

論文

[1140] コンクリートの耐摩耗特性におよぼす各種要因の検討

松尾久幸\*1・丸山武彦\*2・村上俊夫\*3・多田東臣\*4

1. まえがき

本研究は、小規模な越流式ダムの越流部や水たたき部の補修用に、高強度コンクリートを適用する場合を想定し、その耐摩耗特性の調査を目的としたものである。昨年度は衝撃すりへり（以下、衝撃と呼ぶ）試験および落下衝撃（以下、落下と呼ぶ）試験の、主に衝撃を受ける場合について報告した。今年度は、同時期に実施した掃流試験などの結果を加え、コンクリートの耐摩耗特性におよぼすと思われる因子について検討を行い、また、摩耗試験結果相互の関連性について文献調査も含めて考察したものである。

2. 試験概要

2.1 試験概要と検討因子

試験概要を表1、使用材料を表2に示す。コンクリートの耐摩耗特性におよぼすと思われる要因として、骨材種類、混和材料、養生条件、摩耗試験の種類およびコンクリートの強度レベルを選んだ。骨材の種類は、Ⅰ：鬼怒川産の玉砕と川砂、Ⅱ：阿波産砕石と綾川産砕砂、およびⅢ：段戸産の砕石と砕砂の3種類とし、それぞれにプレーン（セメントとシリカフェーム）、鋼繊維1%wt混入および高強度用膨脹性混和材C×10%混入の3種類、養生方法は標準とオートクレープ養生の2種類とした。また、摩耗方法は掃流、衝撃および落下試験の3種類とし、強度レベルごとのコンクリートは結合材量を250から650 kg/m<sup>3</sup>、水結合材比を18から65%の範囲で変化させ、スランプが8から17cmの範囲に揃うよう、予備試験で確認したものをを用いた。表1に該当箇所と比較用の天然石の強度レベルを合わせて示す。

表中の●印は昨年度報告部分で、①掃流試験結果、②使用骨材の違い、③繊維補強効果、④膨脹性混和材の効果、⑤コンクリート強度の影響、⑥試験結果の比較、の順に考察する。

表 1 試験概要

骨材	結合材と混和材料	養生条件	摩 耗 試 験 種 類			設計強度 (コンクリート・天然石) ×100 kgf/cm <sup>2</sup>									
			掃	流	衝 撃	3	5	7	9	11	13	15	17	33	
Ⅰ	プレーン	N	○	○	●	■	■	■		□					
		A	○	○	●						□			□	
	鋼繊維 1%wt	N	○	○	●		■	■		□					
		A	○	○	●									□	
	膨脹性混和材 Cx10%	N	○	○	○			■	■						
		A	○	○	○		■	■							
Ⅱ	プレーン	N	○	○	○	■	■	■	□						
		A	○	○	○			■		□	□				
	鋼繊維 1%wt	N	○	○	○	■		■	□						
膨脹性混和材 Cx10%	N	○	○	○			■	■							
	A	○	○	○			■	■							
Ⅲ	プレーン	N	○	○	○	■		■	■						
		A	○	○	○			■	■						
		N	○	○	○			■	■						
Ⅳ	天然石	①花崗岩	○	○	○								■		
		②花崗岩	○	○	●								■		
		③石英片岩	○	○	○								■		

注 1) 養生条件 N: 標準, A: オートクレープ 注 2) 摩耗試験種類 ○: 今年度報告, ●: 昨年度報告 注 3) 供試体数(組合と、縮小) 注 4) 強度レベル ■: 設計強度±10%, □: シリカフェーム添加

\*1 日本コンクリート工業(株) 研究所 主任研究員 (正会員)  
 \*2 日本コンクリート工業(株) 研究所 主席研究員、工博 (正会員)  
 \*3 (株)四国総合研究所 土木技術部 副主席研究員 (正会員)  
 \*4 (株)四国総合研究所 土木技術部 主席研究員

