フレッシュコンクリートのせん断変形抵抗性に及ぼす間隙水圧の影響
に関する実験的研究EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF PORE WATER PRESSURE
ON SHEAR DEFORMATION OF FRESH CONCRETE

李 建 哲*1, 谷川 恭雄*2, 森 博嗣*3, 黒川 善幸*4, 三島 直生*5

Gun-Cheol LEE, Yasuo TANIGAWA, Hiroshi MORI,

Yoshiyuki KUROKAWA and Naoki MISHIMA

In this study, the rheological properties of fresh mortar and concrete were investigated experimentally by shear box test. The pore water pressure in fresh mortar and concrete was measured as an influence factor of rheological properties of fresh concrete. The cohesion and the coefficient of dynamic internal friction were represented from pore water pressure and shear stress measured in the experiment. As the result, it was clarified that the rheological properties is affected by the pore water pressure in fresh mortar and concrete. Moreover, the correcting method of shear stress in case of shear box test was obtained, and the cohesion and the coefficient of dynamic internal friction were quantified.

Keywords : Fresh concrete, Rheology, Coefficient of dynamic internal friction, Effective stress, Pore water pressure, Side pressure, Grain shape of coarse aggregate

フレッシュコンクリート、レオロジー、動的内部摩擦係数、有効応力、間隙水圧、側圧、粗骨材の粒子形状

1. はじめに

近年のコンクリート工事における施工条件や材料の多様化は、従来の施工マニュアルでは、対応しきれないケースを増やしてきた。そこで、フレッシュコンクリートのコンシステンシーの定量化が望まれているが、均質なビンガムモデルで表現されてきたものの、実際には、高濃度サスペンションであり、流動時や鉄筋間通過時などの大変形時には、粒子の接触の影響が避けられない。

これまでに、骨材粒子どうしの接触の影響を考慮してより精密なレオロジーモデルの構築を試みた研究がいくつか報告されている。筆者ら¹⁾は、ビンガム定数である降伏値および塑性粘度が応力状態の影響を受けると仮定した複合モデルを過去に提案した。橋爪ら²⁾は、このモデルに経時変化をパラメータとして取り入れ、降伏値の圧力依存性と経時変化を考慮したフレッシュモルタルの降伏値モデルを提案している。この他にも、フレッシュコンクリートに対する3軸圧縮試験の結果^{3,4)}などから、フレッシュコンクリートが粉粒体としての性質、すなわち内部摩擦係数および粘着力を持つことが確認されている。しかし、これらはいずれも外部からの拘束力の変化によるレオロジー定数の変化を対象としたものである。

そこで、筆者らは、流動状態にあるフレッシュコンクリートにお

ける固体粒子間の接触に注目し、せん断変形時のサスペンションの変形のメカニズムを観測した^{5,6)}。飽和砂を試料としたせん断ボックス試験においては、せん断変形時に、ダイラタンシーにより間隙水圧が変化し、せん断応力が顕著に増加する現象が観察された⁹⁾。このことは、高濃度サスペンションには、試料の外部からの拘束力の変化がない場合にも、変形とともにレオロジー定数が変化する性質があることを示唆している。同じく高濃度サスペンションであるフレッシュコンクリートおよびモルタルにおいても同様の現象が生じるものと考えられるが、この点に着目した研究は報告されておらず、流動状態における間隙水圧の変化も測定されていない。

本研究では、フレッシュコンクリートのレオロジー性質をより正確に把握することを目指している。本報では、フレッシュコンクリートのせん断変形抵抗性に及ぼす間隙水圧の影響を明確にするため、まず、フレッシュモルタルを試料としたせん断ボックス試験を行い、せん断変形過程における試料内部の間隙水圧の測定を行った。また、実測された間隙水圧およびせん断応力より、流動状態における内部摩擦係数および粘着力の定量化を試みた。さらに、形状が異なるモデル粗骨材を混入したコンクリートを用いた実験を行い、その流動性状に及ぼす粒子形状の影響について検討した。

*1 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻
大学院生・工修

*2 名城大学理工学部建築学科 教授・工博

*3 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻
助教授・工博

*4 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 助手・工修

*5 三重大学工学部建築学科 助手・博士(工学)

Graduate Student, Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Meijo Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., M. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Mie Univ., Dr. Eng.

