

高速流水中の砂礫によるコンクリートの 摩耗に関する実験的研究

笹 倉 伸 晃 舟 橋 政 司
広 野 雅 男 ^{*1} 細 見 栄 一 ^{*2}

要 旨

砂礫等を含む水が流れるパイプにコンクリート製パイプを適用すると、砂礫によりコンクリートがすりへり摩耗作用を受ける。特に高流速部においてはコンクリートが受ける摩耗作用も大きくなるものと推測され、コンクリート製パイプを実構造物へ適用する上で、摩耗の程度を把握しておくことが重要である。しかしながら、既往の研究において、高速流水中の砂礫によるコンクリートの摩耗量を明確に示したものは皆無と言っても過言ではない。そこで、砂礫を含む水を高速でコンクリート製パイプ内を循環させ、コンクリート強度およびコンクリート表面の平滑度を変えてコンクリートの耐摩耗性試験を行った。その結果、表面が平滑で高強度のコンクリートが高速流水中の砂礫に対する耐摩耗性に優れており、十分に構造物への適用が可能との結論が得られた。

キーワード コンクリートパイプ／摩耗／高強度コンクリート／砂礫／流水

目 次

- | | |
|--------------|------------|
| 1. はじめに | 4. 試験方法の評価 |
| 2. 実験概要 | 5. まとめ |
| 3. 実験結果および考察 | |

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ABRASION RESISTANCE OF CONCRETE TO SAND IN THE HIGH-SPEED RUNNING WATER

Nobuaki
SASAKURA
Masao HIRONO

Masashi
FUNAHASHI

Eiichi HOSOMI

Synopsis:

When concrete is applied to the pipe in which the water containing sand flows, the concrete pipe would be suffered abrasion from sand in the running water. It is important to predict the damage of concrete surface by abrasion, especially in the part of high-speed running water, to apply the concrete pipe to structures. It is very hard to find the previous studies to be referred, in which the abrasion to the concrete by sand in the high-speed running water is clearly stated.

Therefore, abrasion tests of concrete, which has different strengths and smoothness of concrete surface, were carried out by using the circulating and high-speed running water containing sand. Finally, it is concluded that high strength concrete with smooth surface has excellent abrasion resistance to sand in the high-speed running water. Furthermore, the concrete pipe is sufficiently applicable to the real structures.

1. はじめに

実構造物へコンクリート製パイプを適用する際に、流水中に砂礫等が含まれていると、コンクリートが受けるすりへり摩耗作用が問題となり、事前にコンクリート表面の摩耗の程度を把握しておく必要がある。しかしながら、既往の研究において、高速流水中の砂礫によるコンクリート表面の摩耗量を明確に示したものは皆無と言っても過言ではない。そこで、流水中に砂礫等が含まれている場合を想定し、コンクリート製パイプの設計資料に資することを目的として、砂礫を含む流水を用いたコンクリートの耐摩耗性試験を行った。試験条件設定のために、ある構造物に用いられるパイプにおける流速を解析で求めたところ、5～10m/s 程度の高速の流速が発生するとの結果となった。また、供用中の構造物においても、同様な高速流速が発生することが報告されている。

本研究は、砂礫分を含んだ循環水によるコンクリートの耐摩耗性試験を実施し、コンクリートの摩耗性状を観察するとともに、実構造物へのコンクリート製パイプの適用性を検討した結果を報告するものである。¹⁾

2. 実験概要

2.1 循環水による耐摩耗試験装置および試験体

試験装置は、図-1 に示すように、スラリーポンプを用いて、水槽(3m³)からの循環水(砂礫を含む)を配管の中を通して、再び水槽に戻る方法とした。配管の間に、後述する試験体を設置する試験区間を設け、手動バルブで流量の調整を行い、所定の流速を設定した。

配管は水槽出口で8インチ管(8B)とし、スラリーポンプを通過後、レジュース(6B→4B)を介して4

インチ管(4B)に断面を絞る。そして、試験区間に設置した、内径φ100mmの試験体内面を通過して、再び4インチの配管を通して水槽へ戻すものとした。

試験体の形状・寸法は図-2 に示すように、外径φ260mm、内径φ116mm、長さ200mmの中空円筒形とする。試験体の形状・寸法は全て同一とし、重量はステンレス製外枠(t=2mm、重量約2.44kg)と合わせておよそ20kgである。

