

# 論文 カルシウム溶脱したペースト硬化体の耐摩耗性

渡嘉敷 勝<sup>\*1</sup>・森 充広<sup>\*2</sup>・中矢 哲郎<sup>\*3</sup>・森 丈久<sup>\*4</sup>

**要旨：**電氣的促進法でカルシウムを溶脱した水セメント比 40, 50, 60% のペースト硬化体に水噴流摩耗試験を適用し、耐摩耗性の変化について検討した。その結果、(1)カルシウム溶脱領域は未溶脱領域に比べて最大 19.4~27.6 倍の摩耗速度であり、耐摩耗性が極端に低下していること、(2)溶脱領域において表層から深くなるにしたがい摩耗速度は低下し、溶脱領域と未溶脱領域の境界付近に最も摩耗速度の小さな領域が存在すること、が明らかとなった。また、水噴流摩耗試験はカルシウム溶脱領域の力学的性質の変化を測定する手法の一つとしての有用性が示された。

**キーワード：**カルシウム, 溶脱, 耐摩耗性, 水噴流, ビッカース硬さ

## 1. はじめに

農業用水路等の農業水利施設においては、長期間にわたる水との接触により、コンクリート部材のカルシウム（以下、Ca）溶脱が進行し、コンクリート表層が変質していることが報告されている<sup>1), 2)</sup>。表層の変質がもたらす水和組織の脆弱化は、摩耗の促進や、補修工法において材料が要求される付着強度の低下などの問題の主要因となっている可能性がある。既存の農業水利施設ストックが有する性能を今後も持続的に維持していくためのストックマネジメントの取り組みにおいては、Ca 溶脱が農業水利施設の劣化に及ぼす影響を評価することが必要となる。

コンクリート構造物からの Ca 溶脱については、ダム<sup>3), 4)</sup>、導水路<sup>5)</sup>、水道施設<sup>6)</sup>などの水と接触する構造物を主として多数の研究<sup>7)</sup>がなされているが、Ca 溶脱が力学的性質に与える影響に関する研究は少ない。また、これまで力学的性質として研究されてきたのはビッカース硬さ<sup>8), 9), 10)</sup>に関するものが大部分であり、耐摩耗性の評価はなされていない。そのため、農業用水路等の流水に接触している構造物において進行すると考えられる Ca 溶脱と摩耗の複合劣化の現象<sup>1), 2), 11)</sup>については未だ解明されていない。

本研究では、農業用水路等で生じていると推測される Ca 溶脱と摩耗との複合劣化の現象把握を目的として、Ca 溶脱したペースト硬化体の耐摩耗性の低下について把握するとともに、摩耗促進試験を用いた Ca 溶脱領域の力学的性質の変化を測定する手法について検討した。

## 2. 試験方法および分析

本研究では、所定の期間養生した試験体を電氣的促進

法で Ca 溶脱させ、その試験体に対して摩耗促進試験を実施した。

### 2.1 試験体

試験体は、普通ポルトランドセメントを用いたペースト硬化体とし、水セメント比は、40, 50, 60% の 3 種の配合とした。試験体は、内寸法 70×70×20 mm の型枠に打設し、材齢 1 日で脱型した後に 20℃ で水中養生し、材齢 28 日で溶脱促進試験を開始した。

### 2.2 溶脱促進試験

電氣的促進法である溶脱促進試験の概要を図-1 に示す。装置は、水槽、水槽内に試験体を設置するための仕切り板、ステンレスメッシュ電極、定電圧電源装置およびイオン交換水から構成される。仕切り板には、9 箇所の貫通孔 (72×72 mm) があり、その中に試験体を 70×70 mm の型枠面が Ca 溶脱面となるように非導電性のシリコーンで設置した。水槽内をイオン交換水で満たし、電極間に定電圧を作用させて Ca 溶脱を促進させる。