2. フレッシュモルタルを試料とした実験

2.1 レオロジー定数の測定

フレッシュコンクリートに適用されるせん断型のレオロジー試験には、1面せん断試験⁷⁾の他にせん断ボックス試験⁸⁾が考えられるが、本研究では、鉛直型⁹⁾のものをを用いた。本研究で用いたせん断ボックス試験装置は、試料容器の前面が固定されており、モータによって所定のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ で試料を直接せん断変形させ、その時の試料のせん断応力 τ とせん断ひずみ γ を直接測定する装置である。その概要を図-1に示す。試料寸法は、100×100×100mm、最大せん断ひずみは $\gamma=1.8$ であり、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は、各試料ごとに0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0/sの6段階とし、測定順の影響を排除するため、順序をランダムにした。測定は、各せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ ごとに3～5往復させて、繰返しせん断変形時のせん断応力 τ を測定した。

測定項目としては、せん断応力 τ 、せん断ひずみ γ およびせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ 以外に、試料底部の中央に埋設した $\phi 10 \times 5$ mmの間隙水圧計により間隙水圧 u を、試料容器前側面のアクリル板の下部に設置した $\phi 25$ mmの土圧計により側圧 σ_s をそれぞれ計測した。間隙水圧計および土圧計の零点は、試料充填後の静止状態の値とした。

2.2 試料

実験に用いたフレッシュモルタルの調合を表-1に示す。実験要因として、水セメント比W/Cを0.3, 0.4および0.5の3水準とし、細骨材の単位容積 V_s を0.50, 0.55, 0.60 m³/m³の3水準としたが、材料分離などが生じた調合は除外した。

セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材にはJIS R 5201のセメント強さ試験用標準砂を用いた。

2.3 実験結果とその考察

(a) 測定値の時刻歴

図-2は、測定されたせん断応力 τ 、間隙水圧 u および側圧 σ_s の時刻歴の一例を示したものである。同図(a)および(b)から明らかなように、せん断変形の進行に伴って、間隙水圧 u が減少すると同時にせん断応力 τ が増加し、せん断変形が反転する際には、内部の試料の液状化により間隙水圧 u が急増すると同時にせん断応力 τ が減少する。この現象は、飽和砂を試料とした実験⁹⁾と同様の結果であり、液状化によるせん断応力の減少と液状化終了後の正のダイラタンシーによるせん断応力 τ の増加というメカニズムで説明できる。

また、同図(c)に示すように、せん断変形に伴う側圧 σ_s の変化が確認された。この現象に関しては、既報⁹⁾においてそのメカニズムが解析的に検証されており、せん断ボックスの対角線上にある試料に圧縮力が生じることが原因と考えられる。

このように複雑な現象をすべて分析してモデル化するのは現時点では困難であるため、本報では、まず液状化後の正のダイラタンシーの影響を主に分析する。

(b) 細骨材の単位容積の影響

図-3は、W/C=0.4の試料No.3～5について、各測定値とせん断ひずみ γ の関係を示したものである。同図には、複数回の繰返しせん断変形時における測定結果の平均値を示してある。なお、図中にはせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が0.1および1.0/sの結果のみを示した。

図-1 鉛直型せん断ボックス試験装置

表-1 モルタルの調合

No.	W/C	SCA/C	Vs	W	C	S
1	0.3	0.0	0.50	238	794	1,320
2			0.55	214	713	1,452
3	0.4		0.50	273	683	1,320
4			0.55	245	613	1,452
5			0.60	217	544	1,584
6	0.5		0.55	269	538	1,452
7			0.60	239	477	1,584
8	0.4		0.1	0.55	245	613

[Notes] W/C: Water-cement ratio, SCA/C: Segregation control agent-cement ratio (%), Vs: Volumetric ratio of fine aggregate (m³/m³), W: Water (kg/m³), C: Cement (kg/m³), S: Fine aggregate (kg/m³).

