論文　水中環境下のコンクリートならびにモルタルの耐摩耗性について

高野　智宏[*1]・寺田　哲美[*2]・山中　誠[*3]

要旨：近年，水路等で摩耗損傷による表面の粗面化が発生し，流下能力低下をもたらす原因として問題視されている。そこで，普通強度コンクリート，高強度コンクリートならびに超高強度繊維補強モルタルについて流体エロージョン摩耗試験を実施し，耐摩耗性について検討を行った。その結果，普通強度コンクリートの耐流体エロージョン摩耗は粗骨材の最大粒径ならびに細骨材率が大きく影響する結果が，高強度コンクリートならびに超高強度繊維補強モルタルは普通強度コンクリートより耐流体エロージョン摩耗性は高いものの，エフロレッセンスならびに摩耗面近傍の粗骨材の遷移帯などの脆弱部が影響をおよぼす傾向が示された。

キーワード：高強度コンクリート，超高強度繊維補強モルタル，耐摩耗性，エロージョン摩耗，ASTM C1138

1. はじめに

古くから，土木ならびに農業土木の分野で，水路等の整備がコンクリートを用いて行われてきた。近年では整備が進み，維持管理の面で問題が生じてきている。多くは断面の欠損であり，大半が摩耗による水路表面の粗面化で，寒冷地においては凍害と摩耗の複合作用による物が多く見られる。

水路はセメント 2 次製品と現場打ちコンクリートで施工されている。そのため，維持管理を行う上で，損傷した部分はセメント 2 次製品の入れ替え施工，又は断面補修施工が行われている。しかし，入れ替え施工や断面補修施工の場合，費用はもとより，施工期間の制限も多い。また，絶えず水が流れている施工現場では，バイパスを設けたり，水路内の排水を行う必要があり，さらには重機が入れない局所的な施工現場などは容易にこれらの施工を行うことはできない。

そこで安価で短期間に容易に路断面の補修を行うことができる，超高強度繊維補強モルタルパネル（最小厚さ 15mm のセメント 2 次製品パネル）を用いた既存水路の流下能力，また，耐久性を回復させる断面補修工法を開発した。本論文ではその工法で用いる超高強度繊維補強モルタルパネルの耐摩耗性を中心に述べる。

これまでコンクリートの耐摩耗性におよぼす要因に関して，すり磨きならびに衝撃に関する研究が主に多く行われている。すり磨きならびに衝撃作用に起因した摩耗性では一般的に細骨材率を小さくし，粗骨材の占有面積を大きくすることが耐摩耗性改善に寄与すると言われている[1)]。しかし，セメント量が 450kg 以上で，かつ，細骨材率が小さすぎる場合はコンクリートの脆性化が進み，硬く脆くなることから骨材の露出面積が大きくてもすりへり係数が大きくなることが言われている[1)]。この他に，骨材とセメントペーストの付着性を改善することが耐摩耗性改善に寄与すると言われている。これは混和材を用いることで骨材の付着性を改善することが可能だが，さらに混和材の種類によってもすりへり係数の値は変動する。この中でエトリンガイト生成系混和材はシリカフュームならびに高炉水砕スラグ微粉末よりすりへり係数が小さくなる傾向が報告されている[1) 2)]。

一方，水流摩耗ではコンクリート中のカルシウムが溶出し，コンクリート強度が低下し，物理的なすりへり作用の他に，化学的な劣化により耐摩耗性が低下するとの報告もある[3)]。

このことから，コンクリートの摩耗現象は多数の摩耗因子により構成され，さらに複雑なメカニズムを有していると言われており，トライボロジー的な観点より試験方法選択する必要がある[4) 5)]。

2. 摩耗について

摩耗の種類を**表－1** に示す。摩耗は，個体または液体の運動から 6 種に区分される[6)]。しかし，実際の摩耗は，その環境により複雑で，大きく 4 つに区分される摩耗機構が複合されている場合が多い。

本研究では水路環境における摩耗を対象にしている。この場合の摩耗原因は水流中に発生したキャビテーションによる疲れならびに腐食からの摩耗，そして，土砂の流出より起こるアブレッシブからの摩耗の複合が考察できる。よって，表で示す流体エロージョンが適当と考えられる。本報告は摩耗シュミレータによる摩耗現象の再現試験ではなく，流体エロージョン摩耗機構の特性を十分に考慮された試験機によるコンクリートならびにモルタルの摩耗性状について報告する。