試験体の製作には、図-3 に示す試験体製作用の型枠を用いた。外型枠はステンレス製(外径φ249mm、厚さ t=2mm)とし、水中養生時、摩耗試験時にも脱型しないものとした。また、内型枠の外径はφ115.5mmであり、試験体内面の仕上がり状態を2水準とするための平滑度の異なる薄いシートを貼付けて、試験体仕上がり内径をφ116mmとする。貼付けるシートとしては、平滑面(鋼製型枠/化粧合板を想定)には、OHPシート(図-4(a))を使用し、粗面(木製合板型枠を想定)には、耐水性の壁紙シート(図-4(b))を使用した。

摩耗試験時には、コンクリート試験体を横に倒して配管の間に設置することで、試験体内側コンクリート面を流水が通過する。また型枠脱型後は所要材齢まで20℃の水中標準養生を行った。

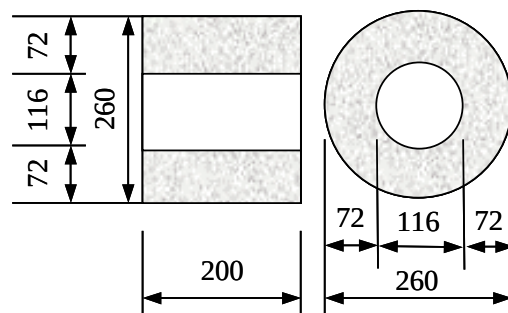


図-2 試験体形状・寸法

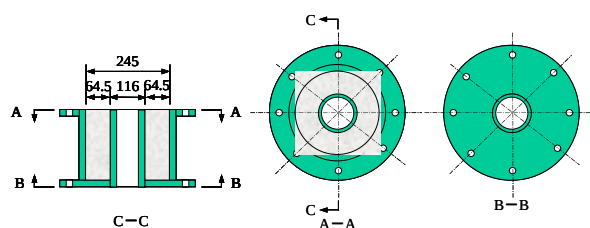


図-3 試験製作用型枠

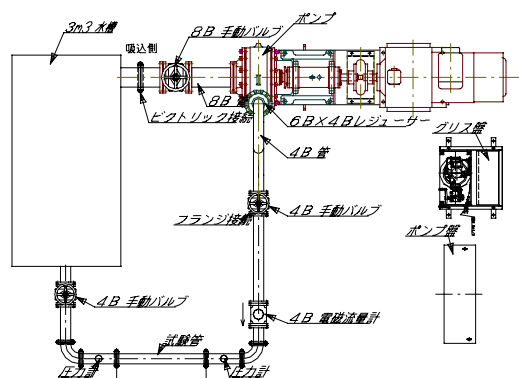


図-1 試験装置



(a)OHP シート

(b)壁紙シート

図-4 試験製作用型枠

表-1 試験体コンクリート使用材料

		普通コンクリート(N)	高強度コンクリート(S)
		成分または物性値	
セメント	C	普通ポルトランドセメント：密度 3.16g/cm ³	低熱ポルトランドセメント：密度 3.22 g/cm ³
細骨材	S	木更津産山砂：密度 2.61g/cm ³ ,粗粒率 2.87,	
粗骨材	G	両神産碎石：密度 2.71g/cm ³ ,Gmax=20mm	
高性能 AE 減水剤	SP	—	ポリアルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマーの複合体
AE 減水剤	AD	リグニルスルホン酸化合物とポリオールの複合体	—
空気量 調整剤	—	アルキルアリスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤

表-2 試験体コンクリートの配合

配合	設計 基準 強度 N/mm ²	目標スランプ (スランプ フロー) mm	水セメント比 %	空気量 %	細骨材率 %	単位量 kg/m ³				混和剤		フレッシュ時
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	SP C×%	AD C×%	スランプ (スランプ フロー)
N	28	120	55	4.5	47.5	155	282	882	1011	—	0.25	140
S	60	650	33	5.5	53.7	160	485	872	813	0.90	—	635

表-3 試験体コンクリートの強度試験結果

配合 種別	圧縮強度(N/mm ²)					引張強度(N/mm ²)			
	材齢 7日	材齢 28日	材齢 56日	試験開始時		材齢 28日	材齢 56日	試験開始時	
				摩耗試験(1)	摩耗試験(2)			摩耗試験(1)	摩耗試験(2)
N	23.4	32.6	—	35.7	39.3	2.75	—	3.11	3.09
S	25.5	51.5	64.8	69.7	75.5	—	4.59	4.60	4.43