まず、図(b)に示す間隙水圧

u の測定結果は、せん断ひずみ γ の増大に対して、ほぼ線形に減少する傾向が見られる。また、細骨材の単位容積 V_s の増加に伴って、その変化量が大きくなっている。試料No.5では、せん断ひずみ γ が1.5以上の領域において間隙水圧 u が増加に転じているが、これは、側圧 σ_s の増加の影響を受けたためと考えられる。

これに対して、図(c)に示す側圧 σ_s の測定結果は、せん断ひずみ γ が1.2以下の領域においてはほぼ一定値を示しながら、1.2を越えると急激に増加する傾向が見られる。また、細骨材の単位容積 V_s が増加すると、間隙水圧 u の場合と同様にその変化量が大きくなる。

図(a)に示すせん断応力 τ の測定結果は、間隙水圧 u および側圧 σ_s の特徴を合わせ持った形状となっていると見ることができる。

間隙水圧 u の変化が図(b)に示されるように実測されたことから、仮に側圧 σ_s が変動しなくても、正のダイラタンシーにより、せん断変形とともにせん断応力 τ が増加する性質があることは明らかである。しかし、試料の拘束力となる側圧の変化は、せん断ボックス試験に固有な試料の変形状態の結果⁹⁾と考えられるため、正確なレオ

図-2 せん断応力 τ 、間隙水圧 u および側圧 σ_s の時刻歴の一例 (No.7, $\dot{\gamma}=0.1/s$)

図-3 細骨材単位容積 V_s の影響 ($W/C=0.4$ の例) 図-4 増粘剤添加の影響
($W/C=0.4$, $V_s=0.55$ の例)

ローゼン性質の評価には、この側圧の影響を除外する必要がある。

(c) 増粘剤の添加の影響

図-4は、調合No.4に増粘剤をセメント質量に対して0.1%添加した試料No.8の試験結果を示したものである。試料No.4では、せん断ひずみ γ の増加とともに間隙水圧 u が明らかに減少しているが、増粘剤を添加した試料No.8では、ほぼ一定となる。これは、間隙水の粘性の影響と考えられる。

増粘剤を添加しない試料では、図-5に示すように、強制変形を与えると、粒子どうしが接触して正のダイラタンシーが生じる。このとき、間隙が増加するため間隙水圧は減少する。一方、増粘剤を添加すると、間隙水の粘性が高くなるため、図-5(a)から(b)のような変形状況では間隙水圧の低下およびせん断抵抗の増加がより大きくなるが、一旦液状化すると液状化終了までに時間がかかるため、本実験における繰返しせん断変形時には常に液状化している状態となり、粒子の接触がないことで間隙水圧の変化が現れないものと考えられる。図-4(b)に示す増粘剤を添加した試料は、後者の状態にあると考えられる。また、図-4(c)に示すように、側圧 σ_s がほぼゼロのまま、せん断ひずみ $\gamma=1.2$ 程度まで変形しており、液状化状態の骨材粒子の接触がない状態では側圧 σ_s もほとんど変化しないことがわかる。

(d) 動的内部摩擦係数および粘着力

フレッシュコンクリートの流動挙動を把握するためには、流動時の応力状態を把握する必要がある。実験から得られたせん断応力 τ 、間隙水圧 u および側圧 σ_s の模式図を図-6に示す。せん断ひずみ γ の

図-5 間隙水圧の低下のメカニズム

図-6 各測定値とせん断ひずみ γ の関係の模式図

増大に伴うせん断応力 τ の変化は、間隙水圧 u および側圧 σ_s の影響が重なるため、正確なレオロジー性質を得るためには側圧 σ_s の影響を排除する必要がある。

せん断応力 τ に直接影響するのは有効応力 p と考えられる。これと間隙水圧 u および全応力 σ の関係は、一般に式(1)で示される。

$$p = \sigma - u \quad (1)$$

ここに、 p : 有効応力(Pa)、 σ : 全応力(Pa)、 u : 間隙水圧(Pa)

表-2 図-7中の直線式の回帰係数

No.	c	tan ϕ	ϕ	R
1	337	0.256	14.3	0.93
2	702	0.368	20.2	0.89
3	137	0.097	5.5	0.40
4	157	0.225	12.6	0.68
5	262	0.389	21.2	0.93
6	147	0.080	4.5	0.28
7	208	0.259	14.5	0.94

[Notes] c: Cohesion (Pa), tan ϕ : Coefficient of dynamic internal friction, ϕ : Angle of dynamic internal friction ($^{\circ}$), R: Coefficient of correlation.