定電圧は 60 V とし、電極間で 0.273 V/mm の電位勾配

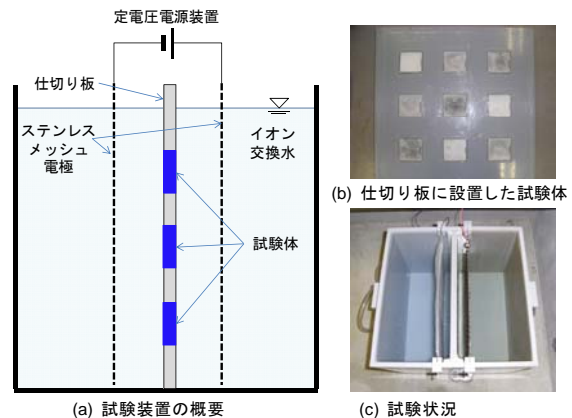


図-1 溶脱促進試験の概要

\*1 農研機構 農村工学研究所 施設資源部 水利施設機能研究室 主任研究員 園修 (正会員)

\*2 農研機構 農村工学研究所 施設資源部 水利施設機能研究室 主任研究員 農博 (正会員)

\*3 農研機構 総合企画調整部 研究調査チーム 主任研究員 農博

\*4 農研機構 農村工学研究所 農村総合研究部 地域資源保全管理研究チーム 上席研究員 (正会員)

とした。試験時間は28日とし、1週間に1回を目処にイオン交換水を全量交換した。

### 2.3 摩耗促進試験

28日の溶脱促進試験を終了した試験体を水噴流摩耗試験機<sup>12)</sup>(図-2)により、摩耗促進試験を実施した。なお、比較のため、打設後56日水中養生した未溶脱の各水セメント比の試験体も同時に試験した。本試験機は、農業用水路等の流水と接する構造部材の摩耗を促進模擬する目的で開発された試験機で、試験体を取り付ける本体と水噴流を発生させる吐出装置により構成される。本体は、試験体(296×142×60mm、または、専用治具にて70×70×20mm)6個を設置可能な回転ドラムとドラムを回転させる駆動モーターで構成される。駆動モーターの回転を制御することにより、ドラムを一定速度で回転させることが可能である。吐出装置は、プランジヤポンプ、耐圧ホース、ノズルより構成される。吐出装置の使用液体は水道水で、プランジヤポンプにより加圧された後、耐圧ホースを経て本体の回転ドラム中心部に設置されたノズルより試験体に噴射される。水噴流は、扇形に広がり、試験体表面に衝突する。吐出圧力は10MPaとし、試験時間は102時間とした。

試験体の摩耗状況と計測および試験片採取位置を図-3に示す。摩耗量は、レーザー変位計(KEYENCE LK-500、分解能10μm)により試験体の摩耗深さを計測した。計測は、累積試験時間で、0、0.17、0.33、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、5、10、20、40、60、80、102時間の計18回実施した。試験開始後は、上述の累積試験時間において試験を停止し、試験体を試験機から取り外して計測した。試験体正面の両側には、水噴流の衝突しない幅10mm程度の領域(以下、無摩耗領域)が設定されており、この領域において摩耗は進行しない。この摩耗進行の無い試験体両側の表面を直線で結んで基準位置とし、そこから摩耗面までの距離を摩耗深さとした。摩耗深さは、試験体正面の中心部40mm四方を対象として、5mm間隔で9本の走査ラインを設定し、各走査ライン上では、1mm間隔で41点計測した。そして、369点(41点×9本)の計測値の平均値を各累積試験時間における平均摩耗深さとした。

### 2.4 元素分析

試験体の元素分析は、エネルギー分散型走査型電子顕微鏡(SEM-EDS)にて分析した。使用した機器は、日本電子JSM-5600LVおよびJED-2200である。

水噴流摩耗試験を終了した試験体において、無摩耗領域から試験片(70×20×5mm)を切り出し、それをさらに切断してSEM-EDS用試験片(20×20×5mm程度)を作製した。分析面には前処理として金を蒸着した。分析は、試験体の二次元的な元素分布を把握するため面分析