*1 共和コンクリート工業（株）技術研究所　主任研究員　工博　（正会員）
*2 共和コンクリート工業（株）技術研究所　主席研究員　（非会員）
*3 共和コンクリート工業（株）技術研究所　研究所所長　（正会員）

表－1 摩耗の種類

互いに作用する要素			個体/個体：金属，ポリマーなど無潤滑または潤滑剤がある場合				個体/液体	個体/(液体+粒子)
運動の種類			すべり	ころがり	衝撃	微振動	流動	流動
摩耗の種類			すべり摩耗	ころがり摩耗	衝撃摩耗	フレッチング摩耗	キャビテーション摩耗	流体エロージョン
摩耗機構	応力の相互作用による	アブレッシブ	○	○	○	○	×	○
		疲れ	○	○	○	○	○	○
	間の応力および相互作用物質	凝着	○	○	○	○	×	×
		腐食	○	○	○	○	○	○

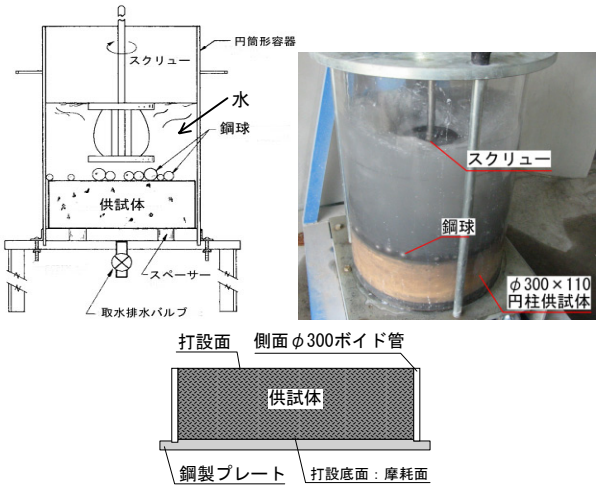
3. 流体エロージョン摩耗試験方法

流体エロージョンにおける試験規格は ASTM でのみ規格化されている。よって，本論文では ASTM C1138 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete（Under water Method） に従った。この試験は水中環境下で鋼球がキャビテーション水流に乗り，転がりながら流れる様を規格化した試験である。

図－1 に試験装置を示す。流体エロージョン摩耗試験は試験装置の底部に ϕ300×110mm の円柱供試体を，摩耗面を上にし設置する。この時，ASTM C1138 ではスクリューの底部と供試体の上面との間隔が 38mm になるように規定している。鋼球は直径 25.3mm を 10 個，19mm を 35 個ならびに 12.6mm のものを 25 個用い，すべての鋼球を供試体の摩耗面に置く。この鋼球は砂利をモデルにしたものである。水はスクリューの上面まで入れ，スクリューの回転速度は 1200±100rpm で回転させることが規定されている。

エロージョン摩耗試験で用いる供試体は試験開始前に十分に吸水させ，表乾にした状態から開始している。

計測は 12 時間毎の表乾質量を計測し，合計試験時間が 72 時間になるまで行う。試験結果のまとめ方に関して，既往の研究では単位面積当たりのすりへられた体積で表す，すりへり係数を取り入れている場合が多いことから [1]，本論文でもすりへり係数を用いて示す。算出式を下記に示す。式（1）により供試体の密度を算出する。この時，すりへり係数のユニットの関係から，密度は g/mm^3 のユニットで計算する。すりへり係数は式（2）を用いて算出する。摩耗面積は供試体の摩耗面の大きさであるため，固定値である。



図－1　エロージョン摩耗試験装置と型枠

$$\rho = \frac{W_d}{W_d - W_W} \times 1000 \quad (1)$$

ρ：供試体密度 (g/mm^3)

W_d：試験前供試体表乾質量 (g)

W_w：試験前供試体水中質量 (g)

$$\gamma = \frac{W_d - W_{step}}{\rho \times A} \quad (2)$$

γ：累積すりへり係数 (mm^3/cm^2)

W_{step}：12 時間毎の表乾質量 (g)

