骨材の絶乾密度をJIS法と減圧吸水法によってそれぞれ求めたときの絶乾密度の相関を示す。図-2より、細骨材の絶乾密度も、表乾密度と同様の傾向が認められる。しかし、川砂、陸(山)砂の場合のJIS法による値は、減圧吸水法による値よりかなり小さくなり、JIS A 5308およびコンクリート標準示方書《施工編》(土木学会)に規定する品質基準 2.50 g/cm^3 (絶乾密度)を下回る値も見受けられる。これらの結果から、JIS法による密度が減圧吸水法による値とほぼ同じだったり、また、それより小さくなるのは、細骨材の表乾状態の判定あるいは表乾相当状態の絶対容積の決定が2つの試験方法で異なるためと考えられる。すなわち、JIS法の表乾状態の判定は、コーン状に成形した細骨材が水の表面張力により崩れなくなる性質を利用したもので、表面水(液体橋)による粒子間付着力がな

くなり、「細骨材が最初に崩れるとき」としている³⁾。これに対し、減圧吸水法の表乾相当状態の判定(表乾相当状態の絶対容積の測定)は、絶乾状態の細骨材を用い、巻き込み気泡を取り除いたとき(細骨材の表面水がない状態に相当)としているためと考えられる。図-3および図-4は、JIS法と減圧吸水法との密度(表乾密度および絶乾密度)差と0.15mm未満の微粒分量との関係を示す。図-3(表乾密度)および図-4(絶乾密度)より、JIS法によって求めた密度は、川砂、陸(山)砂などの粒形が丸みをもっている場合、減圧吸水法の値よりも $0.03 \sim 0.11 \text{ g/cm}^3$ および $0.05 \sim 0.11 \text{ g/cm}^3$ 小さくなり、微粒分量7~8%以下において値の変動が大きくなる傾向にある。とくに、絶乾密度の差の変動は、JIS法において表乾密度に吸水率を補正して計算するため、更に大きくなっている。なお、砕砂の場合、表乾密度および絶乾密度ともに、密度差が $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ であり、微粒分量の影響(2~13%)がほとんど表れていないようである。

3.2 吸水率

図-5は、JIS法および減圧吸水法によって求めた吸水率の相関を示す。図-5より、砕砂の場合、両方法による吸水率は、 $0.77 \sim 1.72\%$ で、ほぼ一致し、 $\pm 20\%$ 程度の変動の範囲である。しかし、川砂、陸(山)砂などの場合、JIS法による吸水率は、減圧吸水法の値の1.2~2.6倍で、著しく大きくなるものが多数認められる。これは、密度の場合のJIS法における表乾判定の個人差の影響と同様であるが、吸水率の場合、その影響が値の計算において直接的となるためと考えられる(式〔4〕参照)。図-6は、JIS法と減圧吸水法との吸水率の差と0.15mm未満の微粒分量との関係を示す。図-6より、JIS法による吸水率は、川砂、陸(山)砂などの場合、減圧吸水法の値よりも絶対値で $0.4 \sim 2.3\%$ 大きくなり、微粒分量が10%以下において差の変動も大きくなっている。吸水率は、微粒分量に無関係に広く分布している。また、砕砂の場合、

