

## 論文 コンクリートの炭酸化による耐摩耗性向上に関する研究

取達剛<sup>\*1</sup>・渡邊賢三<sup>\*2</sup>・横関康祐<sup>\*3</sup>・盛岡実<sup>\*4</sup>

**要旨**：著者らはこれまでに、 $\gamma$ -2CaO $\cdot$ SiO<sub>2</sub> (以下、 $\gamma$  C<sub>2</sub>S) を主成分とする特殊混和材を混入したコンクリートを強制的に炭酸化させることによって表層部が緻密化し、長期にわたって物質透過性および溶脱抵抗性に優れるコンクリートを製造可能であることを示した。本稿では、炭酸化による表層の緻密化に着目し、炭酸化させたコンクリートの耐摩耗性について検討を行った。その結果、炭酸化させたコンクリートは他のコンクリートに比べて耐摩耗性が向上することを実験的に確認した。また、耐摩耗性向上のメカニズムについて考察を行い、炭酸化に伴う表層の緻密化、および溶脱抵抗性の向上が耐摩耗性向上の主な要因となる可能性を示した。

**キーワード**：炭酸化, 耐摩耗性, 溶脱, 空隙率

## 1. はじめに

海岸・河川の護岸およびそれに隣接する構造物、ダムなどの水理構造物では、波浪や流水、砂礫や岩石により激しい摩耗を受ける。コンクリートの摩耗については、海や河川に存在する砂利によるすり磨き作用、波浪に伴う砂利の衝撃作用がその主たるメカニズムであると考えられている<sup>1)</sup>。一方、最近の研究では、上記のような物理的な作用だけでなく、流水に曝されることによるコンクリートの化学的変質、特に溶脱が摩耗の発生原因になる可能性が示されている<sup>2)</sup>。摩耗によってコンクリート表面が削られると、構造物の耐久性上必要なかぶりを満足することができなくなり、構造物が早期に劣化する可能性がある。したがって、摩耗対策は構造物にとって重要な項目であると考えられる。

実構造物における摩耗対策としては、張り石工法や鉄板・ステンレス板の張付け、高強度コンクリートや繊維補強コンクリートの適用、ポリウレタン等による被覆などが考えられる。しかしながら、いずれも恒久的な対策とは言い難く、短い周期で補修しているのが現状である。

一方、これまでに著者らは、 $\gamma$  C<sub>2</sub>S を主成分とする特殊混和材を混入したコンクリートを強制的に炭酸化させることによって表層部が緻密化し、長期にわたって耐久性に優れるコンクリートを製造可能であることを示している<sup>3)</sup>。この炭酸化コンクリート(以下、HDC)は、表面の緻密化だけでなく、炭酸化によって強度および溶脱抵抗性が向上することから、水理構造物の摩耗対策に効果が期待できるものと考えられる。以上のことから本検討では、HDCの摩耗試験を行い、耐摩耗性について検討を行った。また、HDCの耐摩耗性に関するメカニズムに

ついて考察した。

## 2. コンクリートの耐摩耗性について

## 2.1 コンクリートの摩耗のメカニズム

一般的なコンクリートの摩耗の主なメカニズムとしては、(1)モルタル部分のすりへりによる粗骨材の露出、(2)粗骨材の破壊または抜け出しによる空洞化、であり、これが繰り返されることによって劣化が進行する<sup>1)</sup>。また、露出する粗骨材の大きさによって表面の凹凸が不均一になるため、摩耗が加速的に進行する場合もある。さらに、物理的な摩耗で表面に凸凹ができると、コンクリートの表面積が大きくなり、流水のある場合には化学的な溶脱も進行しやすくなるものと考えられる。すなわち、流水環境での摩耗は、物理的な作用と化学的な溶脱が複雑にからみあって進行すると考えられる。

## 2.2 コンクリートの耐摩耗性向上の方法

コンクリートの耐摩耗性を向上させるための主な方法としては、(1)モルタル部分の強度増進、(2)強度の高い骨材の選定、(3)適切な粗骨材の最大寸法の設定、(4)適切な細骨材率の設定、(5)溶脱抵抗性の高い材料の選定などが挙げられる。HDCは強制炭酸化によって、上記のうち(1)にあたる組織の緻密化、および(5)にあたる溶脱抵抗性の向上がこれまでの試験結果において確認されている<sup>4)</sup>。そこで、本検討におけるHDCの耐摩耗性確認では、粗骨材最大寸法および炭酸化養生日数をパラメータとした検討を行うこととした。