A：摩耗面積 15×15×3.14 (cm^2)

4. 供試体配合と養生条件

4.1 供試体配合について

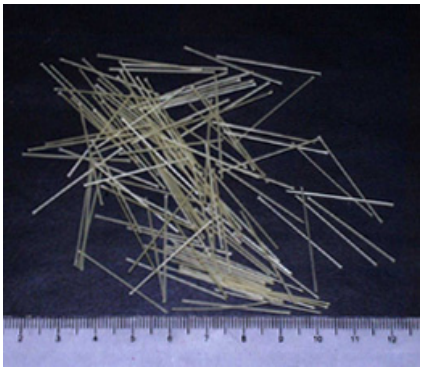
配合は超高強度繊維補強モルタル（以後 HYUHSM）の配合はもとより，既存コンクリートに着目した配合

表－2 供試体配合

種　別	供試体名	air (%)	W/(CorB) (%)	S/a (%)	ペースト／砂 体積比	単位量 (kg/m^3) W	B:バインダー C	B:バインダー 高強度混和材	S	G	VFL (L30-D0.66mm)	VFS (L12-D0.1mm)	高性能AE減水剤 or AE減水剤
普通強度コンクリート	Gmax20-1	4.5	43	47	0.81	150	349	－	878	Gmax20mm 953	－	－	適量
	Gmax40									Gmax25mm:40mm 1:1 1019			
	Gmax20-2		39	33	1.16	145	370		615	Gmax20mm 1201			
高強度コンクリート	HSC	2.5	20	60	1.17	153	695	70	939	Gmax20mm 594			
超高強度繊維補強モルタル	HYUHSM			100		198	900	90	1211	－	13.0 (1.0Vol・%)	2.6 (0.2Vol・%)	

3 種，高強度コンクリート 1 種を比較用に配合し，試験を実施した。また，石材（花崗岩）を比較用に試験した。供試体配合を**表－2** に示す。すべての配合のセメントは普通ポルトランドセメントを使用している。高強度コンクリート（以後 HSC）ならびに HYUHSM ではエトリンガイト系高強度混和材を使用している。細骨材は普通強度コンクリートに関して北海道日高産の密度 2.69g/cm^3, HSC ならびに HYUHSM は産地が同じで密度 2.73g/cm^3 の川砂を使用した。粗骨材に関して，Gmax20mm は北海道札幌産の密度 2.59g/cm^3 の安産岩質砕石を Gmax40mm は北海道日高産の密度 2.77g/cm^3 の川砂利 25mm ならびに 40mm を 1 対 1 で合わせたものを使用した。

HYUHSM で使用した繊維は 2 種類のビニロン繊維を混合している。一種は**図－2** に示す長さ 30mm 太さが 0.66mm の長繊維で，もう一種は**図－3** に示す長さが 12mm 太さが 0.1mm の短繊維のものを使用した。既往の研究などでは鋼繊維が耐摩耗性に有効と言われているが [7) 8)]，本研究でのこれら 2 種の有機繊維は耐摩耗性を改善するために用いた繊維ではなく，長繊維は主に曲げ靭性を改善する目的で用いており，短繊維は乾燥収縮によるひび割れを抑制する目的で用いている。よって，繊維の影響に関しては今後の研究課題とし，また，繊維の混入量，繊維の種類等を変えた研究も今後実施する。



図－2 ビニロン長繊維

図－3 ビニロン短繊維

供試体名 Gmax20-1 はセメント 2 次製品を意識した配合で材齢 14 日設計強度を 30N/mm^2 としている。Gmax40 は Gmax20-1 の粗骨材を変更した配合である。Gmax20-2 は細骨材率を極端に小さくした配合である。

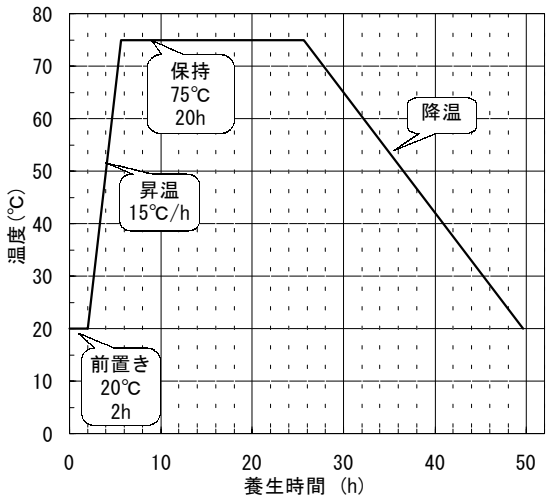
HSC のモルタル部は HYUHSM のモルタル部をイメージしており，これに粗骨材を入れて高強度コンクリートにしたものである。つまり，ペースト（セメントペースト）と砂の体積比が同じ配合である。