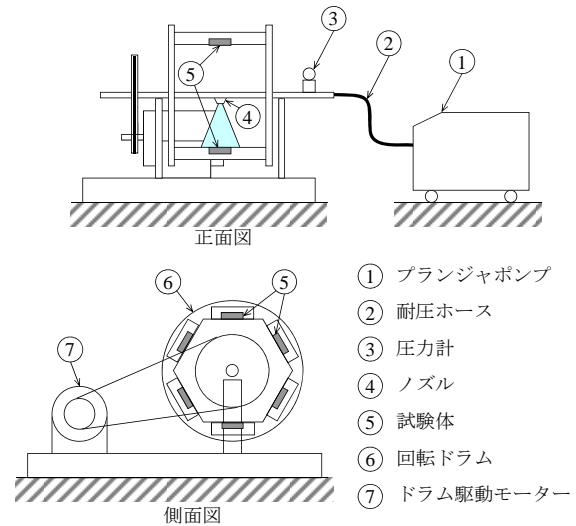


図-2 水噴流摩耗試験機の概要

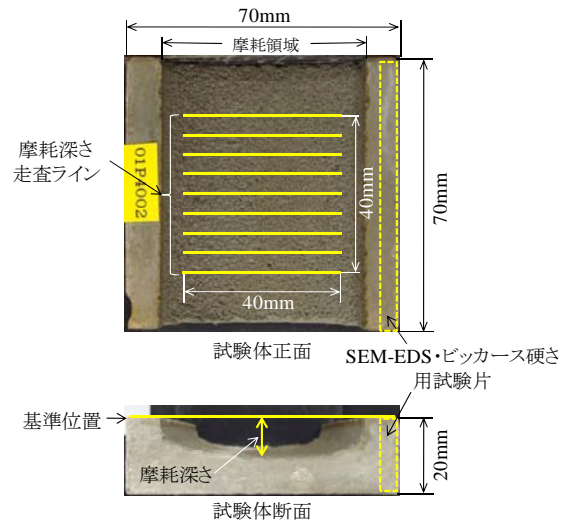


図-3 試験体の摩耗状況と計測および試験片採取位置

を実施した。面分析は、試験片の溶脱深さ方向に約3.6mm、深さ方向と垂直方向(以下、表面方向)に約2.8mmの矩形領域を分析対象とした。分析は、Ca、Si、Sなど14種の元素を選定して実施した。

### 2.5 ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さは、微小硬度計(島津微小硬度計M型)を用いて測定した。試験力は2.942N、試験力の保持時間は15秒間とした。ビッカース硬さの算出は次式による。

$$HV = 0.1891 F/d^2 \quad (1)$$

ここに、HV：ビッカース硬さ、F：試験力(N)、d：くぼみの対角線長さの平均値(mm)である。

試験は、水噴流摩耗試験を終了した試験体から切り出されたSEM-EDS用試験片の残りを試験片とし、溶脱深さ方向の断面を研磨した後、溶脱表面から1、2、3、4、5、7、10mmにおいてビッカース硬さを各10点計測し

た。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 摩耗特性

各水セメント比の溶脱試験体と未溶脱試験体の試験時間と平均摩耗深さとの関係を図-4に示す。この図より、いずれの水セメント比においても溶脱試験体は、摩耗試験初期の0.17~2時間において、急激に摩耗深さが増大し、その後は摩耗深さの増大は漸次低減し、2~4時間以降は直線的に摩耗深さが増加することが明らかとなった。また、摩耗初期の摩耗深さの増大の程度は、水セメント比により相違し、水セメント比が大きい程その程度が大きかった。これに対して、未溶脱試験体においては、摩耗初期から一貫してほぼ直線的な増加傾向を示した。また、試験時間10時間以降の各水セメント比の溶脱試験体と未溶脱試験体との摩耗深さの増加率（図中の直線の勾配で摩耗速度を表す）は、ほぼ同程度となっていた。

摩耗深さと摩耗速度との関係を図-5に示す。この図より、各溶脱試験体の摩耗速度は表面付近において大きく、摩耗深さが深くなる程、摩耗速度は急激に低下し、約2~3mm以深はほぼ一定となることが示された。また、溶脱試験体の3mm以深においては、未溶脱試験体との摩耗速度が同程度であった。