## 3. 実験方法

## 3.1 実験概要

炭酸化させたコンクリートの耐摩耗性を確認するた

\*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木構造・材料グループ 研究員 工修 (正会員)

\*2 鹿島建設(株)北陸支店 北河内ダムJV工事事務所 工事課長代理 (正会員)

\*3 鹿島建設(株)技術研究所 土木構造・材料グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

\*4 電気化学工業(株)無機材料研究センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

表-1 検討ケース

| ケース | 配合                        | Gmax (mm) | 摘要                 |
|-----|---------------------------|-----------|--------------------|
| 1   | N45                       | 20        | 普通コンクリート(W/C=45%)  |
| 2   | N30                       | 20        | 高強度コンクリート(W/C=30%) |
| 3   | HDC(G10-28d) <sup>※</sup> | 10        | 提案配合               |
| 4   | HDC(G20-28d) <sup>※</sup> | 20        | Gmaxを大きく           |
| 5   | HDC(G10-7d) <sup>※</sup>  | 10        | 炭酸化養生を短く(7日)       |

※Gの直後の数字(10, 20)は粗骨材最大寸法  
dの直前の数字(7, 28)は炭酸化養生日数を表す

めに摩耗試験を行った。また、コンクリート表層部の空隙構造および強度と耐摩耗性の相関性、炭酸化させることによる表層部での空隙構造の変化について検討した。

### 3.2 検討ケース

本検討における検討ケースを表-1に示す。検討ケースは、W/C=45%の普通コンクリート、W/C=30%の高強度

コンクリート、著者らの提案する炭酸化コンクリートHDC、HDCで粗骨材の最大寸法を20mmにしたもの、炭酸化養生日数を短くしたものについて検討を行うこととした。

### 3.3 使用材料および配合

使用材料を表-2に、コンクリートの配合を表-3に示す。ケース1およびケース2は、粗骨材量を一定にした。また、ケース3~ケース5の結合材Bは、過去の検討結果<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>から最適と考えられた、ポルトランドセメントと複数のポズラン材を予め混合したプレミックス結合材を用いた。

### 3.4 養生方法

各ケースにおける養生方法を表-5に示す。ケース1およびケース2については28日間標準水中養生とした。ケース3および4については、1日封緘養生のあと1日水中養生し、材齢28日まで温度60℃、湿度50%、CO<sub>2</sub>濃度20%の環境下で促進炭酸化養生を行った。なお、ケース5については、材齢7日まで炭酸化養生後、気中養生とした。

### 3.5 実験項目

#### (1) 摩耗試験

摩耗試験は、写真-1に示す電力中央研究所のO式すりへり試験機を用いて行った。幅15cm×長さ29cm×高さ6cmの供試体6個を、試験面を内側に向けて六角柱の形に組んで、回転ドラムにセットし(写真-1中の黒い太線部分)、内側の中空部にφ22×40mmのPC鋼棒を20個封入して、中心部のパイプより20l/minの水シャワー

表-2 使用材料 (ケース1~ケース5)

| 材料   | 記号              | 概要  |
|------|-----------------|---|
| セメント | OPC             | 普通ポルトランドセメント<br>密度:3.14 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3250cm <sup>2</sup> /g   |
|      | B               | プレミックス結合材<br>密度:2.89 g/cm <sup>3</sup>  |
| 細骨材  | S               | 君津産山砂<br>密度:2.61g/cm <sup>3</sup> , FM:2.73, 実積率:67.9%  |
| 粗骨材  | G               | 青梅産硬質砂岩<br>(Gmax:上段20mm, 下段10mm)<br>圧縮強度:142~269N/mm <sup>2</sup> ※<br>密度:2.66g/cm <sup>3</sup> , FM:6.69, 実積率:63.7%<br>密度:2.66g/cm <sup>3</sup> , FM:6.19, 実積率:60.9% |
|      |                 | 混和材   |
| 混和剤  | Ad              | AE減水剤   |
|      | SP <sub>1</sub> | 高性能AE減水剤  |
|      | SP <sub>2</sub> | 高性能AE減水剤(高強度タイプ)  |