普通強度コンクリートの目標フレッシュ性状はスランプ 8±2.5cm，空気量 4.5±1.5%とした。高強度コンクリートはスランプフローランク 1，空気量を 2.5±1.5%とした。また，超高強度繊維補強モルタルのスランプフローは 250±20mm, 空気量 2.5±1.5%とした [9)]。

4.2 養生条件について

普通強度コンクリートは，すべて打設直後から 1 日間の湿布養生を行い，その後，材齢 28 日まで標準養生（20±2℃水中養生）を行っている。

HSC ならびに HYUHSM は，エトリンガイト系高強度混和材を使用していることから，普通強度コンクリートと異なる養生方法を行った。この高強度混和材はセメント 2 次製品用に開発されたもので，常圧蒸気養生を含む高温による養生を実施しないと高強度混和材の効果が十分に発揮されない。よって，HSC ならびに HYUHSM の養生は打設直後から 1 日間湿布養生を実施し，その後脱型を行い，脱型後に高温温水養生を行った。高温温水養生履歴を**図－4** に示す。高温温水養生は前置きを約 20℃で 2 時間行い，その後本養生を行っている。本養生は前置き養生温度 20℃から昇温速度 15℃/h で 75℃まで上げ，その後，75℃を 20 時間保持する履歴である。降温は温度ひび割れを生じさせないようにできるだけゆっくり温度を下げている。高温温水養生後の HSC ならびに HYUHSM は材齢 28 日まで標準養生を実施した。



図－4 HSC ならびに HYUHSM の高温温水養生履歴

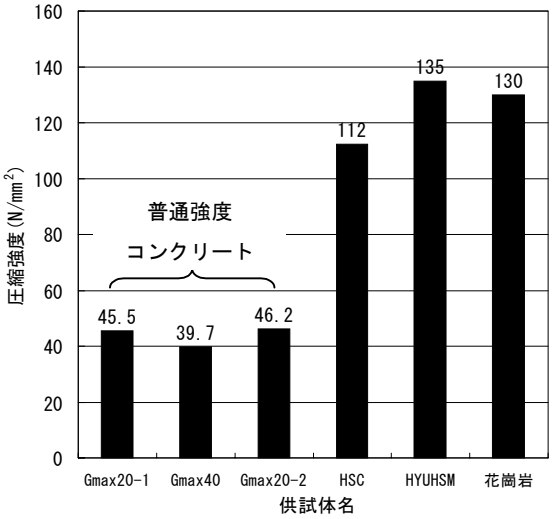
5. 試験結果

5.1 圧縮強度試験結果

図－5 に圧縮強度試験結果を示す。また，圧縮強度試験は 3 本の平均値で示す。花崗岩の圧縮強度は 130N/mm^2 と示しているが，実際に圧縮試験を行った試験結果ではなく，参考文献より引用した値である [10]。

花崗岩の圧縮強度は産地ならびに密度により結果が異なるが，130N/mm^2 以上は保持していることから圧縮強度を 130N/mm^2 と示す（公開されている最低圧縮強度）。

普通強度コンクリートの圧縮強度は約 40N/mm^2 の結果を示し，最大骨材粒径の比較では Gmax20-1 より Gmax40 の結果が小さくなる結果が得られた。細骨材率をできるだけ小さくした Gmax20-2 は Gmax20-1 と同等の圧縮強度が得られた。HSC ならびに HYUHSM は普通強度コンクリートより大きな圧縮強度が得られ，HSC では約 2 倍，HYUHSM では約 3 倍の圧縮強度であった。HYUHSM の圧縮強度は花崗岩の公開されている最低圧縮強度と同等の傾向が示された。



