

技術論文

# 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの蒸気養生特性と その利用

## Basic Properties and Utilization of Steam-Cured Concrete Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag

長尾之彦\*  
Yukihiko NAGAO

鈴木孝治  
Koji SUZUKI

### 抄 録

コンクリート製品工場において、耐塩害性やアルカリシリカ反応抑制などの耐久性改善、高流動コンクリートへの適用、CO<sub>2</sub>削減などを目的として、高炉スラグ微粉末の利用、検討が進められている。高炉スラグ微粉末を使用した蒸気養生コンクリートの強度特性、水密性、遮塩性について報告した。

### Abstract

At the precast concrete factories, the ground granulated blast-furnace slag has been used concrete products for the purpose of the durability improvement on the resistance of the suppression of alkali silica reaction. The other purposes are the application to the high fluidity concrete and reduction of CO<sub>2</sub> emission, etc. This paper shows the effect of steam curing and the properties of the strength, the water tightness, the salt diffusivity and the examples of the utilization.

## 1. はじめに

高炉スラグ微粉末は、塩害抑制、アルカリシリカ反応抑制などの耐久性や水密性改善が図れるコンクリート混和材料であり、近年はそのCO<sub>2</sub>削減効果も注目されている。一方、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは初期強度が小さく環境影響を受けやすいため、早期脱型を行った、十分な養生が行われない場合には強度発現性や耐久性が低下すること<sup>2)</sup>が知られている。

蒸気養生コンクリートは、コンクリートを加熱し早期に脱型を行うため、従来は高炉スラグ微粉末の利用が難しいと指摘されてきた。しかし、コンクリート工場製品においても、鉄筋コンクリートセグメントやプレストレストコンクリート製品などを中心に更なる耐久性向上が求められるようになり、高炉スラグ微粉末の利用、検討が行われている。

本稿では、高炉スラグ微粉末を使用した蒸気コンクリートの強度特性と水密性、遮塩性、および工場製品への適用例について記述する。

## 2. 蒸気養生とは

蒸気養生は高温の水蒸気の中でコンクリートを養生

し、早期に必要な強度を確保する促進養生方法であり、蒸気養生を行ったコンクリートを蒸気養生コンクリートと言う。

図1に蒸気養生の温度履歴の例を示す。コンクリートの初期強度は最高温度とその保持時間に大きく影響され、最高温度が高いほど早期の脱型が可能となり、1日当たりの

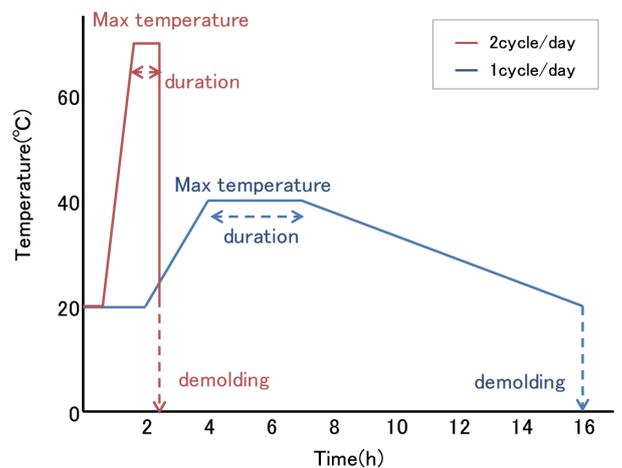


図1 蒸気養生の温度履歴  
Temperature history of steam curing

\* エスメント関東(株) 営業部 技術サービス室 室長 東京都中央区新川1-16-14 〒104-0033

コンクリート製品の製造サイクル数（成形→脱型の回数）が増加する。コンクリート製品工場では通常製品を1.5～2サイクル/日で、大型製品を1サイクル/日で製造しており、脱型時に必要な強度は通常製品:10～12N/mm<sup>2</sup>以上、大型製品:15N/mm<sup>2</sup>以上である。プレストレストコンクリート製品では脱型時にプレストレスを導入するため35N/mm<sup>2</sup>以上の強度が必要とされ、1サイクル/日で製造されることが多い。また、コンクリート工場製品は所要の強度が得られると早期に出荷される場合があるが、一般に材齢14日（一部の製品は材齢28日）で管理されている。