※文献値<sup>5)</sup>

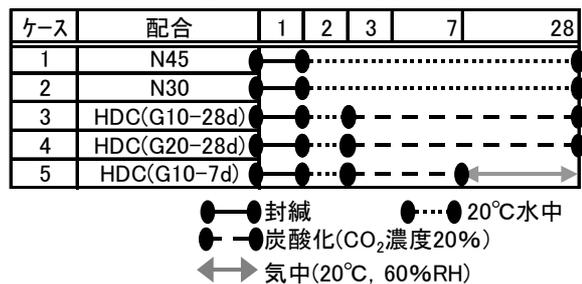
表-3 コンクリートおよびモルタルの配合 (ケース1, 2)

| ケース | Gmax (mm) | スラップ (cm) | 空気量 (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |      |                 |
|-----|-----------|-----------|---------|---------|---------|-------------------------|-----|-----|------|------|-----------------|
|     |           |           |         |         |         | W                       | OPC | S   | G    | Ad   | SP <sub>1</sub> |
| 1   | 20        | 8.0       | 4.5     | 45      | 44      | 165                     | 367 | 774 | 1004 | 0.92 | -               |
| 2   | 20        | 8.0       | 4.5     | 30      | 38.7    | 165                     | 550 | 622 | 1004 | -    | 5.5             |

表-4 コンクリートの配合 (ケース3, 4, 5)

| ケース | Gmax (mm) | スラップ フロー (cm) | 空気量 (%) | W/B (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |                   |     |     |                 |
|-----|-----------|---------------|---------|---------|---------|-------------------------|-----|-------------------|-----|-----|-----------------|
|     |           |               |         |         |         | W                       | B   | γC <sub>2</sub> S | S   | G   | SP <sub>2</sub> |
| 3   | 10        | 65±5          | 4.5     | 30      | 50      | 160                     | 533 | 160               | 723 | 737 | 7.28            |
| 4   | 20        |               |         |         |         |                         |     |                   |     |     |                 |
| 5   | 10        |               |         |         |         |                         |     |                   |     |     |                 |

表-5 各ケースにおける養生方法



を浴びせながら80rpmで回転させた。試験時間は4時間として、試験開始から2時間後および4時間後に重量の減少を測定した。なお、すりへり係数(R)は次式によって算出した。試験数は各配合3体とした。

$$R=(W/\rho)\times 1/A \quad (\text{mm}^3/\text{cm}^2) \quad (1)$$

W: 摩耗重量(g)

ρ: 見かけ密度(g/cm<sup>3</sup>)

A: 摩耗した面積(cm<sup>2</sup>)

#### (2) 圧縮強度

摩耗試験時(材齢28日)にJIS A 1108に従って圧縮強



写真-1 すりへり試験機

度を測定した。

### (3) 炭酸化深さ

ケース 3, 4, 5 について, JIS A 1152 に従って炭酸化深さを測定した。

### (4) 空隙率

各ケースにおいて, 水銀圧入式ポロシメータにより空隙径分布を測定した。測定範囲は 3nm~100 $\mu$ m とした。なお, 測定試料は養生終了後に表層 5mm にてカットし, 粗骨材を取り除いて試験に供した。

### (5) ビッカース硬度

ケース 2(N30), ケース 3 (HDC(G10-28d)) および本研究にて使用した粗骨材(硬質砂岩)のビッカース硬度を測定した。測定には微小硬度計を用い, 測定点数は 40 点とした。ビッカース硬度の測定には四角錐のダイヤモンドビッカース圧子を用い, 作用荷重は試験をもとに, HDC(G10-28d)および N30 は 0.245N, 硬質砂岩は 1.96N とした。ビッカース硬度の算出は次式による。

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

HV: ビッカース硬度(N/mm<sup>2</sup>)

F: 作用荷重(N)

d: くぼみの対角線の長さの平均値 (mm)