図－5 圧縮強度試験結果（供試体 3 本平均）

5.2 流体エロージョン摩耗状況

流体エロージョン摩耗状況を**表－3** に示す。表の上段には試験前の状況を，下段には 72 時間後の状況を示している。

表－3 に示すように普通強度コンクリートである Gmax20-1，Gmax40 ならびに Gmax20-2 の 72 時間後の流体エロージョン摩耗状況には明瞭に粗骨材が見られ，さらに，波打つような摩耗痕が見られ粗面化した。

図－6 に示すようにこの波打つような摩耗痕の頂点には粗骨材が存在する傾向が見られた。また，Gmax20-1,2 の波の間隔は Gmax40 より狭くなる傾向も見られた。

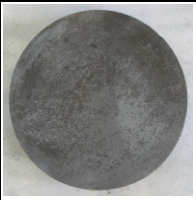
HSC の 72 時間後の流体エロージョン摩耗状況は普通強度コンクリートほどではないが波打つような摩耗痕が見られ摩耗面が粗面化した。HSC の波の高さは普通強度コンクリートより小さいが，普通強度コンクリートと同様に粗骨材が見られ，波の頂点には粗骨材が存在する傾向が示された（図中白矢印）。

HYUHSM は供試体端部に約 4cm 幅の筋状の摩耗痕が見られ，普通強度コンクリートならびに HSC に見られたような波打つ摩耗痕は見られなかった。

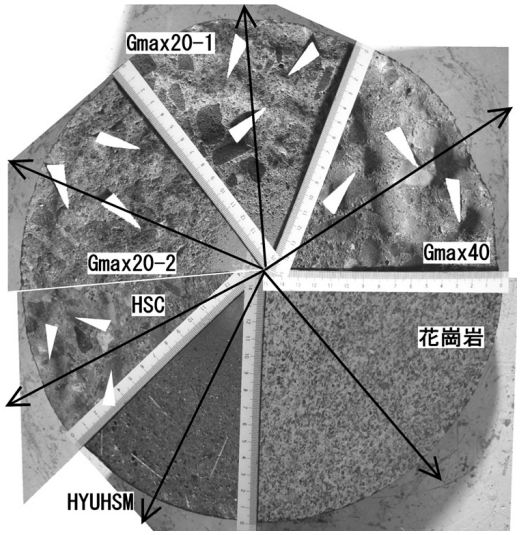
花崗岩に関して，摩耗痕は見られなかった。

表－3 に示した摩耗状況でも見られるように，この試験において供試体の中央部は摩耗されない。このことから，**図－6** で示した各供試体の摩耗状況図中の黒矢印方向に，その上をレーザー変位計でトレースした。その結果を**図－7** に摩耗深さとして示す。この図は供試体中心を摩耗深さ 0mm とした図である。この結果からも判るように，花崗岩に大きな変化は見られなかった。普通強度コンクリートの流体エロージョン摩耗性は粗骨材に影響される傾向が示され，Gmax20-1 と Gmax20-2 の関係では細骨材率が大きい Gmax20-1 の摩耗深さが深くなる傾向が示された。また，Gmax20-1 と Gmax40 の関係では最大深さが Gmax40 の方が大き

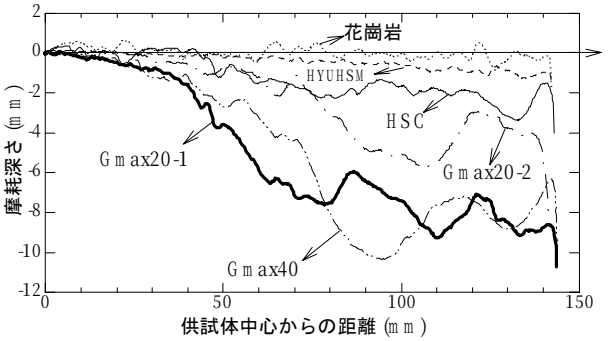
表－3 流体エロージョン摩耗状況

経過時間	Gmax20-1	Gmax40	Gmax20-2	HSC	HYUHSM	花崗岩
試験前						
72時間後						

いものの，中心からの距離 80mm までは Gmax20-1 の方が大きくなる傾向が得られた。HSC と HYUHSM の関係では粗骨材が耐摩耗性を低下させる傾向が示された。これは HSC と HYUHSM のモルタル部の配合が同じであることから言えると考えられる。もし，高強度コンクリートの流体エロージョン摩耗性が粗骨材の影響を受けないのであれば，HYUHSM と同じ摩耗状況になることが示唆できる。しかし，HSC の摩耗深さは HYUHSM より深くなる結果が得られた。つまり，摩耗面近傍の粗骨材を覆っている付着力の小さいモルタルマトリクスが摩耗し，粗骨材が明瞭に見えるようになっていることから，摩耗面近況にある粗骨材の遷移帯が影響しているように考えられる。