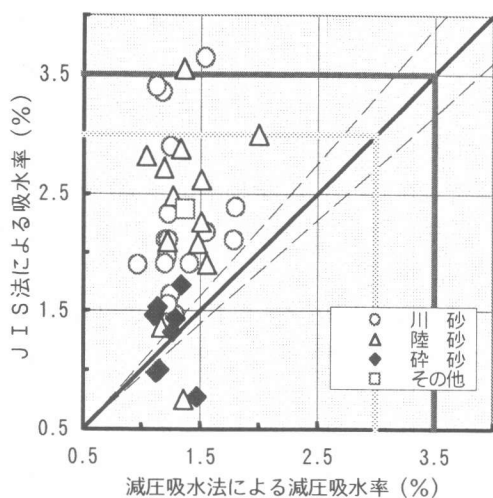


図-5 JIS法と減圧吸水法による吸水率の相関

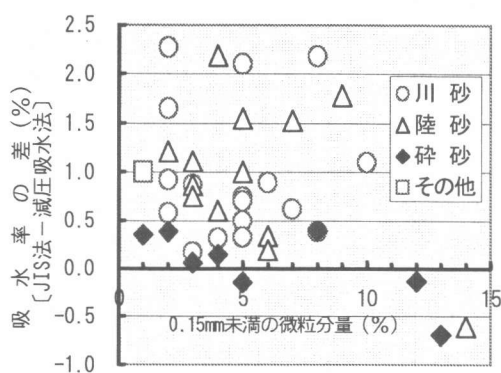


図-6 微粒分量と吸水率の差との関係

吸水率の差は、 $\pm 0.5\%$ であり、微粒分量の影響がほとんど表れていないようである。

3.3 細骨材の真密度

減圧吸水法は、同一の試料による測定結果(絶対容積の経時曲線)から表乾密度、絶乾密度、真密度および吸水率の4つの物理的性質を求めることができる特徴がある。本研究で使用した各種細骨材の真密度は、川砂が $2.68 \sim 2.72 \text{ g/cm}^3$ 、陸(山)砂が $2.67 \sim 2.72 \text{ g/cm}^3$ 、砕砂が $2.71 \sim 2.81 \text{ g/cm}^3$ の範囲である。砕砂の密度の違いは、岩種の違いによるものと考えられ、多くの砕砂の真密度は、 $2.71 \sim 2.74 \text{ g/cm}^3$ の範囲である。一般にコンクリート用骨材の岩種は、全体の80%が砂岩、安山岩、石灰岩である

と云われており⁴⁾、本研究の細骨材の真密度は、これらの岩石の真密度 $2.69 \sim 2.70 \text{ g/cm}^3$ に非常によく対応しており、大部分が堅硬な岩質であると推量される。しかし、陸砂など1, 2の細骨材は、真密度の小さいものもあり (2.65 g/cm^3)、風化等の影響を若干受けているものも含まれている。このように、細骨材の密度のうち、真密度は、骨材の吸水率とともに、骨材の『堅硬度』推量の尺度になり得ると考えられる。

4. 減圧吸水法の特徴と問題点

骨材の密度および吸水率は、「強硬な骨材である」という要求品質を照査・検証する重要な品質項目の一つと考えられる。その試験方法には、①絶対値が測定できる、②高い測定精度で、かつ再現性が高い、③個人差が少ないなどが求められる。

4.1 減圧吸水法の特徴

細骨材の密度および吸水率試験方法として、JIS A 1109の方法、遠心脱水による方法(JIS A 1802)が規定され、実用に供されている。この他に高周波位相、溶解熱、乾燥速度(乾燥化速度)、電気抵抗値、電流値、食塩水濃度などを利用した各種試験方法も提案されている³⁾。これらに対し、減圧吸水法による試験方法は、以下の特徴を持ち、前述の条件を備えていると考えられる。

①「表乾密度」、「絶乾密度」、「(見掛けの)真密度」および「(減圧)吸水率」の4つの品質項目を同一試料による一回の試験によって求めることができる。

②絶乾状態(水分量ゼロ)の試料を用い、その絶対容積の経時変化曲線から密度および吸水率を算出するため、測定値の個人差を少なくできる。これは、JIS法が表乾状態を再現し、水分の基準とするのに対し、減圧吸水法が試料の絶乾状態を水分の基準にするためである。