表2 使用材料

使用材料	名称・産地	比重	性質
セメント	普通ポルトランド	3.16	S. A = 3200 cm <sup>3</sup> /g
骨材種類	I	粗 鬼怒川産玉砕(新潟)	2.63 吸水率 1.47%
		細 鬼怒川産川砂(新潟)	2.61 " 2.05%
	II	粗 阿波産砕石(高松)	2.58 " 1.69%
		細 綾川産砕砂(高松)	2.60 " 1.50%
	III	粗 段戸産砕石(愛媛)	2.62 " 0.72%
		細 段戸産砕砂(愛媛)	2.57 " 1.02%
混和材	シリカフェーム	2.20	S. A = 200,000 cm <sup>3</sup> /g
	繊維強化樹脂	2.60	エトリンガイト系
	鋼繊維(ステンレス)	7.70	繊維長 30mm
混和剤	高性能減水剤	1.20	ナフタリンスルホン酸
	A E減水剤	1.07	リグニンスルホン酸
天然石	① 笠岡産 花崗岩	2.62	(岡山県)
	② 稲田産 花崗岩	2.64	(茨城県)
	③ 段戸産 石英片岩	2.62	(愛知県)

2.2 試験方法

① 掃流試験は図1に示す大浜提案による掃流摩耗試験機を用いた。摩耗方法は振動締固めを行った内径130mm、外径250mm、高さ100mmの中空円筒形(摩耗面積204cm<sup>2</sup>)の供試体を試験機の槽内に取付けた後、水と摩耗材(珪砂1kg)を入れ、1800回/分のプロペラ回転により高速循環させ供試体内面を摩耗させるものである。供試体数は各配合2個づつとした。試験材令は28日で、試験開始後1、3および5時間ごとに摩耗重量を測定するとともに、そのつど新しい摩耗材に取替えた。また摩耗重量から計算により平均摩耗深さを求めた。

② 衝撃試験機を図2に示し、ドラム回転保持枠に形状寸法が15×30×6cmの長方形供試体6個を六角形に固定し、内部に約2kgのシルペップ(20φ-40mm21個:ギルド鋼)を入れ、注水しながらドラムを90回/分で回転させ摩耗させる方法で、供試体数は各配合3個づつとした。試験開始後1、3および5時間ごとに摩耗重量を計り、計算により平均摩耗深さを求めた。

③ 落下試験は摩耗面の中心に直径51mm、重さ536gの鋼球が1mの高さより自由落下できるような装置を使用し、寸法が15×15×20cmの供試体を装置の架台に、打設面を横に水平と30度の傾斜角で固定し、試験中は摩耗面が湿潤状態を保てる程度の散水を行う方法とした。供試体数は各配合3個づつとした。落下回数が100、200、400、600および800回ごとに摩耗面積と摩耗容積(水の注入量で計量)を測定し、またこれらの値から計算により平均摩耗深さを求めた。

3. 結果と考察

3.1 掃流試験

骨材Iの種類について、図3の養生別NおよびAの摩耗時間と摩耗量の関係から、掃流試験の摩耗形態は表層部の摩耗による摩耗量が比較的多い掃流1時間までの初期摩耗と、それ以降の時間と摩耗量がほぼ比例する定常摩耗とに分けられ、文献<sup>(1)(5)</sup>に見られるような摩耗形態が得られた。この形態は骨材種類がIIやIIIになっても、また、繊維補強や膨脹性混和材混入コ