試験体の使用材料およびコンクリートの配合を表-1 および表-2 に示す。試験体製作に用いたコンクリートの配合は、普通コンクリートと高強度コンクリートの2種類とした。普通コンクリートの設計基準強度は、中国で行われた工事の実績から、28N/mm²(材齢 28 日強度)とした。一方、高強度コンクリートは 60N/mm²(材齢 56 日強度)の設計基準強度とした。

試験体製作時には、圧縮強度試験用供試体(φ100×200mm)および割裂引張強度試験用供試体(φ150×200mm)も同時に採取した。試験材齢としては、高強度コンクリートの圧縮強度が7日、28日、56日および摩耗試験(1)および(2)の試験開始時とし、引張強度試験は材齢56日および摩耗試験(1)および(2)の試験開始時とした。一方、普通コンクリートの圧縮強度は7日、28日および摩耗試験(1)および(2)の試験開始時とし、引張強度試験は材齢28日および摩耗試験(1)および(2)の試験開始時とした。コンクリートの強度試験結果を表-3 に示す。

2.2 循環水による耐摩耗試験方法

(1) 循環水の流速および濃度の設定

ある構造物のパイプ内を流れる水を想定して、実験で用いる循環水中の砂の濃度は、想定海域の濃度を基に設定するものとした。湾内の平常時の計測実績 20～40ppm より、1つのケースは 40ppm(摩耗試験(1))とし、残りの1ケースは降雨時の実績値より、400ppm 程度(摩耗試験(2))に設定した。摩耗試験に用いた砂の粒径および混合比率を表-4 に示す。

コンクリート製パイプの海外実績で、エロージョンを回避するためには流速を 10m 以下とする必要があるとの報告も見られ、パイプ内の流速分布を CFD 解析により求めた。本試験で用いる循環水の流速は、流速分布の解析結果(図-5 参照)を基に 7.0m/sec 一定とした。なお、流速の管理は、配管内を流れる循環水の流量で管理した。また、循環水は試験開始時に、砂の濃度および水温を測定し、試験途中においてもこれらを測定するものとした。

(2) 試験手順

試験は、循環水中の砂の濃度が 40ppm(摩耗試験(1))と 400ppm(摩耗試験(2))による2ケースを実施し、各試験で試験区間に試験体4体を同時に設置した。摩耗試験(1)の試験体の設置方法は、図-6 に示すとおりであり、摩耗程

表-4 循環水中の砂の混合比率

循環水の 砂の濃度	混合比率		平均粒径 (mm)
	0.15mm 以下	0.15～ 0.30mm	
40ppm	1	9	0.21
400ppm	1	9	

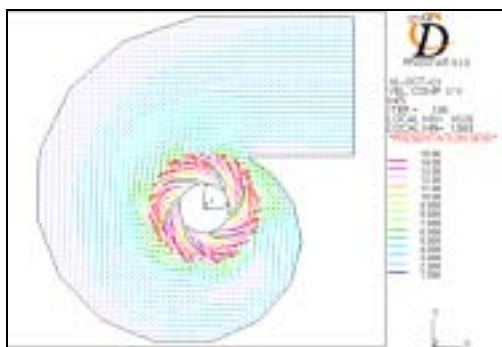


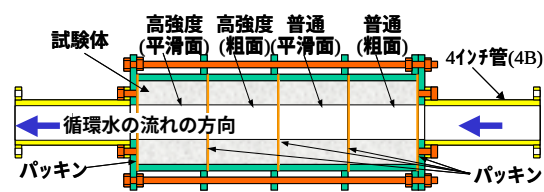
図-5 流速分布の解析結果

表-5 試験実施時間

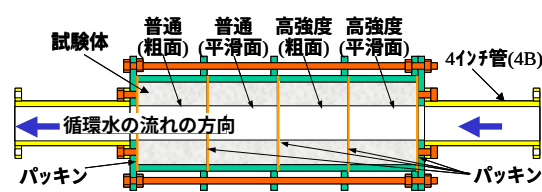
試験名	循環水中の 砂の濃度 (ppm)	累計試験 実施時間 (hour)
摩耗試験(1)	40	340
摩耗試験(2)	400	771 (391+380*1)