また, ケース 3 については, 炭酸化による深さ方向の強度分布を把握する目的で, 深さ方向のビッカース硬度を表層から 1mm, 3mm, 5mm, 7mm, 10mm, 20mm にて各 15 点測定した。

## 4 実験結果

### 4.1 摩耗試験結果

図-1 に, 試験時間とすりへり係数の関係を示す。また, 図-2 には, 図-1 における 4 時間後のすりへり係数を示す。なお, 図-2 には既往の研究<sup>1)</sup>にて得られた圧縮強度 30N/m<sup>2</sup> のコンクリートのすりへり係数も併せて示している。既往の研究<sup>6)</sup>では試験時間とともに粗骨材の露出によって摩耗量が小さくなるとの報告もあるが, 本試験の範囲では, 図-1 に示すように, いずれのケースにおいてもすりへり係数は直線的に増加する結果となった。また, HDC のすりへり係数は他のケースに

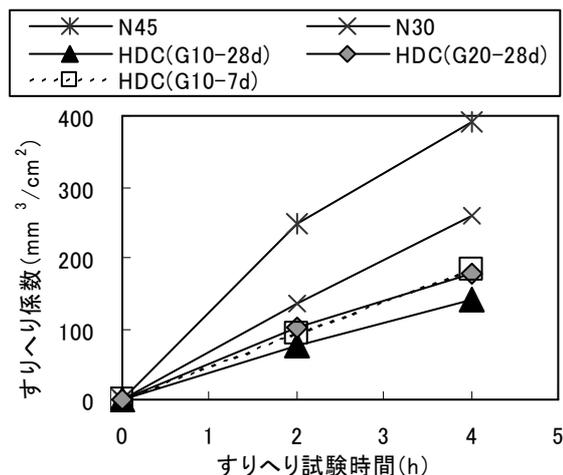


図-1 試験時間とすりへり係数の関係

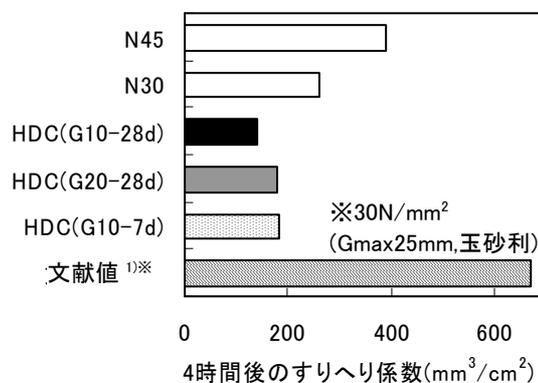
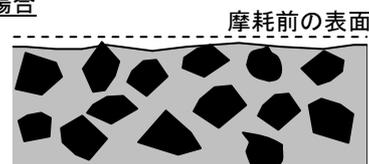
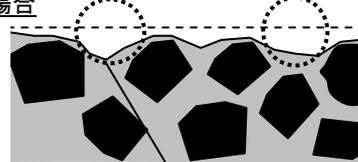


図-2 4時間後のすりへり係数

#### (1) G10 の場合



#### (2) G20 の場合



モルタル部の選択的摩耗

図-3 本試験(粗骨材抜け出し前)におけるコンクリートの摩耗の概念図

比べて低い値となった。これは HDC の炭酸化による緻密化に起因すると考えられる。

また, HDC の中で比較すると, 粗骨材最大寸法の小さい(G10)方が耐摩耗性に優れる結果となった。この理由について以下に考察を示す。

本試験における摩耗の概念図を図-3 に示す。後述するが, 本試験における摩耗深さはおよそ数 mm であり, 表面観察の結果からも粗骨材の抜け出しは見られなか

った。粗骨材の露出する前の段階では、図-3の(2)に示すように、粗骨材最大寸法の大きいG20の方がモルタルが選択的に摩耗したと考えられる。モルタルとペーストの摩耗量を比較した既往の研究<sup>7)</sup>においても同様の傾向が指摘されているが、粗骨材が露出した後は傾向が異なることも示されており、今後検討が必要と考えられる。