4.2 粒子形状および表面特性の影響

減圧吸水法による試験方法は、絶乾状態の試料を用いて、粒子間の巻き込み気泡の除去段階

表-1 細骨材の粒子形状および表面状態の観察結果の一例（実体顕微鏡による観察）

No.	細骨材の種類	粒子径の範囲／粒子形状の特徴		粒子径の範囲／粒子表面の状態	
		5～1.2mm	1.2～0.15mm	5～1.2mm	1.2～0.15mm
1	川砂／鬼怒川産	丸みのある多角形	やや角張りあり	若干の凹凸、窪みあり	若干の凹凸、窪みあり
2	陸砂／栃木市産	角張りあり	角張りあり	ザラザラし、細かい凹凸あり	若干の凹凸、窪みあり
3	山砂／青森産	丸みのある多角形	角張りあり	凹凸、窪みあり	凹凸、窪みあり
4	砕砂／葛生町産	かなりの角張りあり、細長	かなりの角張りあり、細長	ザラザラし、凹凸あり	ザラザラし、凹凸あり
5	ダム堆砂／青森	丸みのある多角形	丸みのある多角形	多数の窪みあり	若干の窪みあり
6	火山灰／島原産	丸みのある多角形	丸みのある多角形	細かい凹凸、窪み多数	細かい凹凸、窪み多数

表-2 モデル細骨材の物理的性

密度 (g/cm ³)	粒径の範囲 (mm)	粗粒率	粒度分布〔ふるいの呼び寸法 (mm)／残留百分率 (%)〕					
			5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
2.46	4.7～0.15	3.24	0	18	45	72	90	100

表-3 微粒分の物理的性質

種 類	密度 (g/cm ³)	粉末度 (cm ² /cm ³)	平均粒径 (μm)
銅スラグダスト	3.6	3600	60.4
砕石ダスト	2.74	6800	45.7

から粒子の吸水（減圧吸水）開始段階に変わる境界の定量的な判定により行っているの、粒表面状態を実体顕微鏡で観察し、定性的（視覚的に）に評価した結果の一例を示す。表-1の観察結果より、川砂、陸砂、山砂、砕砂、ダム堆砂（堆積砂）、火山灰などの粒子形状、粒子の表面特性は、種類によって「角張っているが丸みをもっている」、「角張りが目立つ」、「丸みを持つ多角形である」、「表面に凹凸、くぼみが目立つ」、「表面がザラザラしている」など、特徴的な傾向が認められる。角張り、細長、凹凸、くぼみなどの粒子が多い細骨材は、JIS 法における表乾判定に及ぼす影響が大きいと考えられる。これに対し、減圧吸水法の場合、減圧による巻込み気泡の除去（脱泡）によって表乾相当状態を判定するために、粒子形状、表面特性（凹凸、くぼみなど）の影響は少ないものと考えられる。しかし、図-3、図-4および図-6に示したように、JIS 法および減圧吸水法は、ともに細骨材中の0.15mm未満の微粒分量の影響を受けるため、微粒分量と粒子形状、表面特性との重畳（重ね合わせ）の影響を検討する必要がある。さらに、今後は、減圧吸水法による細骨材

子形状（角張っている、表面が凹凸である、球形であるなど）および粒度（0.15mm未満の微粒分の多少、粒度の不連続など）が測定結果の精度に影響すると考えらる。これらの要因は、JIS 法においても、同様に、その結果に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

表-1は、各種の細骨材について粒子形状および密度および吸水率試験に及ぼす粒子形状、表面特性、微粒分量の影響を定量的かつ理論的に検討することも必要がある。

4.2 密度に及ぼす微粒分の影響

減圧吸水法による細骨材の密度および減圧吸水率に及ぼす微粒分量の影響をガラスビーズのモデル細骨材によって実験的に検討した。

(1) 使用材料

モデル細骨材は、0.15mm以上の細骨材がモデル化でき、かつ、吸水率が0%のものとしてガラスビーズを選定した。表-2は、モデル細骨材の密度および粒度を示す。微粒分は、粒径0.15mm未満の砕石ダストおよび銅スラグダストの2種類とした。表-3は、微粒分の物理的性質を示す。

(2) 実験方法

実験試料は、所定量（約190ml）のガラスビーズに粒径0.15mm未満の微粒分を加えて準備した。微粒分の量は、0、25g（5%）、50g（10.9%）、75g（15.6%）、115g（25.7%）および200g（37.6%）の6水準とした。