*1 摩耗試験(2)-A+摩耗試験(2)-Bの実施時間内訳

度が少ないと考えられる順に、水の流入する側から、高強度コンクリート（平滑面）、高強度コンクリート（粗面）、普通コンクリート（平滑面）、普通コンクリート（粗面）



(a) 摩耗試験(1)および(2)-A



(b) 摩耗試験(2)-B

図-6 試験体設置順序

表-6 試験水準

No.	試験体名	循環水中の砂の濃度 (ppm)	試験名	流速 (m/s)	コン リート 種類	設計 基準 強度 (N/mm ²)	試験体寸法			コン リート 容積 (cm ³)	コン リート 重量 (kg)	試験体 内面					
							内径 (mm)	外径 (mm)	長さ (mm)								
1	28-40-7-S	40	(1)	7.0	N	28	116	245	200	732	17.2	平滑面					
2	28-400-7-S	400	(2)									粗面					
3	28-40-7-R	40	(1)									平滑面					
4	28-400-7-R	400	(2)									粗面					
5	60-40-7-S	40	(1)		S	60						116	245	200	732	17.2	平滑面
6	60-400-7-S	400	(2)														粗面
7	60-40-7-R	40	(1)														平滑面
8	60-400-7-S	400	(2)														粗面

（粗面）の順とした。試験は 340 時間行った。

摩耗試験(2)の場合は、最初は摩耗試験(1)の場合と同様の設置方法(摩耗試験(2)-A)とした。その後、391 時間摩耗試験を実施した後、試験体の設置順を全く逆として設置(摩耗試験(2)-B)し、試験を行った(累計 771 時間)。

摩耗試験に用いた試験体名と条件の一覧を表-6 に示す。

2.3 回転円盤機による耐摩耗試験

砂礫を含む循環水による耐摩耗試験と比較のため、普通および高強度コンクリートの「水平なコンクリート表面の耐摩耗試験」(ASTM C 779 準拠)も行った。この試験は、回転円盤機を用いて 3 個の摩耗輪と研磨剤により試験体表面を強制的に摩耗させる試験であり、300×300×50（厚さ）mm の供試体上面がドーナツ状に摩耗する。

3. 実験結果および考察

3.1 目視観察結果

試験終了後の試験体内面状況を写真-1 に示す。摩耗試験(1)の場合は、普通コンクリート、高強度コンクリートともに、表面の平滑度によらず、目視による観察では、試験体の摩耗は認められなかった。

摩耗試験(2)-A では、最も流入側に近い位置に設置した高強度コンクリートの平滑面仕上げ試験体（60-400-7-S）の流入側下側の一部に摩耗（肌荒れ）が見られた。また、流入側から 2 番目に設置した高強度コンクリートの粗面仕上げ試験体（60-400-7-R）は全体に摩耗が見られた。3 番目の普通コンクリートの平滑面仕上げ試験体（28-400-7-S）では、流入側の下側一部、4 番目の普通コンクリート粗面仕上げ試験体では、全体的に少し摩耗が見られた。しかしながら、いずれも摩耗の程度は、高強

度コンクリートよりも軽微であった。

試験体の設置順序を逆にした摩耗試験(2)-B では、摩耗試験(2)-A とは逆の摩耗状況であり、普通コンクリートの方が高強度コンクリートよりも摩耗の程度が激しかった。

これらの試験結果から、本試験で行った試験体 4 本を直列に配置する方法では、試験体の設置位置により摩耗状況が異なることがわかった。すなわち、流入側において、循環水に乱れが生じ、渦が発生して、コンクリート面に摩耗が生じたものと推測される。これは、試験体と試験体、あるいは、試験体と鋼製の配管との間に設置したゴム製のパッキンが、試験体を締めつけて設置する際に、内面へはみ出したことに起因していると考えられる。



28-40-7-R 28-40-7-S 60-40-7-R 60-40-7-S

(a) 摩耗試験(1)



28-400-7-R 28-400-7-S 60-400-7-R 60-400-7-S

(b) 摩耗試験(2)

写真-1 試験体内面状況

3.2 試験体厚さによる評価

摩耗試験体の厚さの測定は、図-7 に示すように流入側を A 断面、流出側を B 断面とし、各断面について 8 ヶ所で測定を行った。また、試験実施期間中は測定点①が上側となるように、全ての試験体を設置した。

摩耗量の算定は、試験前と試験後の断面厚さの差をとるものとし、摩耗量がマイナスの値となるものについては、摩耗していないものとみなし、摩耗量の差を 0.00 と表すものとした。