次に、摩耗深さについて検討を行った。摩耗深さは、図-4の黒い点線に示す箇所にてすりへり試験後の供試体を短辺方向(図中の黒点線)に8つに切断し、すりへりを受けていない両端面(各10mm)を除いた6つの試験片について、1cmピッチで16点、ノギスを用いて高さ測定を行った。また、すりへりを受けていない両端面の高さ測定を行い、この高さを基準として摩耗深さを算出した。

図-5に各ケースにおける平均摩耗深さの関係を示す。摩耗深さは、図-2に示したすりへり係数と同様、HDCがほかのケースに比べて小さい結果となっており、HDCが高い耐摩耗性を有することが確認された。

また、炭酸化養生日数の短い方が摩耗深さが大きくなった。この理由として、炭酸化養生日数の短いHDC(G10-7d)における炭酸化深さが4.8mm、HDC(G10-28d)における炭酸化深さが5.9mmであったことから、炭酸化養生日数を長くすることによってより内部まで緻密化し、耐摩耗性に優れた結果になったものと推察される。

#### 4.2 耐摩耗性と圧縮強度

既往の文献によると、コンクリートの耐摩耗性はコンクリートの圧縮強度と相関があることが示されている<sup>1)</sup>。そこで図-6に、各ケースにおける圧縮強度とすりへり係数の関係を示す。なお、図-6には既往の研究におけるコンクリートの検討結果<sup>1)</sup>も併せて示す。N45およびN30の圧縮強度とすりへり係数の関係は既往の研究成果と同様の傾向を示した。またHDCについては、既往の研究成果に比べて同一圧縮強度におけるすりへり係数が小さくなっており、図-6に示す点線のグラフと比較すると、例えば圧縮強度24N/mm<sup>2</sup>の玉砂利コンクリートに比べて摩耗量は約1/10となった。そこで、次節以降に、HDCの耐摩耗性向上の要因について考察を行う。

#### 4.3 HDCの耐摩耗性向上の要因

##### (1) 物理的作用に関する考察

##### 1) ビッカース硬度

供試体表面近傍(深さ1mm)におけるN30、HDC(G10-28d)および硬質砂岩(粗骨材)のビッカース硬度の測定結果を図-7に示す。なお、硬質砂岩は研磨して表面部分を測定した結果である。これによると、ビッカース硬度は骨材(硬質砂岩)がもっとも高く、N30やHDCの9倍程度であった。一方、HDCのビッカース硬度はN30と同程度であり、表面のビッカース硬度測定結果からは、HDCの耐摩耗性向上のメカニズムを把握できなかった。