図-6に各溶脱試験体の3mm以深の摩耗速度の平均値を基準とした時の各摩耗深さにおける摩耗速度比を示す。水セメント比40, 50, 60%の各試験体の表層付近の摩耗速度比は、各々19.4倍, 20.1倍, 27.6倍となり、3mm以深に比べてかなり大きな摩耗速度であることが示された。しかし、摩耗深さが深くなるにしたがい、摩耗速度比も低下し、3mm深付近で約1倍となった。

以上の結果より、溶脱試験体においては表面から深さ3mm程度に耐摩耗性の異なる領域の境界があり、未溶脱試験体と比較した場合、3mm以浅では耐摩耗性が低く、3mm以深では同等の耐摩耗性を有していることが示された。このことから、溶脱試験により試験体表層部3mm以浅が脆弱化した構造となり力学的性質が変化し、耐摩耗性の低下を生じさせたと推測された。また、耐摩耗性低下の程度が表面付近で摩耗速度比19.4~27.6倍程度と極端に低下しているものの、深くなるにしたがい摩耗速度比も小さくなることから、耐摩耗性低下の領域においても脆弱構造は一樣ではなく、深さ方向に変化していることが示唆された。

なお、この耐摩耗性低下領域においては、摩耗促進試験の計測時間の間隔を小さくすることで、耐摩耗性のより詳細な深さ方向プロファイルが得られる可能性を示しており、本研究で用いた水噴流摩耗試験が力学的性質

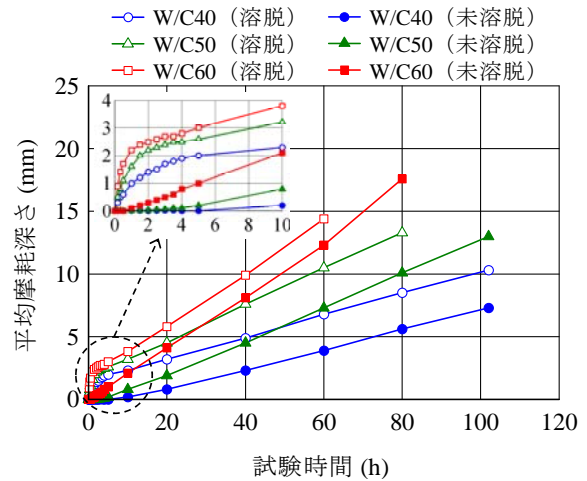


図-4 試験時間と平均摩耗深さとの関係  
(左上図は、試験時間10時間までの拡大表示)