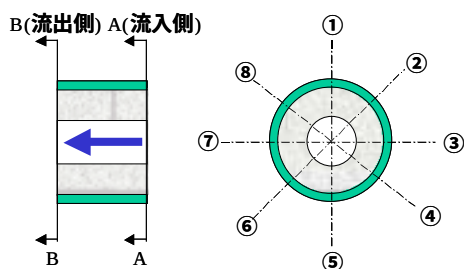


図-7 試験体内面状況

摩耗量の平均値一覧を表-7 に、試験実施時間と摩耗量の関係を図-8 に示す。摩耗量の測定結果をみると、流出側の B 断面よりも、流入側である A 断面の方が摩耗量が大きい傾向が見られた。これは、目視による評価においても明らかであり、流入側において、装置の関係上循環

水に乱れが生じ、渦が発生してコンクリート面に摩耗が生じたためと推測される。すなわち、試験体厚さの変化において、A 断面における摩耗量の値には、これらの要因の影響が含まれていると考えられ、試験体厚さの変化は流出側である B 断面について評価するものとした。

B 断面(流出側)での試験体厚さの変化では、循環水の砂の濃度が 40ppm(摩耗試験(1))の場合、平滑面と粗面では、粗面のコンクリートの方が摩耗しており、普通コンクリートでは 3.8 倍、高強度コンクリートでは 2.0 倍の摩耗量の増加がみられた。また、400ppm(摩耗試験(2))の場合は、40ppm(摩耗試験(1))よりも平滑面、粗面とも摩耗量が増加する傾向がみられた。しかし、表面仕上げの違いによる摩耗量の差(平滑面摩耗量/粗面摩耗量)はほとんどなく、普通コンクリートでは 0.8 倍、高強度コンクリートでは 1.3 倍である。なお、各試験体において摩耗の傾向は現れるものの、摩耗量は全て微量であり、試験前の試験体厚さに対して最大(試験体 28-400-7-S)でも 0.6%程度である。

表-7 摩耗量の平均値一覧

循環水の 砂の濃度	コンクリ ート種類	内面 処理	摩耗量の平均値(mm)	
			A 断面 (流入側)	B 断面 (流出側)
40ppm	普通	平滑	0.07	0.04
		粗	0.24	0.15
	高強度	平滑	0.17	0.06
		粗	0.73	0.12
400ppm	普通	平滑	0.58	0.39
		粗	0.42	0.30
	高強度	平滑	0.31	0.23
		粗	0.57	0.29

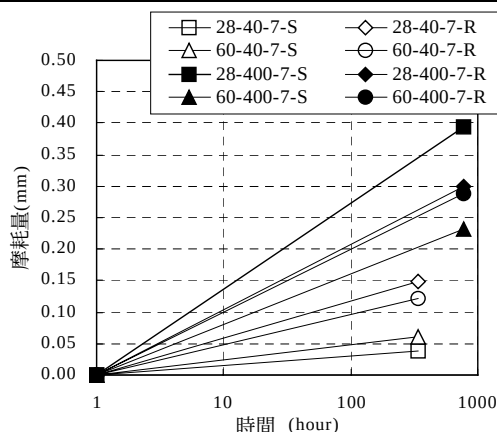


図-8 B 断面における試験時間と摩耗量の関係

3.3 回転円盤機による耐摩耗試験結果

水平なコンクリート表面の耐摩耗試験での経過時間と摩耗量の関係を図-9 に示す。本試験は、回転円盤機を用いて 3 個の摩耗輪と研磨剤により試験体表面を強制的に

摩耗させるため、摩耗量を高速流水中の砂礫による摩耗試験結果と直接比較することはできないが、30分以降においては、普通コンクリートの方が摩耗量が大きくなっており、この結果からも長期的な摩耗に対しては、高強度コンクリートの方が若干有利と考えられる。