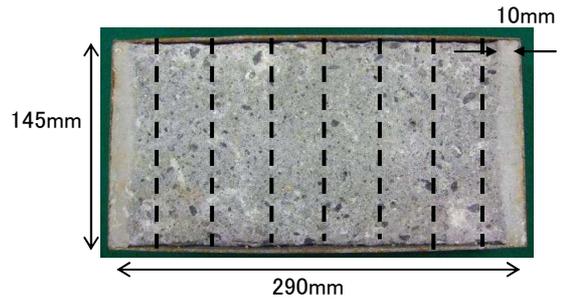


図-4 摩耗深さの計測方法

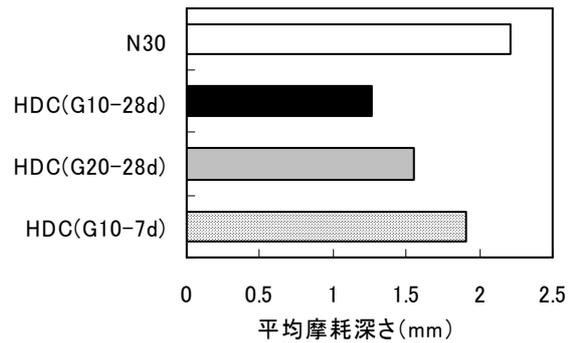


図-5 摩耗深さ測定結果

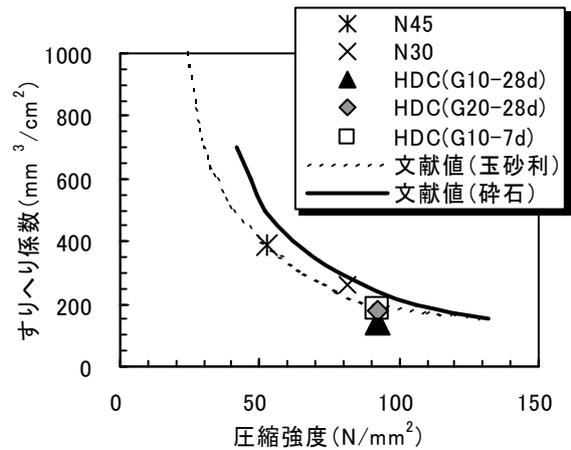


図-6 圧縮強度とすりへり係数

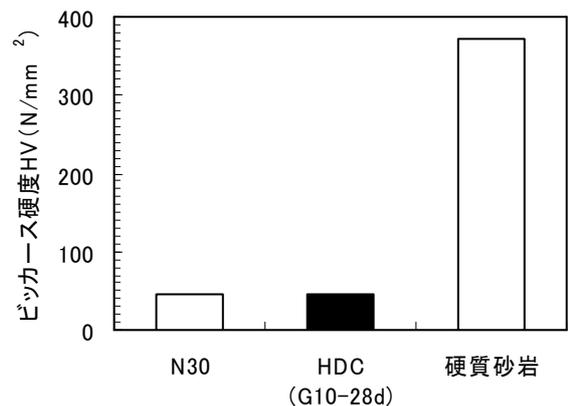


図-7 表面近傍(深さ1mm)のビッカース硬度結果

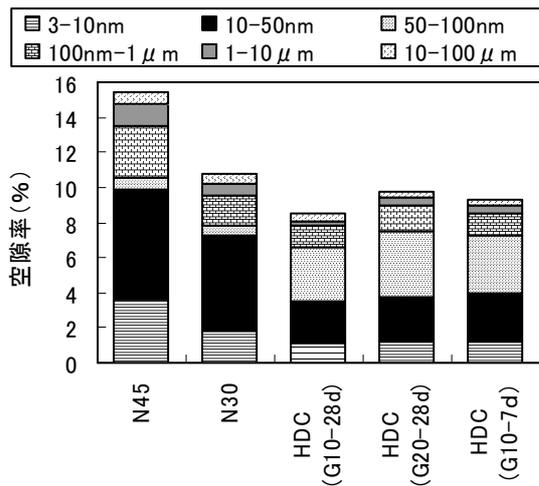


図-8 表層5mmにおける空隙径分布

## 2) 空隙率

各ケースの表層5mmにおける空隙径分布を図-8に示す。HDCの総細孔量はN45やN30に比べて少ないことがわかった。そこで図-9に、各ケースにおける空隙率とすりへり係数の関係を示す。両者には高い相関性が見られ、本試験の範囲(表層数mmまでの摩耗)では、コンクリートの耐摩耗性が粗骨材の最大寸法や単位粗骨材量によらず、モルタル部分の空隙率によって決定されるものと考えられ、炭酸化によって表層の空隙構造が緻密化したHDCは、耐摩耗性が向上したのと考えられる。

以上のように、圧縮強度、ビッカース硬度および空隙率の測定結果とすりへり係数は、異なる傾向を示す結果となった。しかしながら一般には、コンクリートの強度は空隙率と高い相関性があることから、表層部のモルタル部分における硬度分布および空隙率分布について、さらに詳細な検討を行った。

### 2) ビッカース硬度およびごく表層の空隙構造

HDC(G10-28d)における表面からのビッカース硬度分布を図-10に、表面からの空隙率分布を図-11にそれぞれ示す。ここで、空隙率の測定は1mm幅にスライスした供試体を用い、水銀圧入法にて測定した。これによると、HDCは表面よりやや内部において強度が高く、空隙率の小さい領域が見られる。図-11には表層5mmの試料で測定した空隙率も併せて示しているが、深さ3mmにおける空隙率とほぼ一致しており、試験面を型枠面としたため、供試体作製時の乾燥やブリーディング等の影響によってごく表層部においてのみ組織が粗くなったものと考えられ、炭酸化領域において組織が緻密化しているものと考えられる。