### 3. 強度特性

#### 3.1 スラグ置換率の影響

図2, 3に、高炉スラグ微粉末4000を使用し、蒸気養生

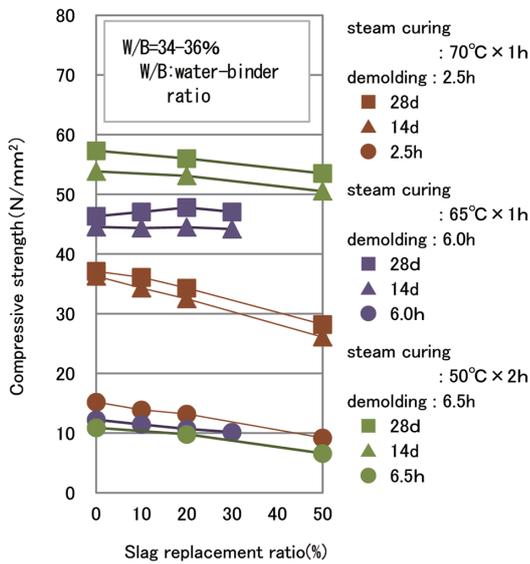


図2 圧縮強度試験結果（1.5～2サイクル/日）  
Results of compressive strength test (1.5-2 cycle/day)

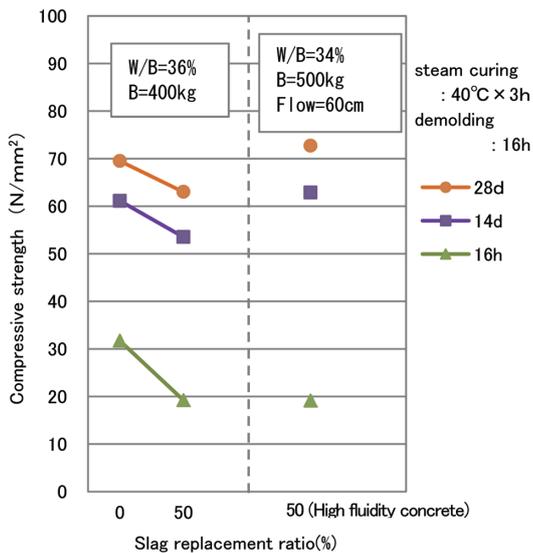


図3 圧縮強度試験結果（1サイクル/日）  
Results of compressive strength test (1 cycle/day)

後に気中養生を行ったコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。図2は1.5～2サイクル/日、図3は1サイクル/日を対象としている。スラグ置換率が増加するほど圧縮強度は低下する傾向にあるが、通常のコンクリートのような材齢の経過による順調な強度増加は期待できない。特に最高温度:70°C、脱型:2.5hの条件で高炉スラグ微粉末を使用すると、材齢14日、28日の圧縮強度の発現が小さくなるので注意が必要である。

スラグ置換率に関わらず、早期に脱型するために最高温度を高くしたコンクリートほど材齢14日、28日の圧縮強度は小さくなる傾向にある。各蒸気養生条件の材齢14日、28日強度の差異は各々約10N/mm<sup>2</sup>と大きく、所要の強度を確保するためには可能な範囲で最高温度を抑制することが望ましい。

一般に高炉スラグ微粉末による耐久性改善を目的とする場合、スラグ置換率を50%とすることが多いが、高炉スラグ微粉末4000では脱型時のみならず材齢14日、28日においても普通ポルトランドセメントの圧縮強度に達することは難しい。そのため、高炉スラグ微粉末の使用に際しては、適切なスラグ置換率を定めるとともに、水結合材比を低減する等の対策を講じる必要がある。圧縮強度確保のために水結合材比の低減（結合材量の増加）を行うと、高炉スラグ微粉末が材料分離抵抗性を有することから、粉体系高流動コンクリートの配合に近くなる。蒸気養生コンクリートに高炉スラグ微粉末を使用する場合、高流動コンクリートとし、耐久性改善と併せて打設作業の省力化や作業環境の改善を図ることも多い。