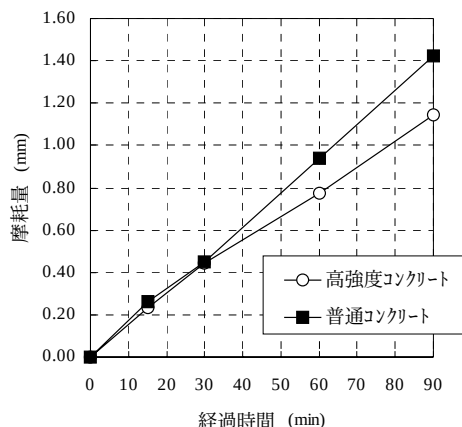


図-9 水平なコンクリート表面の耐摩耗試験での経過時間と摩耗量の関係

4. 試験方法の評価

今回の摩耗試験は、試験体設置順序が摩耗量に与える影響は少ないと考え、条件の異なる4つの試験体について、同時に試験を実施することにより、試験時間の短縮を図った。

摩耗試験(1)では、循環水砂の濃度が40ppmと低いため、その影響については顕著に表れなかったが、摩耗試験(2)については、中間計測時(391時間)において、流入側に最も近い高強度コンクリートA断面付近に目視で確認できる摩耗があった。これは、3.1(1)で述べたように、試験体と鋼製の配管との間に設置したゴム製のパッキンが、試験体を締めつけて設置する際に、内面へはみ出したことに起因していると考えられる。すなわち、各試験体の摩耗性状の違いを正確に比較するためには、試験体毎に試験を行う必要があると考えられる。

試験体内を流れる循環水の流速の管理は、2.2(3)で述べたように、4B管に取付けられた流量計により測定を行い、 $4.4\text{m}^3/\text{min}$ 程度となるように管理した。流量を定期的に計測した結果、その変動は、 $3.98\sim 4.44\text{m}^3/\text{min}$ の範囲内であった。また、この時の流速の変動は、 $7.00\sim 6.27\text{m}/\text{sec}$ であり、概ね設定値を満足しているものと考えられる。

試験装置を長時間稼働させるため、水槽および配管、ポンプに温度計を設置し、その温度計測を行った。試験開始時の温度は 30°C 前後と各部とも安定しているが、装置稼働中温度は、水槽外壁部および配管部で 50°C 前後、ポンプ部は 90°C 前後に達していた。これらの温度上昇は、試験装置を長時間連続稼働させたことによる。

5. まとめ

今回の試験結果より得られた知見を以下に示す。

(1) 試験体の摩耗について

- ・摩耗試験(1)(40ppm)では、高強度コンクリート、普通コンクリートともに、表面の平滑度に関わりなく試験時間340時間の範囲内では、試験体の摩耗は目視観察では全く認められなかった。また、計測による摩耗量は認められるものの、その量は微量である。

- ・摩耗試験(2)(400ppm)では、試験体の設置順序によって摩耗状況に差が認められた。

- ・摩耗試験(2)において、試験終了時点(771時間)で、高強度コンクリート、普通コンクリートともに平滑面仕上げ試験体では、摩耗は流入側下側の一部にわずかに摩耗が認められるのみで、その他の部分はほとんど摩耗が認められなかった。

- ・摩耗試験(2)の粗面仕上げの試験体では、高強度コンクリート、普通コンクリートともに目視観察では全体的に摩耗している。

- ・目視観察および計測結果より、高強度コンクリートの平滑面が最も耐摩耗性に優れていることが確認できた。

(2) 長期的な摩耗量の予測について

- ・通常時の循環水中に含まれる可能性のある砂礫の濃度(40ppm)とした場合、試験の実施期間は短時間ではあったが、いずれの試験体においてもほとんど摩耗が見られなかった。したがって、長期間の供用中、急激にコンクリートの摩耗が進行するとは考えにくく、高強度コンクリート、普通コンクリートともに、かなり長期間の寿命を有するものと推定される。

- ・台風などで冷却水として使用する海水に含まれる砂礫が多くなった場合、連続して砂礫の濃度が高いまま使用すると、コンクリート製パイプ内面に摩耗が生じることが懸念される。

- ・一部に摩耗が生じた場合、その部分の摩耗が急激に進行するかどうかについては、今回の試験の範囲内では結論を下すことはできない。

ただし、高速流水中の砂礫濃度が低い場合は、コンクリート強度の違いよりも、コンクリート表面の平滑度の影響が大きく、平滑面が耐摩耗性に優れている。砂礫濃度が高い場合や水平なコンクリート表面の耐摩耗試験では、高強度コンクリートを用いた方が、耐摩耗性に優れているとの結果が得られた。また、長期間の供用中、急激にコンクリートの摩耗が進行するとは考えにくく、今回の結果より、高流速、大容量パイプへのコンクリートの適用は十分に可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 笹倉伸晃，舟橋政司，細見栄一，広野雅男：高速流水中の砂礫によるコンクリートの摩耗に関する実験的研究，第58回土木学会年次学術講演概要集，V-5，2003.9