図－6 各供試体流体エロージョン摩耗状況図



図－7 各供試体流体エロージョン摩耗深さ

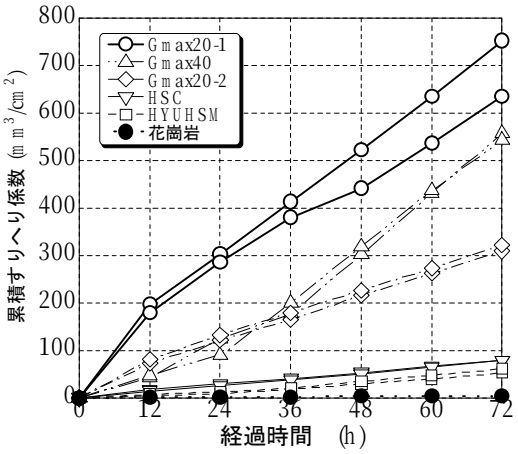
5.3 流体エロージョン摩耗結果

図－8 にすべての供試体の累積すりへり係数を示す。流体エロージョン摩耗試験は花崗岩を除き，２回行っており，ここではその結果をすべて示す。

粗骨材の最大粒径の違いによる累積すりへり係数は Gmax20-1 および Gmax40 の試験結果から考察できると考えられる。この 2 者は配合において粗骨材の種類および最大粒径が異なり，水セメント比，単位水量ならびに細骨材量が同じである。結果，Gmax40 の累積すりへり係数は Gmax20-1 より小さくなる傾向が示された。既往の研究より砕石と玉砂利の違いによる影響は少ないことが言われていることから [1)]，普通強度コンクリートの流体エロージョン摩耗では粗骨材の最大粒径が累積すりへり係数に寄与したと考えられる。

この他に Gmax20-1 と Gmax20-2 の関係では，配合は異なるが，圧縮強度が同等であることから，細骨材率を出来るだけ小さくすることで，流体エロージョン摩耗による累積すりへり係数を小さくすることができる傾向が示された。これは既往の研究の傾向とは異なる結果が得られた。既往の研究では主に衝撃摩耗による試験結果で，摩耗機構の違いにより，このような結果が得られたと考えられる。さらに，この傾向は HSC の傾向と異なり，同じ摩耗機構でも HSC の場合は普通強度コンクリートと同じ摩耗対策ができないことが示唆できる。

HSC，HYUHSM ならびに花崗岩の累積すりへり係数は普通強度コンクリートより遙かに小さい値を示し，72 時間経過の普通強度コンクリートが 300～750mm^3/cm^2 の範囲であったが HSC，HYUHSM ならびに花崗岩は 100mm^3/cm^2 以下になる結果が得られた。



図－8 各種供試体の累積すりへり係数

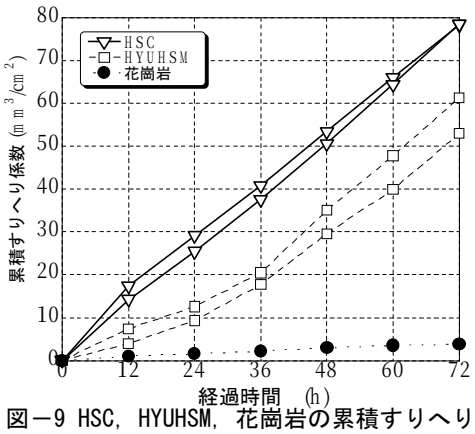
図－9 に HSC，HYUHSM ならびに花崗岩の詳細な累積すりへり係数を示す。この図に示すように花崗岩のすりへり係数は HSC ならびに HYUHSM より小さい。このようにコンクリート用骨材として使われるような硬質の単独素材である石材はコンクリートのような複合された材料より流体エロージョン摩耗による耐摩耗性が高いことが示された。先に摩耗状況でも傾向を示したように，HSC は HYUHSM よりすりへり係数が大きくなる結果が得られた。