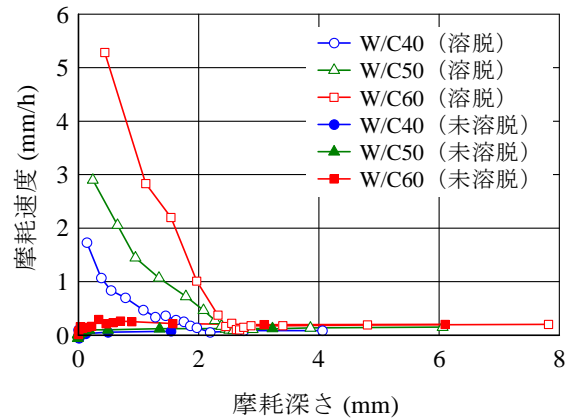


図-5 摩耗深さと摩耗速度との関係

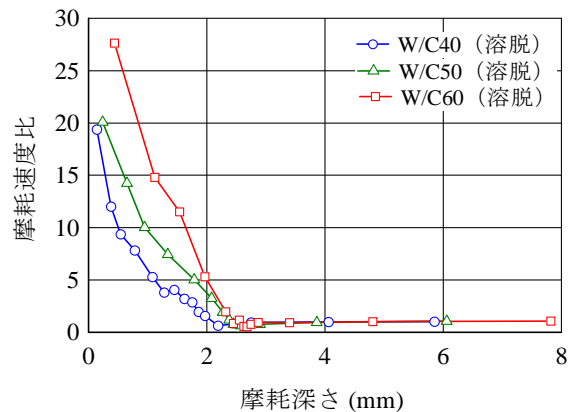


図-6 摩耗深さと摩耗速度比との関係

の変化を測定する一つの手法として有用であると判断された。

#### 3.2 元素分析

##### (1) Ca 溶脱領域

SEM-EDSによる面分析の結果であるCa, Siの特性X線強度分布を図-7に示す。この図より、いずれの水セメント比においても表層から2mm程度付近にCa強度の相違する領域の明瞭な境界が存在することが判明した。



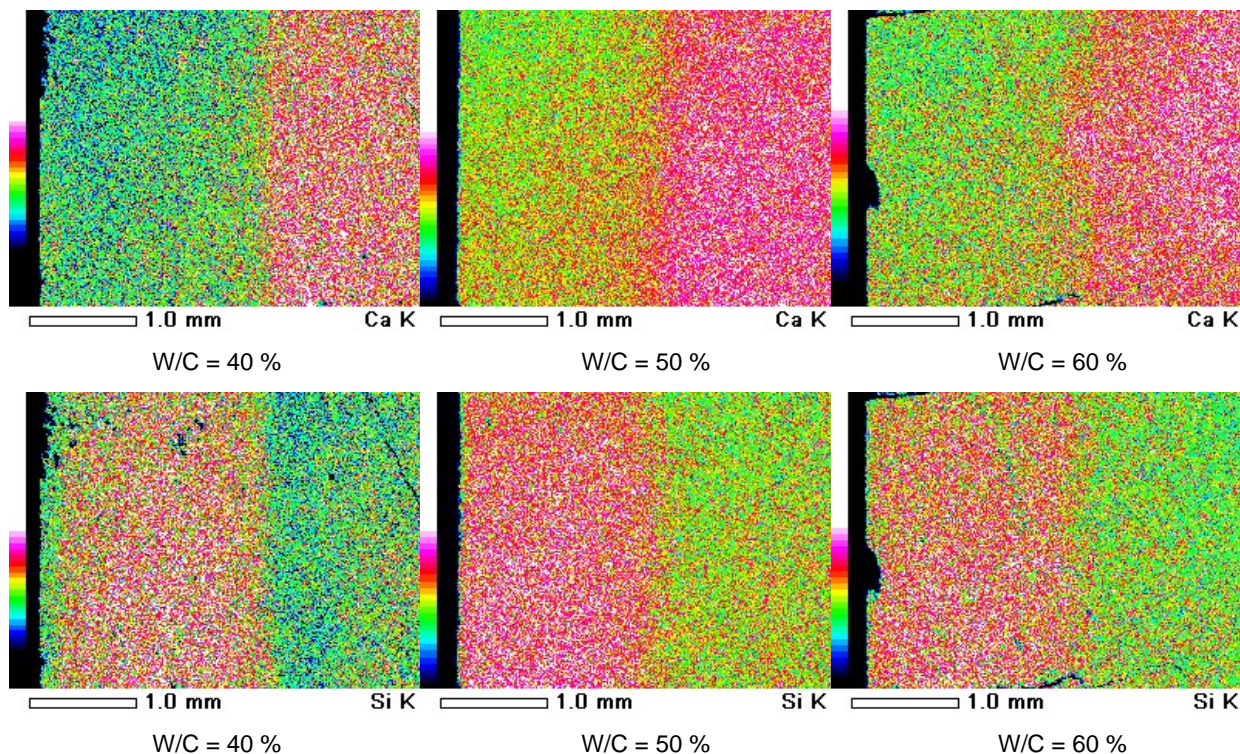


図-7 溶脱試験体における Ca, Si の特性 X 線強度(cps)分布  
 (図中の左辺が溶脱表面で、右辺側に向けて深さ方向となる。各図の左側カラーバーは上部ほど高強度を示し、各元素の濃度が高いことを表す。元素記号側の K は特性 X 線の K 系列を示す。)