全応力としては通常は自重を考えるが、本実験では外部からの拘束力が変化するため、拘束力も全応力として考慮することとする。ただし、本実験で計測される拘束力は、せん断面に垂直に作用する側圧のみであるため、有効応力としてはせん断面に垂直に作用する物のみを考慮した。

式(1)により得られる有効応力 p とせん断応力 τ の関係は、内部摩擦係数 $\tan \phi$ および粘着力 c により線形に表わされる¹⁰⁾。ただし、ここで得られる内部摩擦係数 $\tan \phi$ は、静的な状態を表現するクーロンモデル²⁾のものではなく、試料の流動時における動的な状態のパラメータ、すなわち動的内部摩擦係数 $\tan \phi$ と考えることができる。

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi$$

$$= c + (\sigma - u) \tan \phi \quad (2)$$

ここに、 τ :せん断応力(Pa)、 c :粘着力(Pa)、

σ' :せん断面に垂直に作用する有効応力(Pa)、

σ :全応力(Pa)、 u :間隙水圧(Pa)、 $\tan \phi$:内部摩擦係数

せん断応力 τ と有効応力 p の関係を図-7に、また、その回帰係数を表-2に示す。なお、ここでは液状化および側圧の影響を大きく受けないせん断ひずみ $\dot{\gamma}$ が0.2~1.2の範囲のデータを対象とした。また、本実験の範囲では、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の影響が小さいため、全データに対して1本の直線で近似した。

図-7によると、有効応力の増加とともにせん断応力が線形に増加し、フレッシュモルタルの変形時にも、粒子間の内部摩擦抵抗が生じていることが示されている。また、その勾配は、水セメント比 W/C が小さいほど、細骨材の単位容積 V_s が増加するほど急になる。

図-8は、粘着力 c および内部摩擦係数 $\tan \phi$ に及ぼす調査要因の影響を示したものである。いずれも細骨材の単位容積 V_s が大きいほど、また、水セメント比 W/C が小さいほど大きな値となる。特に、粘着力 c に及ぼす影響は水セメント比 W/C が0.3の試料で顕著である。

3. モデル粗骨材を混入した試料を用いた実験

3.1 実験の概要

粗骨材の粒子形状¹¹⁾がフレッシュコンクリートの内部摩擦抵抗に及ぼす影響について調べるため、水セメント比 W/C が0.4のフレッシュモルタルを基本調合とし、これに、図-9に示す球形ないし三角柱

図-7 せん断応力 τ と有効応力 p の関係 図-8 粘着力 c および内部摩擦係数 $\tan \phi$ に及ぼす調査要因の影響

の3種類の単粒度のモデル粗骨材を外割で混入した試料を作成した。コンクリートの調合を表-4に示す。粗骨材の単位容積 V_g は0.3および0.4 m^3/m^3 とした。モデル粗骨材の物性を表-3に示す。セメントと細骨材は2章と同じものを用いた。

フレッシュコンクリートのレオロジー試験には、2章と同様に、鉛直型単純せん断ボックス試験装置を用いた。また、1/2サイズのスランプ試験を併せて行った。それらの結果を表-4に併示する。

3.2 実験結果とその考察

(a) 各応力の測定

図-10は、モデル粗骨材の単位容積 $V_g=0.3m^3/m^3$ の試料における各測定値とせん断ひずみ $\dot{\gamma}$ の関係である。図を見やすくするため、図中にはせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が0.1, 1.0/sの結果のみを示した。図(a)に示すせん断応力 τ は、せん断ひずみ $\dot{\gamma}$ が増加するほど大きくなる。また、わずかながらせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が速いほど小さくなる。これらは、高濃度サスペンションに特有な間隙水の移動や粘度に関係すると考えられる。本実験では、繰返しせん断変形を与えており、間隙水の粘度が低い場合、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が速いと、液状化状態が持続してせん断抵抗が小さくなる傾向を示す。なお、間隙水の粘性を高くした既往の実験¹²⁾では、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が速い方がせん断応力 τ が大きくなる傾向が得られている。

表-3 モデル粗骨材の物性

Symbol	Shape	Size	ρ	Ga	Wp
○-5	Sphere	ϕ 5mm	2.70	64.8	0.09
○-8	Sphere	ϕ 8mm	2.70	60.7	0.03
△-6	Trigonal prism	$\Delta 6 \times 5$ mm	2.50	65.3	0.00

[Notes] ρ : Specific gravity (g/cm³), Ga: Solid volume fraction (%), Wp: Water absorption (%).