#### 3.2 スラグ粉末度の影響

図4, 5に、スラグ置換率50%での高炉スラグ微粉末の

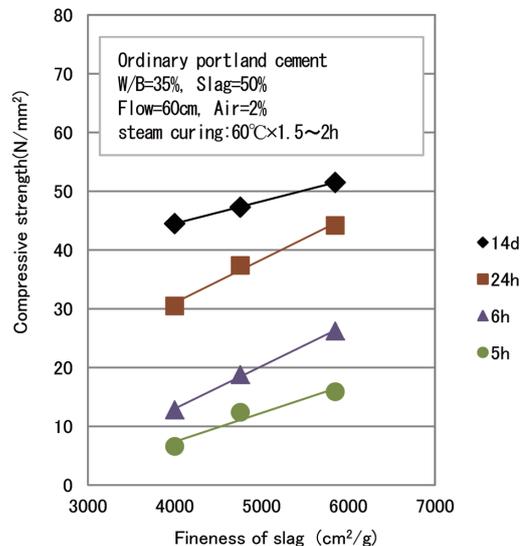


図4 スラグ粉末度と圧縮強度の関係  
Relationship between fineness of slag and compressive strength

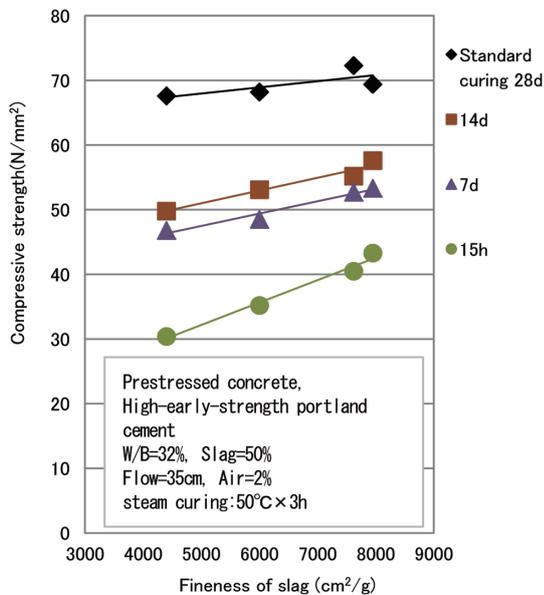


図5 スラグ粉末度と圧縮強度の関係

Relationship between fineness of slag and compressive strength

粉末度と圧縮強度の関係を示す。図4はベースセメントとして普通ポルトランドセメントを、図5はプレストレストコンクリート製品を対象に早強ポルトランドセメントを使用した結果である。セメントの種類に関わらず、高炉スラグ微粉末の粉末度が大きくなるほど、各材齢の圧縮強度は直線的に増加する傾向にあり、その影響の程度は初期材齢ほど大きい。そのため、粉末度が大きい高炉スラグ微粉末を用いることで、脱型時強度の確保が容易となる。

JIS A 6206 “コンクリート用高炉スラグ微粉末”には粉末度別に高炉スラグ微粉末 3000, 4000, 6000, 8000 の4種類が規定されているが、その強度発現性から1サイクル/日の製品は高炉スラグ微粉末 4000 を、1.5 サイクル/日以上の製品やプレストレストコンクリート製品では高炉スラグ微粉末 6000 を使用することが多い。

### 3.3 引張強度, 曲げ強度

図6に、高炉スラグ微粉末を使用した蒸気養生コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係を、図7に圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。

高炉スラグ微粉末を使用した蒸気養生コンクリートの圧縮強度と引張強度の関係はスラグ置換率に関わらず一定であり、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕の関係式で表される。また、圧縮強度と曲げ強度の関係も過去のコンクリート標準示方書の式<sup>3)</sup>と良く一致している。それに対して、標準養生コンクリート特にスラグ置換率 40% の場合には、同一圧縮強度における曲げ強度は、蒸気養生コンクリートより多少大きい結果となった。