その境界以浅では Ca 強度が低く、境界以深では Ca 強度が高い。Ca 強度の低い領域は、溶脱試験において Ca が溶脱した領域と判断された。ただし、図-6 に見られたように Ca 溶脱領域内における耐摩耗性は深さ方向に一樣ではなく、相違していると考えられるが、図-7 の Ca 強度分布からは化学的変質の明確な相違は読み取れなかった。このためには、Ca/Si モル比などの定量的な指標を求める必要があると考えられた。

(2) Si の分布

図-7 における Si の特性 X 線強度分布は、Ca とほぼ対称的な様相を呈した。つまり、Ca の強度が低い領域においては Si の強度が高く、逆に、Ca の強度が高い領域では Si の強度が低くなった。このような Si の分布が生じた理由については、不明である。今後、X 線回折分析等を用いて、同領域の Si 分布の発生メカニズムについて解明する必要がある。

(3) 変質深さ

表-1 に面分析および摩耗速度比から推定した変質深さを示す。面分析では、図-7 の Ca 強度分布を基に強度の境界を目視で選定し、SEM-EDS でその距離を計測した。また、図-6 の摩耗速度比では、速度比が初めて 1 となる位置を補間して変質深さとした。摩耗速度比から求めた推定変質深さは面分析から求めた推定変質深さ

表-1 各試験体の推定変質深さ

推定基データ	推定変質深さ (mm)		
	W/C40	W/C50	W/C60
面分析 (Ca 指標)	2.06	1.93	1.86
摩耗速度比	2.10	2.41	2.43

を若干上回っていたもののほぼ同等と判断した。このため、摩耗速度比の大きな領域は、Ca 溶脱による脆弱化した領域であると判断された。なお、推定された変質深さは、各水セメント比で同程度であり、水セメント比の相違による溶脱領域深さの傾向は見られなかった。

3.3 ビッカース硬さ

各溶脱試験体における深さ方向のビッカース硬さを図-8 に示す。水セメント比 40%および 50%については、表面からの深さ 3 mm および 2 mm においてビッカース硬さのピークを有し、ピークから表層側および深さ方向側にビッカース硬さが小さくなる形状を示している。水セメント比 60%についてはこれらと若干異なり、同じように表面から 3 mm にピークを有し、表層側および深さ方向側にビッカース硬さが小さくなるものの、途中で大きくなる形状が示されている。比較のために、図-6 の摩耗速度比の最小点付近の拡大図を図-9 に示す。摩耗深さ 2.2~2.7 mm 付近において、未溶脱領域よりも摩耗

速度比が小さくなっており、耐摩耗性の高い領域が存在すると思われる。これらの結果より、溶脱領域と未溶脱領域との境界付近において力学的性質の特異な領域が存在する可能性が示唆された。

#### 4. まとめ

本研究では、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 40, 50, 60% のペースト硬化体に対して電氣的促進法により Ca を溶脱促進した後に水噴流摩耗試験により摩耗を促進した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) Ca 溶脱試験体の表層付近の摩耗速度は、未溶脱領域の最大 19.4~27.6 倍の摩耗速度であり、耐摩耗性の低下が著しい。
- (2) 摩耗速度の大きな領域は、Ca 溶脱領域とほぼ一致し、Ca 溶脱による表層の脆弱化が原因と考えられる。
- (3) 水噴流摩耗試験は、Ca 溶脱領域の力学的性質の変化を測定する一つの手法として有用である。
- (4) 溶脱領域と未溶脱領域との境界付近において力学的性質の特異な領域が存在する可能性が示唆される。