(a) 球形: ○-5 (b) 球形: ○-8 (c) 三角柱: △-6

図-9 モデル粗骨材の形状

図(b)に示す間隙水圧 u は、せん断変形の増加に伴う減少傾向がモルタル試料に比べて顕著である。間隙水圧 u の変化は基本的に細骨材粒子の接触に起因するので、これは粗骨材の直接的影響よりも、粗骨材の混入によって限られたモルタル層のせん断ひずみが局所的に増大したためと考えられる。なお、せん断ひずみ γ が1.2以上の領域では、間隙水圧 u が増加に転じる傾向が見られる。また、粗骨材の種類による差はあまり見られない¹³⁾が、せん断ひずみ γ が0.2~1.2の間では、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が大きい方が間隙水圧 u は小さい。これは、せん断応力 τ の結果と対応している。

図(c)に示す側圧 σ は、モルタル試料と同様に、せん断ひずみ γ が1.2前後で急激に増加する傾向を示し、三角柱粗骨材の場合に特に顕著である。せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の変化による差はあまり見られない。

(b) 動的内部摩擦係数および粘着力

図-11は、せん断応力 τ と有効応力 p の関係を、また表-5は、その回帰係数を示したものである。ただし、 $V_g=0.4$ の場合の間隙水圧 u は、せん断ひずみ γ が0.8の付近で減少から増加に転ずるため、対象とするせん断ひずみ γ の範囲を0.2~0.8とした。

モデル粗骨材の混入によって、内部摩擦係数 $\tan \phi$ および粘着力 c がモルタル試料に比べて大きくなっている。 $V_g=0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ の場合、球形粗骨材どうしでは、○-8より○-5の方が粘着力 c および内部摩擦係数 $\tan \phi$ が大きくなるが、大きさおよび実積率がほぼ同じである○-5と△-6の差は小さい。これに対し、 $V_g=0.4\text{m}^3/\text{m}^3$ の場合には、球形粗骨材どうしの差が小さい。ただし、○-5と△-6の結果は相関係数が低下しており、特に試料C-6は、ばらつきが大きい。

図-12は、粘着力 c および内部摩擦係数 $\tan \phi$ と各要因の関係を示したものである。同図によると、粘着力 c は、粗骨材の単位容積 V_g とともに増加し、球形粗骨材より三角柱粗骨材の方が若干大きい。ただし、 $V_g=0.4\text{m}^3/\text{m}^3$ の場合には、粗骨材の種類による差が小さくなるが、いずれの試料も1/2サイズのスランプ値 mSl が小さく、強制変形によっても、この単位容積では頭打ちとなって、粗骨材の形状や実積率の影響が現われないことがわかる。また、余剰モルタル膜厚 $Fm^{14)}$ は、粘着力 c とほぼ線形の関係にあり、今回の実験の範囲で

表-4 コンクリートの調合と1/2スランプ試験の結果

No.	W/C	Vg	Aggregate Type	W	C	S	G	mSl.	mSf.
M-1		0.0	-	250	625	1,435	0	108	183
C-1		0.3	○-5	175	438	1,019	810	55	110
C-2			○-8	175	438	1,019	810	80	125
C-3			△-6	175	438	1,019	750	45	101
C-4		0.4	○-5	150	375	861	1,080	11	100
C-5			○-8	150	375	861	1,080	27	102
C-6			△-6	150	375	861	1,000	8	100

[Notes] W/C: Water-cement ratio, Vg: Volume fraction of coarse aggregate (m³/m³), W: Water (kg/m³), C: Cement (kg/m³), S: Fine aggregate (kg/m³), G: Coarse aggregate (kg/m³), mSl.: Half-size slump value (mm), mSf.: Half-size slump-flow value (mm).

図-10 モデル粗骨材の形状の影響 ($V_g=0.3$ の例)

は、粗骨材の影響を総合的に表すパラメータであるといえる。

内部摩擦係数 $\tan \phi$ は、粗骨材の単位容積 V_g の増加に対してわずかに増加している。また、余剰モルタル膜厚 Fm および1/2サイズのスランプ値 mSl との関係は、粘着力 c ほど明確な相関は見られない。このことから、粗骨材の混入は、内部摩擦係数 $\tan \phi$ よりも粘着力 c に大きな影響を与えると判断できる。これは、粗骨材間隔が短くなることによって粒子間の接触・かみ合いの箇所が多くなったためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、フレッシュ状態のモルタルおよびモデルコンクリートを試料としたせん断ボックス試験を行い、せん断変形時の間隙水圧、側圧およびせん断応力の関係を測定し、また、この測定値から

表-5 図-11中の直線式の回帰係数

No.	c	$\tan \phi$	ϕ	R
M-1	80	0.238	13.4	0.89
C-1	315	0.303	16.7	0.94
C-2	202	0.269	15.1	0.92
C-3	344	0.299	16.7	0.96
C-4	341	0.261	14.6	0.89
C-5	339	0.276	15.4	0.97
C-6	381	0.370	20.3	0.83

[Notes] c : Cohesion (Pa), $\tan \phi$: Coefficient of dynamic internal friction, ϕ : Angle of dynamic internal friction ($^{\circ}$), R: Coefficient of correlation.