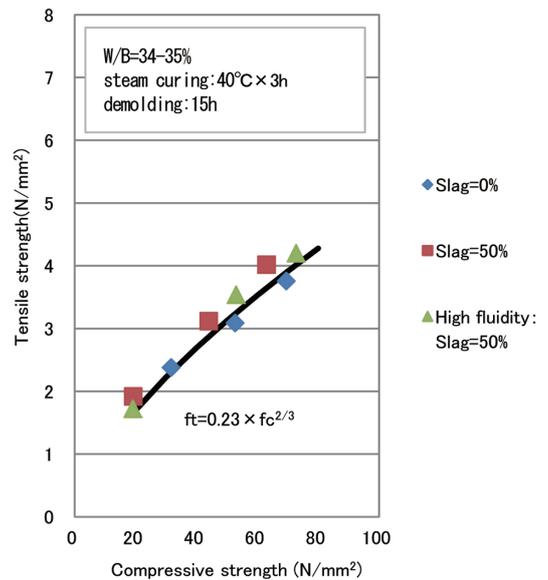


図6 圧縮強度と引張強度の関係

Relationship between compressive strength and tensile strength

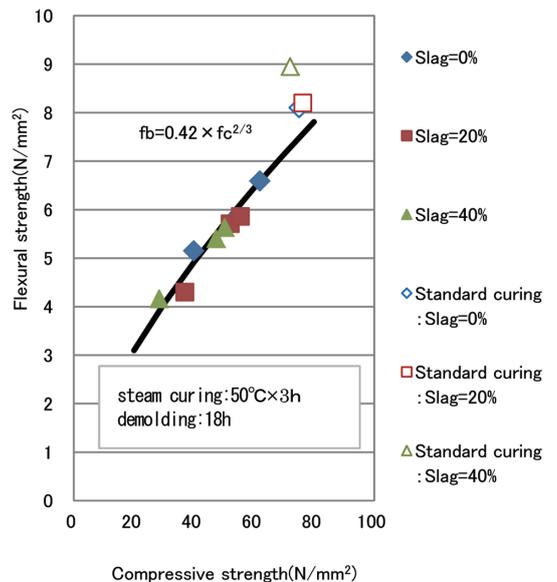


図7 圧縮強度と曲げ強度の関係

Relationship between compressive strength and flexural strength

## 4. 水密性

図8, 9に、蒸気養生後に気中養生を行い、材齢 28 日に試験を開始した透水試験（インプット法：水圧 10kgf/cm<sup>2</sup>, 加圧 72 時間）の結果を示す。

既往の報告<sup>4)</sup>と同様に、スラグ置換率が大きいほど水の拡散係数は小さくなり、蒸気養生コンクリートの水密性は向上する。最高温度：50°C x 2h, 脱型 6.5h では、スラグ置換率 20% の拡散係数は、同一水結合材比の普通ポルトランドセメントの約 1/10 となった。また、水結合材比を低減すると拡散係数は小さくなる傾向にあり、スラグ置

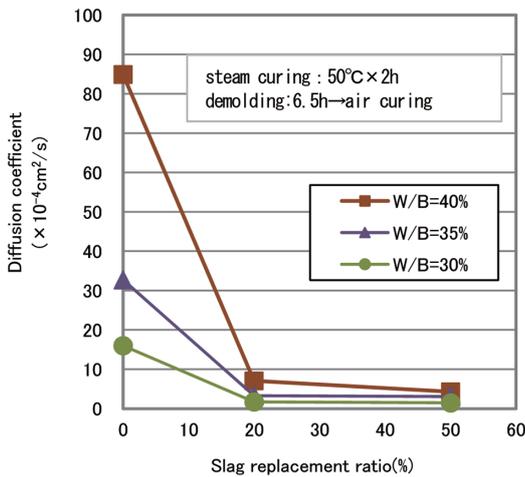


図8 スラグ置換率と水の拡散係数の関係  
Relationship between slag replacement and diffusion coefficient

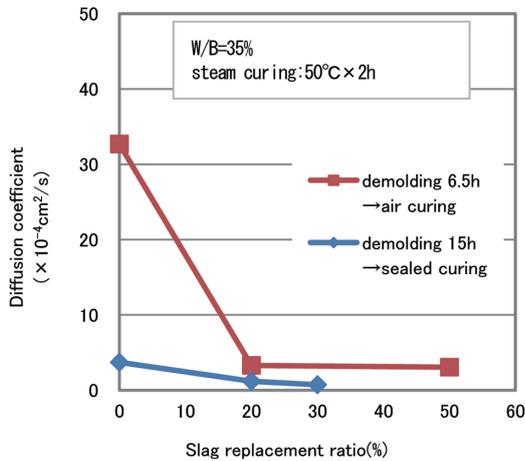


図9 養生条件が水の拡散係数に及ぼす影響  
Effect of curing condition on diffusion coefficient

換率に関わらず、水結合材比を5%低減する毎に拡散係数は約1/2に低下した。このように、水結合材比によっても水密性は改善できるが、普通ポルトランドセメントの水結合材比を30%としても水結合材比40%のスラグ置換率20%の場合よりも拡散係数は大きく、高炉スラグ微粉末による水密性改善効果が大きいことが判る。