詳細を検討するために各時間当たりのすりへり係数の平均値を**図－10** に示す。この図に示すように花崗岩

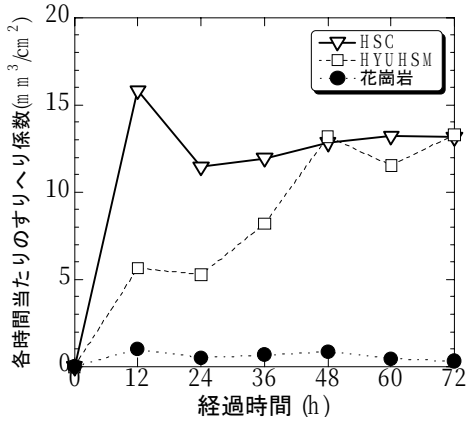
は横一線のグラフが示され，絶えず一定量で流体エロージョン摩耗がなされていたことを示している。

HYUHSM は試験開始から経過時間 48 時間まで右肩上がりの結果が得られ，各時間当たりのすりへり係数の増加傾向が見られた。それ以降は一定した流体エロージョン摩耗がなされる傾向が示された。HSC に関しては試験開始から 12 時間までの各時間あたりのすりへり係数は他の時間帯より大きくなる傾向を示し，12 時間以降は一定した流体エロージョン摩耗がなされた傾向を示した。

このことから，摩耗状況でも示したように，流体エロージョン摩耗の初期段階ではエフロレッセンスならびに摩耗面近傍の骨材を覆っているモルタル部などの脆弱部が流体エロージョン摩耗により洗い出されることで，すりへり係数を増大させることが，この HSC ならびに HYUHSM の関係で言えると考えられる。特に HSC は HYUHSM より摩耗面近傍にある骨材の遷移帯面積が大きいことから，脆弱部が多く，HYUHSM よりすりへり係数が大きくなたことが考えられる。



図－9 HSC，HYUHSM，花崗岩の累積すりへり係数



図－10 各時間当たりのすりへり係数

6. まとめ

本研究の範囲で次のことが言えると考えられる。

流体エロージョン摩耗を受ける普通強度コンクリートの耐摩耗性は粗骨材最大粒径ならびに細骨材率が影響を及ぼす結果が得られた。つまり，粗骨材の最大粒径を大きすること，または細骨材率を小さくすることが流体エロージョン摩耗に対する耐摩耗性対策と考えられる。

高強度コンクリートならびに超高強度繊維補強モルタルが流体エロージョン摩耗を受ける場合，摩耗面におけるエフロレッセンスならびに近傍粗骨材の遷移帯の影響を受け，摩耗初期の摩耗量が増大する傾向にある。しかし，全体的に見て高強度コンクリートならびに超高強度繊維補強モルタルの摩耗量は普通強度コンクリートより小さくなる。

超高強度繊維補強モルタルの流体エロージョンによる摩耗量は同程度強度の高強度コンクリートより小さくなる傾向が得られた。

参考文献

1) 増田　隆，松本嘉久，渡辺芳春：高耐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) 豊福俊英，豊福俊奏：各種コンクリートの衝撃摩耗特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.901-906，1999
3) 石神暁郎ほか：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
4) 堀口　敬，猪又　稔：コンクリートに関する各種の摩耗試験方法の特性について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.685-690，1992
5) 堀口　敬：表面疲労摩耗試験装置を用いたセメント系材料の摩耗性状について，土木学会第 44 回年次学術講演会講演概要集，V-309，pp.672-673，1989
6) 広中清一郎：新しい摩擦の科学-トライボロジー入門-，株式会社講談社，1991
7) 犬塚雅生，堀口　敬：鋼繊維補強コンクリートの摩耗について，第 3 回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.209-212，1981
8) 松尾久幸ほか：コンクリートの耐摩耗特性におよぼす各種要因の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.835-840，1993
9) 土木学会コンクリート委員会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，丸善（株），2004
10) http://minerva.ohnolab.arch.t-kougei.ac.jp/Material/Stone.htm