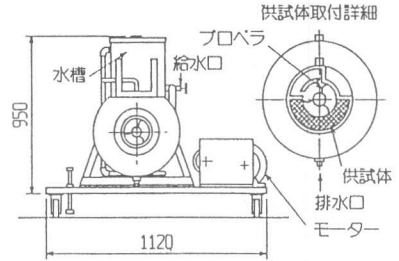


図1 掃流試験機

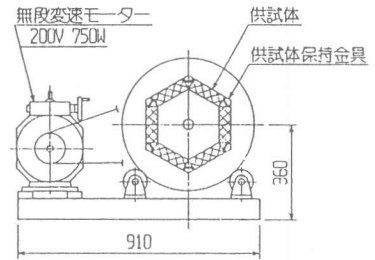


図2 衝撃試験機

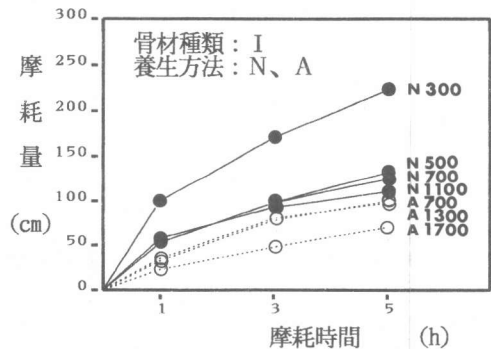


図3 摩耗時間と摩耗量の関係

ンクリートでも同様であった。しかし、図4に示す摩耗時間の増分と摩耗量の関係をよく見ると、摩耗量の増分率は全般的に小さくなる傾向を示し、低強度のN 300（Nは養生を、300は強度レベルを示す）は減少傾向が大きく、強度が高くなるに従ってその傾向は緩やかになり、A1700では一定の値になった。これは低強度ほど粗骨材の露出に伴う摩耗抵抗の増大が早期に現れたためと思われる。また、養生条件の違いが、同じ強度でN養生に比べA養生コンクリートの摩耗1時間の摩耗量が小さいことから、摩耗初期の段階で見られた。これは結合材組織がA養生で緻密になったものと思われるが、衝撃および落下試験では観察できなかった現象である。しかし、いずれの試験においても試験終了段階では養生条件の差は見れなくなった。また、衝撃および落下試験では摩耗初期の測定を、より密に行う必要があると考えられる。

### 3.2 使用骨材の違いの影響

耐摩耗性改善に骨材の選択は重要な課題のひとつである。しかし、骨材の違いがどの程度摩耗試験に影響するものなのか把握しておく必要があり、本実験では一般的な骨材Ⅰ、Ⅱと原石強度が 3300 kgf/cm<sup>2</sup>の石英片岩の碎石と砕砂を用いたⅢについて比較した。図5および図6は、試験終了時における掃流および衝撃試験の圧縮強度と摩耗深さの関係で、骨材の種類ごとに回帰曲線を示す。掃流試験では全般的にⅠの骨材がⅡに対し耐摩耗性に優れ、その差は 300kgf/cm<sup>2</sup>の低強度ではほとんどないものの、強度が高くなるにつれ徐々に広がり、1300kgf/cm<sup>2</sup>では摩耗量で22%ほどの差となった。また、骨材Ⅲは低強度の場合、他の組合せより20%程度小さいものの、750kgf/cm<sup>2</sup>以上ではむしろ摩耗量は最も大きくなった。これらの原因として、今回の試験範囲内ではⅡの骨材に比重など岩質によると思われる影響が、Ⅲには粗骨材の緻密な破断面とモルタル層との付着性の影響がでたものと、それぞれ推定される。しかし、全体的には骨材の違いによる有意差はなかった。衝撃試験では低強度範囲で差が見られ、骨材Ⅲが耐摩耗性に優れ、Ⅱ、Ⅰの順で摩耗量は大きくなった。中高強度の範囲では摩耗量に差がなく、1000kgf/cm<sup>2</sup>以上では骨材Ⅰが耐摩耗性に優れ、1300kgf/cm<sup>2</sup>でのⅠとⅡの差は14%であった。以上のことから、