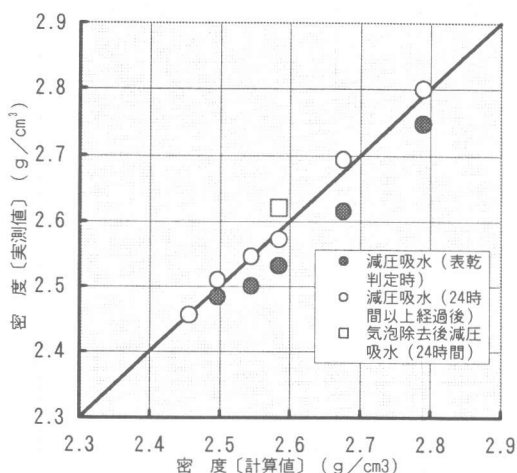


図-7 模擬細骨材の密度の実測値と計算値の関係(銅スラグダスト)

実験試料の見掛けの絶対容積の測定は、減圧吸水法による水の置換法によって行った。実験試料は、1水準3個とした。実験試料の密度は、前述の算定式によって求めた。

(3) 結果および考察

微粒分を含まないモデル細骨材だけの絶対容積は、巻き込み気泡が減圧処理10分で除去され、その後一定の値となる⁵⁾。しかし、0.15mm未満の碎石ダストおよび銅スラグダストを混入したモデル細骨材の絶対容積は、微粒分がフロック状になり、巻き込み気泡が抜けぬくなるため、その減少が著しく緩くなることが認められた⁵⁾。図-7は、微粒分混入率毎のモデル細骨材密度の実測値と計算値との相関の一例を示す。図-7より、銅スラグダストを混入した場合、表乾相当状態を判定して算定した密度は、いずれの混入率においても、計算値より幾分小さくなる。しかし、気泡を追出して算定した密度(見掛けの真密度に相当)は、ほぼ計算値と一致する。密度は、計算値の $-0.011 \sim +0.019 \text{ g/cm}^3$ の範囲である。また、碎石ダストの密度も、気泡を追出して算定した場合、ほぼ計算値と一致する($-0.017 \sim +0.027 \text{ g/cm}^3$)。このように、微粒分を含む細骨材の場合、モデル細骨材の表

乾相当状態の判定が非常に難しい。すなわち、微粒分による巻き込み気泡除去の遅れなのか、微粒分の吸水なのか判断できない。したがって、今後、0.15mm未満の微粒分の分散方法および吸水の有無について更に検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、栃木県で産出する細骨材に、減圧吸水法を適用し、JIS法との比較検証を行った。さらに、この方法の問題点についても考察した。検討結果から、以下のことが明らかになった。

- (1) 多くの細骨材の密度は、減圧吸水法による値の方がJIS法による場合より大きく測定される。また、吸水率は、逆に著しく小さく測定される細骨材が多い。
- (2) 川砂、陸(山)砂などの密度および吸水率は、微粒分量10%以下の場合、値の変動が大きくなる傾向にある。しかし、砕砂の場合は、微粒分量の影響(2~13%)がほとんど認められない。
- (3) 密度および吸水率の測定においては、粒子形状、表面特性、微粒分量とその成分(粘土鉱物)の影響の定量的な検討とともに、これらの重畳(重ね合わせ)の影響の検討も必要ある。

参考文献

- 1) 黒井、松村；減圧吸水による細骨材の見掛け容積測定法に関する基礎研究、土木学会第23回関東支部技術研究発表会講演概要集、pp.626~pp.627、1996.3
- 2) 黒井、松村、宮澤；減圧吸水による細骨材の密度および吸水率測定に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.2、pp.31~pp.36、1999.7
- 3) 土木学会；骨材試験方法小委員会(309委員会)第1回幹事会資料、1997.10
- 4) 日本コンクリート工学協会(編)；コンクリート覧(第二版)、pp.52~pp.56、技報堂出版、1996.2
- 5) 黒井、松村；細骨材の見掛けの絶対容積測定値に及ぼす微粉末の影響、土木学会第26回関東支部技術研究発表会講演概要集、pp.860~pp.862、1996.3