今後は、深さ方向の Ca/Si モル比の深さ方向の変化を求めると化学的変質の程度を定量的に把握し、水噴流摩耗試験における摩耗速度と化学的変質との相関を明らかにすることが課題である。また、実構造物のコアを用いた水噴流摩耗試験により、試験の適用性についても検討する。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、(独)国際農林水産業研究センターの八田珠郎博士および根本清子氏には SEM-EDS および微小硬度計を用いた分析の際に多大なご協力をいただきました。ここに記して深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 石神暁郎, 森充広, 渡嘉敷勝, 増川晋: 農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.805-810, 2005.7
- 2) 森充広, 渡嘉敷勝, 山崎大輔, 加藤智丈: 長期供用された農業用水路のコンクリート通水表面の変質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.919-924, 2009.7
- 3) 安田和弘, 渡邊賢三, 大野俊夫, 横関康祐: 約 60 年経過したダムコンクリートの溶出挙動評価, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.570-571, 2001.10
- 4) 内田善久, 蓮本清二, 橋本淳, 新村亮: コンクリートダム着岩部の経年劣化に関する研究, 第 36 回ダ

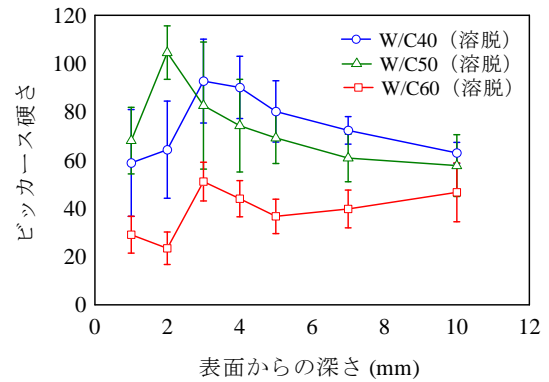


図-8 ビッカース硬さ

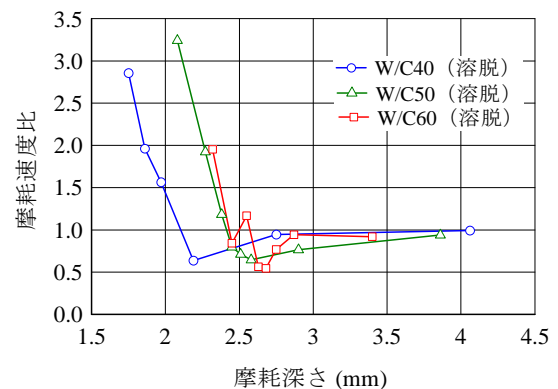


図-9 摩耗速度比の最小点付近

ム技術講演討論会テキスト, pp.111-120, 2004.3

- 5) 出口朗, 増田良一, 斉藤裕司: 約 80 年間水と接していたコンクリートの変質状態, Cement Science and Concrete Technology, No.54, pp.174-179, 2000
- 6) 眞嶋光保, 野田純嗣, 木原義孝, 宮本浩治: 水道施設におけるコンクリートの劣化現象, 材料, Vol.40, No.456, pp.29-35, 1991.9
- 7) コンクリート委員会化学的侵食・溶脱研究小委員会: コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状, 2003
- 8) 大脇英司, 宇治公隆, 坂井悦郎, 大門正機: コンクリート構造物の耐久性評価へのビッカース硬さ測定法の応用, セメント・コンクリート, No.638, pp.36-41, 2000.4
- 9) 大即信明, 皆川浩, 宮里心一, 西田孝弘: 100 年にわたるコンクリートのカルシウム溶出による変質の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.676, V-51, pp.41-49, 2001.5
- 10) 横関康祐, 渡邊賢三, 古澤靖彦, 大門正機, 大即信明, 久田真: カルシウムイオンの溶出に伴うコンクリートの変質に関する実態調査と解析的評価, 土木学会論文集, No.697, V-54, pp.51-64, 2002.2
- 11) 古澤靖彦: カルシウムの溶出によるコンクリート劣

化とモデル化に関する研究動向, コンクリート工学,  
Vol.35, No.12, pp.29-32, 1997.12

12) 渡嘉敷勝, 森充広, 中矢哲郎, 森丈久: 水流摩耗試

験における吐出圧力および回転速度が摩耗性状に  
及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30,  
No.1, 2008.7