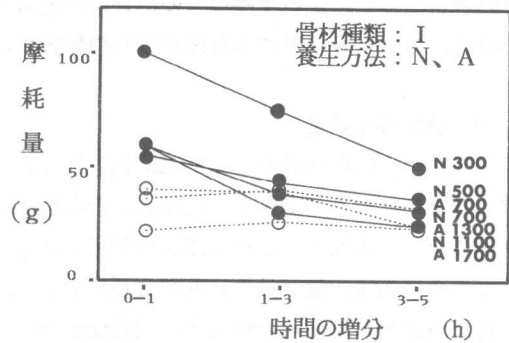


図 4 摩耗時間の増分と摩耗量の関係

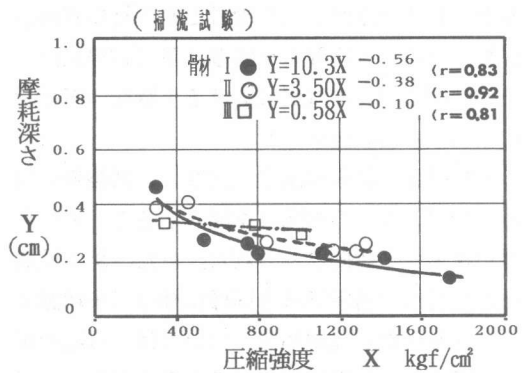


図 5 圧縮強度と摩耗深さの関係

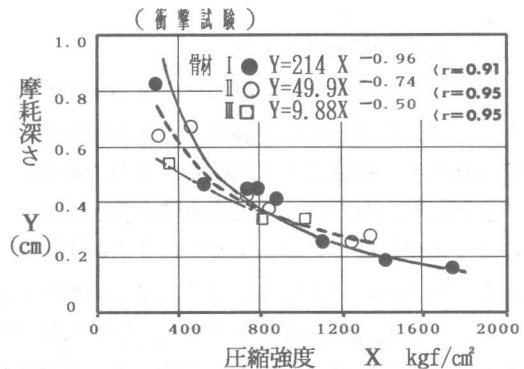


図 6 圧縮強度と摩耗深さの関係

使用骨材の違いによる摩耗量への影響は試験ごとに異なる傾向が見られた。今後は、骨材の種類、形状および組合せなどによる摩耗量への影響についてデータの蓄積が必要である。

### 3.3 繊維補強効果

図7および図8は掃流と衝撃試験における圧縮強度と摩耗深さの関係で、回帰式は膨脹性混和材のデータを除き、鋼繊維混入有無ごとに求めたものである。骨材はI、IIの2種類とした。

掃流試験では1%wtの混入で、300kgf/cm<sup>2</sup>のとき無混入に比べ9%ほど改善され、強度が高くなるにしたがい混入効果は小さくなり、1000kgf/cm<sup>2</sup>以上ではほとんど差がなくなった。鋼繊維混入は耐掃流摩耗向上に有効と思えるが、有意差は無かった。また、この傾向は文献<sup>(1)</sup>にも示されているが、使用骨材と摩耗材の種類が異なるため、5時間の最終摩耗量(試験装置・条件は同じで、本試験における1時間の摩耗量に相当)に差が見られた。

衝撃試験では掃流試験と比較し、補強効果はみられず、むしろ鋼繊維を混入することで摩耗量が増加する傾向もみられた。また、落下試験においても、衝撃試験と同様に補強効果は認められなかった。繊維補強については、繊維の長さ、混入率、分散性および繊維の方向などを考慮した検討が必要である。

### 3.4 膨脹性混和材の効果

図9は高強度用膨脹性混和材の添加率がセメントの10%(外割)の場合と無混入のときの摩耗深さを、試験ごとに比較したものである。

混和材混入については強度水準の幅が狭く、掃流・衝撃試験(骨材I・II)は4点の平均値から、落下試験(骨材I)は2点の平均値から、

それぞれ強度と摩耗深さを求めた。無混入については同一強度における摩耗量を図7および図8の回帰式から計算で求めたものである。掃流試験の場合、平均圧縮強度は828kgf/cm<sup>2</sup>で無混入に比べ23%耐摩耗性が向上し、無混入の1530kgf/cm<sup>2</sup>の摩耗量に相当したのに対し、衝撃試験では逆に17%程度摩耗量が増大し、無混入の676kgf/cm<sup>2</sup>の摩耗深さに等しくなった。また、落下試験(平均強度857kgf/cm<sup>2</sup>)では2%程度の差はあるものの、無混入とほぼ等しい値となった。これらの理由として、掃流や落下試験では摩耗面が型枠面なのに対し、衝撃試験ではコテ仕上げ面となり、硬化時の拘束性能の違いやブリージングなどの影響が出たためと考えられる。