脱型時間を6.5hから15hに延長することで、拡散係数は普通ポルトランドセメントで約1/9、スラグ置換率20%で約1/3となり、水密性の観点からも脱型時間を延長することが望ましい。

## 5. 遮塩性

図10にEPMAによる塩素の浸透深さを、図11にスラグ置換率と塩化物イオン拡散係数の関係を示す。試験体は蒸気養生後に気中養生を行い、材齢28日で人工海水に浸漬し、33か月後に試験に供した。

蒸気養生コンクリートにおいても、高炉スラグ微粉末の使用により塩化物イオンのコンクリート内部への拡散が抑

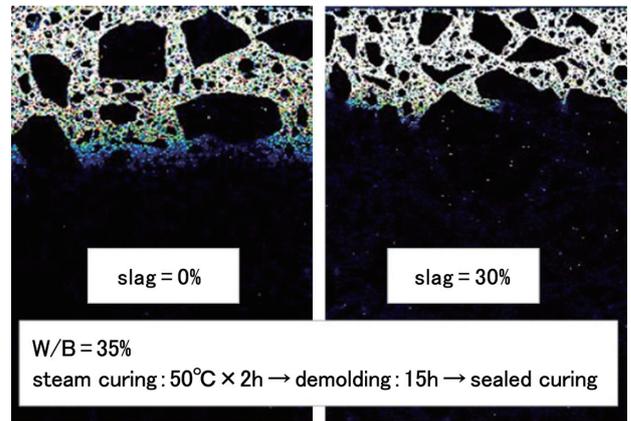


図10 塩分浸透試験結果 (EPMA : Cl)  
Test results of salt penetration depths by EPMA (Cl)

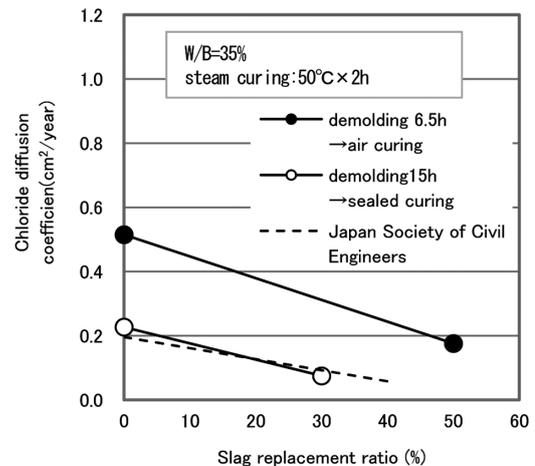


図11 スラグ置換率と拡散係数の関係  
Relationship between slag replacement and chloride diffusion coefficient

制されることが判る。脱型：15hの後に封緘養生を行ったコンクリートの塩化物イオン拡散係数は、スラグ置換率=0%、50%ともコンクリート標準示方書〔設計編〕の推定式から求めた値（普通ポルト：0.196cm<sup>2</sup>/年、高炉セメントB種相当：0.058cm<sup>2</sup>/年）と同程度であった。一方、脱型：6.5h - 気中養生の塩化物イオン拡散係数はそれらより大きく、脱型時間や蒸気養生後の養生が塩化物イオンの拡散に影響を与えることが判る。鉄筋コンクリートセグメント等では蒸気養生後水中養生やラップによる封緘養生を行うことで耐久性を確保している場合がある。

## 6. コンクリート工場製品への利用

蒸気養生を行うコンクリート工場製品は種類が多く、製造条件、要求性能、寸法等が異なるため、その分類は困難であるが、高炉スラグ微粉末の種類とスラグ置換率に着目すると概ね表1のように整理される。高炉スラグ微粉末は多くのコンクリート工場製品で利用されており、その主な目的は塩害抵抗性や水密性の改善、アルカリシリカ反応の抑制、高流動コンクリート化である。その他にも、製品の