以上のことから、HDCの耐摩耗性向上の要因としては、 $\gamma\text{C}_2\text{S}$ を主成分とする特殊混和材を強制炭酸化させることによる緻密化が考えられる。

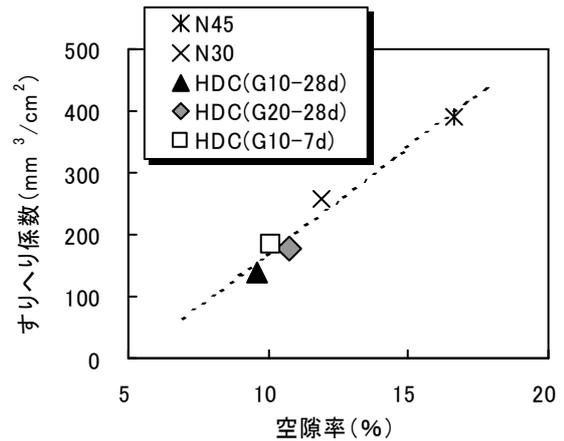


図-9 空隙率とすりへり係数の関係

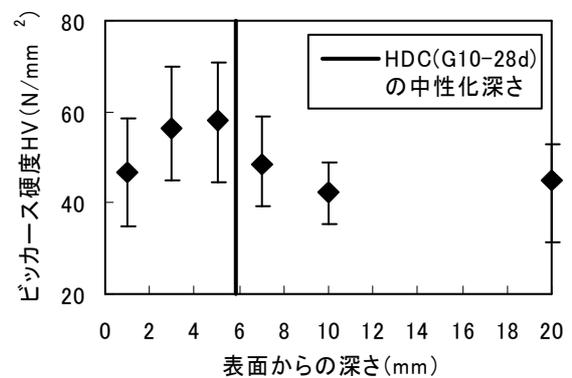


図-10 表面からのビッカース硬度分布 : HDC (G10-28d)

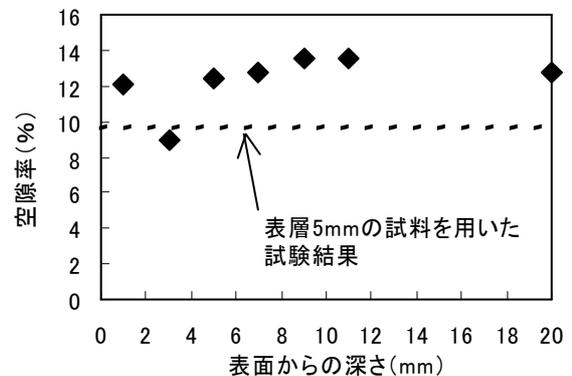


図-11 表面からの空隙率分布 : HDC (G10-28d)

## (2) 化学的作用に関する考察

本検討にて行った摩耗試験は水を流しながらの試験であるため、厳密には表面から溶脱が進行しながらすり磨き作用を受けていると考えられる。そこで、各ケースの溶脱抵抗性を確認するために、モルタルの溶解試験を行った。検討ケースはJISモルタル、HDCのモルタル部分とした。試験方法としては、養生終了後のモルタルを0.15~0.25mmの大きさに破碎、ふるいわけを行い、液固比(試験片に対する作用水の重量比)10~3,000の作用水(イオン交換水)に3ヶ月間浸漬させた。試験終了後

に、平衡水中の Ca イオン濃度を測定した。液固比と平衡水中の Ca 濃度の関係を図-12 に示す。これによると、炭酸化させた HDC は液固比によらず平衡水中の Ca 濃度がほとんど上昇せず、非常に高い溶脱抵抗性を有することがわかる。

農業用水路コンクリートの調査結果<sup>2)</sup>では、圧縮強度 16N/mm<sup>2</sup> のコンクリートの供用 40 年における Ca 溶脱深さは約 15mm であった。Ca 溶脱によって表面付近の強度は低下するため、溶脱は摩耗による劣化を加速させている可能性が高い。前述の図-6 のデータに基づけば、HDC は 16N/mm<sup>2</sup> のコンクリートの 10 倍程度の耐摩耗性が見込める。同試験結果は水を流しながらの摩耗試験であることから、用水路で起こる摩耗を模擬できているものと考えられ、40 年における変質深さは 1.5mm 程度になるものと予想される。したがって、流水による溶脱が起ると考えられる場所に HDC を用いることは、耐摩耗性向上に非常に有効であると考えられる。一方で、ダムの排砂路のように激しい摩耗を受ける場所では、溶脱に比べて衝撃作用やすり磨き作用の方が卓越するものと考えられる。このような場所においても、HDC は耐摩耗性向上に有効であると考えられる。