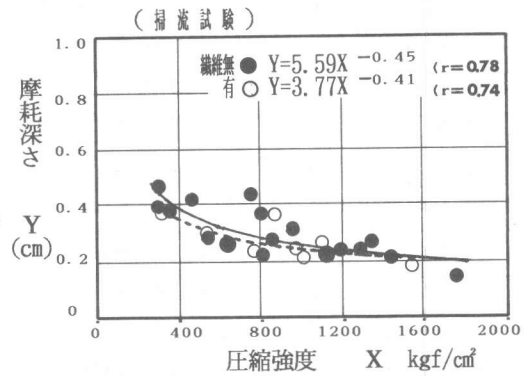


図7 圧縮強度と摩耗深さの関係

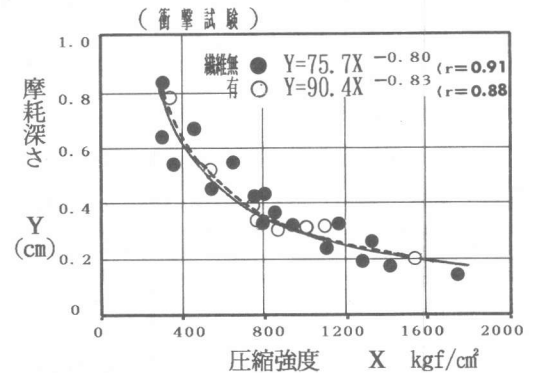


図8 圧縮強度と摩耗深さの関係

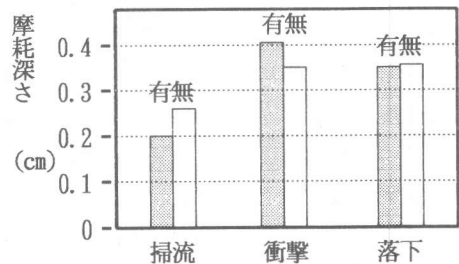


図9 膨脹性混和材の混入効果

### 3.5 強度の影響

図10と図11は、掃流と衝撃試験から得られた天然石を含めた全供試体に関する圧縮強度と摩耗深さの散布図である。いずれも高強度になるほど耐摩耗性能は下側に凸の傾向で向上すると判断できる。しかし、3300 kgf/cm<sup>2</sup>の天然石まで含めてその傾向をみると、掃流試験では天然石の改善傾向と大きな隔たりが認められ、衝撃や落下試験では天然石との差があまり見られなかった。これらの原因として、衝撃試験が摩耗材に鋼材を使用しているのに対して、掃流試験は摩耗材に珪砂を用いているため、供試体摩耗面の材質の違いや摩耗材種類の影響がでているものと考えられる。また、天然石については天然石の強度が高くなるほど、いずれの摩耗作用に対しても耐摩耗性能は向上すると思われる。

掃流試験の相関係数は  $r=0.70$  で、他の試験結果（衝撃  $r=0.90$ 、落下  $r=0.94$ ）と比べ小さく、その改善傾向も明瞭ではなかった。このことは、摩耗材種類や掃流方法など試験方法に起因する因子の他に、摩耗形態そのものがより複雑な形態になっているものと考えらる。そこで、圧縮強度のみで掃流面の摩耗現象を捕らえるには不十分と思われ、素材の持つ引張強度の影響についても検討した。引張強度の影響を衝撃試験の結果も合わせ図12に示す。図12によれば掃流摩耗の場合、引張強度が高くなるほど耐摩耗性能は向上し、その傾向は下側に凸のようであると判断できる。それに対し、衝撃試験では引張強度が高くなるほど耐摩耗性能は直線的に改善されるものの、天然石を含めるとその傾向は鋭角に折れ、両者には違いが見られた。落下試験の結果は衝撃試験結果に類似した傾向を示した。このように掃流摩耗には引張強度の影響を認めることができるが、他の強度特性との関連も含めた検討が必要である。