表1 高炉スラグ微粉末の工場製品への適用例（蒸気養生コンクリート）  
Examples showing the use of slag to concrete products

Product classification	Cement type	Manufacture cycle (cycle/day)	Slag classification	Slag replacement (%)	Main purpose	Concrete products
Precast concrete	Ordinary portland cement	1	Grade 4000	20 - 50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improve fluidity</li> <li>• Salt damage countermeasure</li> <li>• Water-tightness (restraint of alkali silica reaction)</li> </ul>	Concrete block Precast side ditch Box calvert
		1.5 - 2		- 20		
				Grade 6000		
Precast concrete (large size)	Ordinary portland cement	1	Grade 3000 Grade 4000	20 - 50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salt damage countermeasure</li> <li>• Water-tightness (restraint of alkali silica reaction)</li> <li>• (restraint of temperature rise)</li> </ul>	Concrete segment Box calvert
Prestressed concrete	High-early strength portland cement	1	Grade 6000	20 - 50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salt damage countermeasure</li> <li>• Water-tightness (restraint of alkali silica reaction)</li> </ul>	Prestressed concrete girder Prestressed concrete slab

Attention) Restraint of alkali silica reaction : Slag replacement ratio  $\geq 50\%$

Restraint of temperature rise : Slag replacement ratio  $\geq 50\%$

エフロレッセンス低減や色調調整、耐火性の向上<sup>5)</sup>などを目的に使用されることもある。

各工場製品について、表1に示す高炉スラグ微粉末の種類とスラグ置換率で用いれば、コンクリートの配合（水結合材比など）を大きく変更することなく、水密性、遮塩性等の改善が図れる。

## 7. おわりに

高炉スラグ微粉末を使用した蒸気養生コンクリートの強度特性、水密性、遮塩性についてまとめると以下のとおりである。

- (1) スラグ置換率 50%の場合、1サイクル/日のコンクリート工場製品は高炉スラグ微粉末 4000 で、1.5 サイクル/日以上製品や PC 製品は高炉スラグ微粉末 6000 を使用することで、水結合材比を大きく変更することなく、必要な強度を確保することができる。
- (2) 高炉スラグ微粉末を使用した蒸気養生コンクリートの圧縮強度と引張強度や曲げ強度の関係は、通常のコンクリートと変わらず、コンクリート標準示方書〔設計編〕の式で評価できる。
- (3) 水結合材比の低減による水密性改善に比べて、高炉スラグ微粉末による水の拡散係数の改善効果は大きく、最高温度 50℃×2h、6.5h 脱型の場合、スラグ置換率を 20% とすることで拡散係数は約 1/10 となった。
- (4) 蒸気養生条件や脱型時間に関わらず、高炉スラグ微粉末を使用することで塩化物イオンの拡散係数は小さくなる。最高温度 50℃×2h、15h 脱型の場合、蒸気養生後に封緘養生を行うことで、コンクリート標準示方書〔設計編〕の式から求めた塩化物イオンの拡散係数とほぼ同じ値となった。
- (5) スラグ置換率に関わらず、蒸気養生時の最高温度をで

きるだけ低くし脱型時間を延長するほど、材齢 14 日、28 日の圧縮強度は増加し、水密性、遮塩性は向上する。

## 参考文献

- 1) 長尾之彦：高炉スラグ微粉末によるコンクリートの CO<sub>2</sub> 削減効果について、コンクリート工学、48 (9)、62-65 (2010)
- 2) 伊代田岳史 ほか：高炉コンクリートの耐久性における養生敏感性、コンクリート工学年次論文集、30 (1)、111-116 (2008)
- 3) 土木学会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕、1996
- 4) 檀康弘 ほか：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性、セメント・コンクリート論文集、No. 45、221-227 (1991)
- 5) 土木学会 混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会（333 委員会）：コンクリート技術シリーズ 89、No. 2、7-15 (2010)



長尾之彦 Yukihiko NAGAO  
エスメント関東(株) 営業部  
技術サービス室 室長  
東京都中央区新川1-16-14 〒104-0033



鈴木孝治 Koji SUZUKI  
エスメント関東(株) 営業部  
技術サービス室