HDC の耐摩耗性向上のメカニズムとして、空隙率の減少および溶脱抵抗性の向上を挙げたが、実際には空隙径分布なども影響しているものと考えられる。またこれら以外にも、HDC は炭酸化によってセメント硬化体のうちゲル状の C-S-H などが結晶状の CaCO<sub>3</sub> に変化し、これが微細構造としての強度を高めている可能性もあり、今後検討が必要であると考えている。

## 5. まとめ

本検討では、 $\gamma$ -C<sub>2</sub>S を主成分とする特殊混和材を混入し、強制的に炭酸化させたコンクリートのすりへり試験を行い、耐摩耗性について検討を行った。また、炭酸化コンクリート HDC の耐摩耗性に影響を及ぼす要因について考察した。検討結果を以下に示す。

- 1)  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S を主成分とする特殊混和材を混入したコンクリートを強制的に炭酸化させることによって、同一水結合材比のコンクリートに比べて耐摩耗性が著しく向上する。
- 2) HDC の耐摩耗性は本試験の範囲では、粗骨材最大寸法が小さく、炭酸化養生日数の長いほうが高い。
- 3) HDC は炭酸化している領域において強度の高い層が存在する。これは炭酸化養生に伴う組織の緻密化によるものと考えられ、HDC に高い耐摩耗性を付与している。
- 4) 炭酸化養生を施した HDC は溶脱抵抗性が高く、水の作用を受ける状況での耐摩耗性に優れることか

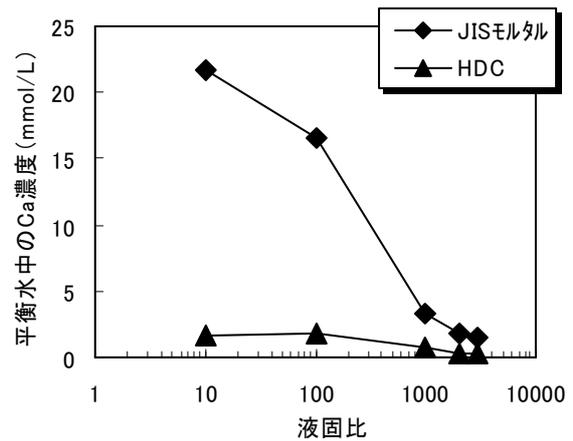


図-12 液固比と平衡水中の Ca 濃度

ら、水理構造物の耐摩耗性向上に有効であると考えられる。

**謝辞：**本研究の遂行に際しまして、電気化学工業(株)の相澤一裕氏ほか関係各位に多大なご協力を頂きました。ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 増田隆, 松永嘉久, 渡邊芳春: 高摩耗性コンクリート, コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.100-104, 1994.7
- 2) 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減少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
- 3) 渡邊賢三, 横関康祐, 坂井悦郎, 大門正機:  $\gamma$ -2CaO・SiO<sub>2</sub>を用いたセメント系材料の炭酸化養生による高耐久化, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.735-740, 2004
- 4) 渡邊賢三, 横関康祐, 芦澤良一, 坂田昇:  $\gamma$ -2CaO・SiO<sub>2</sub>を用いたコンクリートの力学特性と耐久性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.811-816, 2005
- 5) 日本コンクリート工学協会: セメント系材料・骨材研究委員会 報告書, 2005.9
- 6) 武井ほか: 高強度コンクリートの耐摩耗特性に関する一考察 (その1 掃流試験), 土木学会第 47 回年次学術講演論文集, V-161, pp.352-353, 1992 学術講演論文集, V-161, pp.352-353, 1992
- 7) 渡嘉敷勝, 石神暁郎, 森充広, 増川晋: 水流摩耗試験機を用いたモルタルおよびペーストの摩耗試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006