流動状態における内部摩擦係数および粘着力を定量化する手法について検討した。本実験で得られた知見を以下に示す。

- フレッシュモルタルでは、せん断変形に伴って間隙水圧が低下し、せん断応力が増大する。また、粗骨材の混入によって、その傾向は顕著になる。
- 間隙水圧およびせん断応力のせん断ひずみ依存性は、細骨材の単位容積が増大するほど、また粗骨材の混入によって顕著になる。
- せん断ボックス試験では、測定されるせん断応力に対して、側圧の変化が影響を及ぼすと考えられ、その影響は骨材の単位容積が大きいほど大きくなる。一方、今回の実験の範囲では、粗骨材の寸法または形状の影響は小さかった。
- せん断ボックス試験結果から、粘着力および動的な内部摩擦係数を定量化することができる。
- 細骨材の単位容積の増加、水セメント比の減少、粗骨材の混入により、粘着力および動的な内部摩擦係数は増加する傾向を示す。

以上のように、せん断変形時のフレッシュコンクリートは、間隙水圧の作用によりせん断抵抗が大きく変化することが明らかとなった。

謝辞：本研究に際して、佐々嘉宣君（名古屋大学大学院生）の協力を得た。また、本研究費の一部は、平成15年度日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(B)によった。付記して謝意を表する。

引用文献

- 森博嗣・田中政史・谷川恭雄：フレッシュコンクリートのせん断変形性質に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集, No.421, pp.1-10, 1991.3
- 橋爪進・谷川恭雄・森博嗣：圧力依存性および経時変化を考慮したフレッシュモルタルの降伏値モデルに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.25-30, 2002.5
- 越川茂雄：まだ固まらないコンクリートの三軸圧縮試験について、土木学会第30回年次学術講演会講演概要集, No.5, pp.77-79, 1975
- 竹内十三男・越川茂雄・伊藤義也：フレッシュコンクリートの三軸圧縮試験方法に関する研究、フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集, pp.1-6, 1986.3
- 三島直生・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・寺田謙一・服部俊範：せん断ボックス試験による高濃度サスペンションのレオロジー性質に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集, No.528, pp.13-19, 2000.2
- 李建哲・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・三島直生：フレッシュセメントペーストに対するせん断ひずみ依存型粘塑性モデルの適用性に関する研

図-11 せん断応力 τ と有効応力 p の関係 図-12 粘着力 c および内部摩擦係数 $\tan \phi$ と各要因の関係

究、日本建築学会構造系論文集, No.568, pp.21-26, 2003.6.

- 土質工学会編：土質試験法, 1979
- 寺田謙一・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・三島直生・若林信太郎：せん断ボックス試験に基づくモデル材料を用いたフレッシュコンクリートのレオロジー性質に関する研究、日本建築学会構造系論文集, No.511, pp.17-24, 1998.9
- 藤本寿史・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・李建哲・比嘉盛嗣：粘塑性サスペンション要素法によるせん断ボックス試験のシミュレーション、日本建築学会東海支部研究報告集, No.42, pp.89-92, 2004.2
- 地盤工学会編：地盤工学入門, pp.78-100, 2000
- 吉村俊治・松岡元：粒子形状による粒状体の内部摩擦角の推定法、土と基礎, 50-5(532), pp.20-22, 2002.5
- 李建哲・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・三島直生・藤本寿史：粗骨材の粒子形状がフレッシュコンクリートのせん断ひずみ依存性に及ぼす影響、日本建築学会東海支部研究報告集, No.42, pp.85-88, 2004.2
- 寺田謙一・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・三島直生：フレッシュコンクリートのレオロジー性質及ぼすせん断層厚さおよび粗骨材要因の影響に関する研究、日本建築学会構造系論文集, No.513, pp.15-22, 1998.11
- T.C.Powers: The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, Inc, pp.121-122, 1968

(2004年5月10日原稿受理, 2004年10月25日採用決定)