### 3.6 試験結果の比較

図13は掃流、衝撃および落下試験の全データ（天然石は除外）を対象に、圧縮強度と摩耗深さの関係について回帰曲線を求め実線で示し、点線部には落下500回の回帰曲線と文献<sup>(8)</sup>を参照したスパイク摩耗試験結果（3万回の走行終了時）とを併せて示したものである。これらは4種

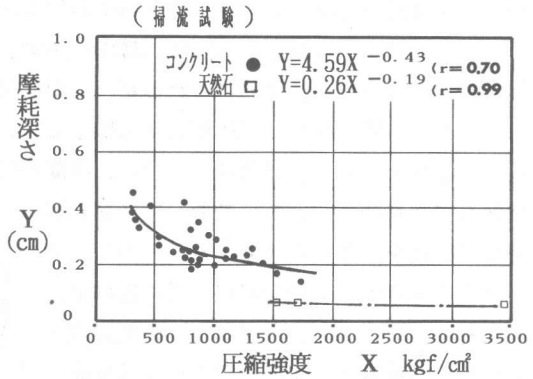


図 10 圧縮強度と摩耗深さの関係

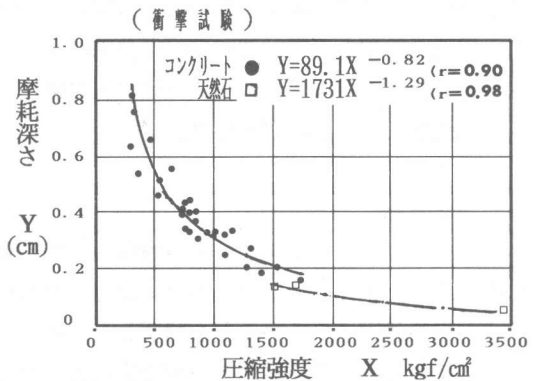


図 11 圧縮強度と摩耗深さの関係

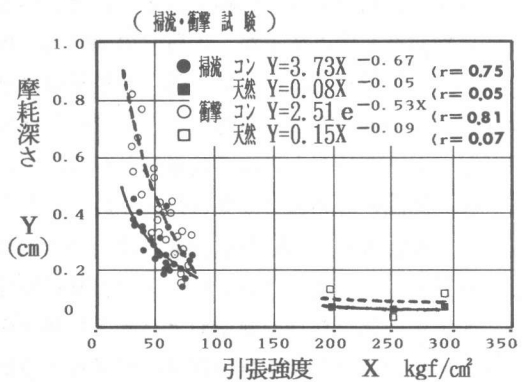


図 12 引張強度と摩耗深さの関係

類の摩耗試験から得られた試験終了時における圧縮強度と摩耗深さ（摩耗量）の関係を比較していることになる。試験ごとの回帰式は図に示すようである。いずれの試験においても圧縮強度が高くなるほど耐摩耗性は改善されるが、その程度は各試験によって異なり、掃流や落下試験は衝撃やスパイク摩耗試験ほど圧縮強度に敏感でない。衝撃試験とスパイク摩耗試験の回帰曲線はほぼ同じ曲線といえるほど重なり、また、中間測定点の衝撃3時間と1.5万回スパイク摩耗の回帰曲線も重なり合うことから判断して、摩耗機構に類似性を見ることができるといえる。しかし、スパイク摩耗のデータは文献から得た資料で、使用材料（セメント、骨材など）の相違点を考慮し、摩耗機構の類似性については今後、確認試験を行なうなどさらに検討する必要があると思う。掃流と落下試験の比較に関しても、掃流5時間と落下500回の回帰曲線が重なり合う結果となって、耐摩耗性能の改善傾向に類似性を見ることができた。

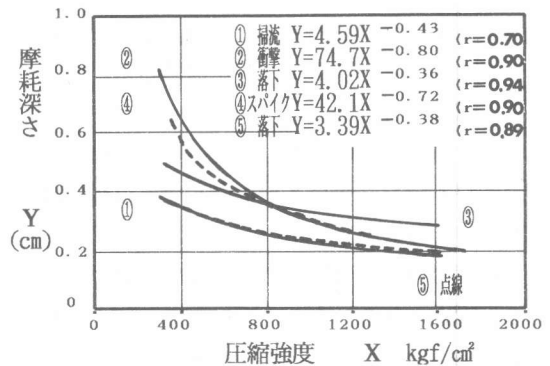


図 13 圧縮強度と摩耗深さの関係

#### 4. まとめ

本研究は高強度コンクリートの耐摩耗特性の調査を目的に、昨年度のデータも含め耐摩耗特性に関連すると思われる要因について検討したわけであるが、試験方法によって摩耗特性は一様でなく、未検討因子の多いことも判明した。得られた成果としては、① 掃流摩耗形態は表層モルタルの摩耗による摩耗量の多い初期摩耗と、それ以降の安定した定常摩耗に区別でき、初期摩耗ではA養生の摩耗量が標準養生に比べ小さいため、セメント硬化体の表面組織の影響を受けやすい。しかし、衝撃や落下試験ではその影響が明確でない。② 使用骨材の違いによる影響は今後詳細な検討を必要とするが、本研究の範囲内では、衝撃試験は低強度範囲で差がみられたが全般的に骨材の影響を受けにくい。③ 繊維補強の効果は1%wt混入において、掃流試験では低強度範囲に混入効果がみられるものの、1000kgf/cm<sup>2</sup>以上ではその効果が少ない。また、衝撃および落下試験においては混入による効果はむしろなく、混入することで摩耗量の増加する傾向も見られる。④ 膨脹性混和材の効果は掃流摩耗に対し有効で、C×10%の混入率の800kgf/cm<sup>2</sup>のコンクリートは無混入の1300kgf/cm<sup>2</sup>程度の摩耗量に相当する。しかし、衝撃および落下に対しては必ずしも有効でない。⑤ コンクリートの耐摩耗性能は高強度になるほど向上するが、試験方法によって改善傾向は異なり、掃流および落下摩耗は衝撃摩耗と比較し圧縮強度に敏感でない。

⑥ 掃流および衝撃試験は摩耗材の材質・重量、装置の回転速度などが重要な因子と考えられ、今後は、これらの因子に骨材の組合せ、測定時間および摩耗面の性質などの因子を加えた研究と、高強度コンクリートの実用面への適用や試験値との整合性の検討を行いたいと考えている。

#### 5. 参考文献

- (1) 杉田、他 「小水力ダムコンクリートの耐摩耗性評価に関する一考察」 1986 コンクリート工学年次論文集
- (2) 小柳、他 「コンクリートの衝撃摩耗について」 1987 セメント技術年報
- (3) 小柳、他 「コンクリートの耐衝撃摩耗特性に及ぼす各種要因の影響」 1988 コンクリート工学年次論文集
- (4) 小柳、他 「コンクリートの衝撃摩耗に及ぼす乾湿条件および衝撃角度について」 1989 コンクリート工学年次論文集
- (5) 豊福 「炭素繊維補強コンクリートの衝撃・掃流作用に対する摩耗特性」 1990 コンクリート工学年次論文集
- (6) 松尾、他 「高強度コンクリートの耐衝撃摩耗特性に関する一考察」 1992 コンクリート工学年次論文集
- (7) 堀口、他 「コンクリートに関する各種の摩耗試験法の特長について」 1992 コンクリート工学年次論文集
- (8) 根本、他 「各種混和材料を用いたコンクリートの耐摩耗性：道路・舗装部門」 1985 北海道開発局技術研究報告