

論文 ポーラスコンクリートの耐久性に関する実験的研究

吉田 宗久*1・玉井 元治*2

要旨：ポーラスコンクリートを水際あるいは水中で使用する場合、流水等に含まれる輸送粒子による摩耗や衝撃破壊が心配される。本研究では、ポーラスコンクリートの摩耗のうち、すり磨き作用ならびに突き砕き作用に対する抵抗性について検討を行った。その結果、いずれの摩耗形態でもポーラスコンクリートの摩耗量は摩耗時間に比例し、単位時間当たりの摩耗量を求めることができた。また、すり磨き作用での摩耗抵抗性は空隙率と逆比例の関係であった。また、硬化初期の段階においては、材齢が同じであれば空隙率が小さいほど摩耗抵抗性が高かった。

キーワード：ポーラスコンクリート、耐摩耗性、耐久性、空隙率、ASTM

1. はじめに

ポーラスコンクリートは内部に多数の連続空隙を有することから生物の生息が可能で、環境創造材料として水辺環境等において幅広く利用されている^{1),2)}。ポーラスコンクリートを水際あるいは水中で使用する場合、流水等に含まれる輸送粒子による摩耗や衝撃破壊が心配される^{3),4)}。ポーラスコンクリートの耐久性を考える上で、摩耗抵抗についての検討が必要である。

一般にコンクリート表面がうける摩耗作用は、表面に沿ったすり磨き作用と、水流中の砂や砂利による突き砕き作用がある⁵⁾。これらの摩耗作用の評価方法として、国外ではASTMにおいて試験方法が標準化されている。ASTM C1138は、水中におけるコンクリートの摩耗に対する相対的な抵抗を判定する方法で、シルト・砂・砂利など水中の輸送粒子による摩耗作用を想定している⁶⁾。それ以外にASTM C779とASTM C944は回転カッター等によりコンクリート表面を強制的に摩耗させる方法であり、ASTM C418はコンクリート表面に高压空気で砂を吹きつけ摩耗を試験する方法である。これらの試験方法は、気中におけるコンクリート表面の摩耗試験を想定している。

我が国では骨材自身の突き砕き作用に対する

抵抗性を試験する方法としてJIS A 1120, JIS 1121があるが、コンクリートの摩耗試験方法については標準化された方法はない。堀口らはASTM C1138と類似した方法として、鋼球を使って鉛直方法からの衝撃作用でコンクリート表面を摩耗させる試験方法を提案し、ASTMの各種摩耗試験の結果と比較検討している⁷⁾。

ポーラスコンクリートの摩耗特性に関する研究として、ラベリング試験により舗装用ポーラスコンクリートと高機能アスファルトの摩耗特性を比較した報告がある⁸⁾。しかし、ポーラスコンクリートの各種物性と摩耗抵抗との関係や、水中での摩耗特性についての研究報告は少ない。

本研究は、ポーラスコンクリートの摩耗特性について検討を行ったものである。水流中の砂や砂利による摩耗を想定した実験を実施し、突き砕き作用による摩耗特性を検討した。また、すり磨き作用に関する摩耗特性として、排水性コンクリート舗装等を想定して別途実施した摩耗実験の結果を合わせた報告した。

2. 実験概要

2.1 摩耗試験1 (すり磨き作用)

(1) 使用材料ならびに配合

実験に用いた材料を表-1に示した。セメン

*1 奥村組土木興業(株)環境開発事業本部技術部技術開発課 工修 (正会員)

*2 近畿大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

表－1 使用材料

試験種類	種類	性質
摩耗試験 1	セメント	普通ポルトランドセメント (D社製) 密度 3.16g/cm ³
	粗骨材	淀川産砕石 粒径 2.5-7.0mm 密度 2.59g/cm ³ 実積率 54.7%
	混和剤	ナフタリン系高性能減水剤 (K社製), 密度 1.21 g/cm ³
摩耗試験 2	セメント	高炉セメントB種 (T社製) 密度 3.04 g/cm ³
	粗骨材	兵庫県西島産砕石 粒径 5-15mm 密度 2.69 g/cm ³ 実積率 59.5%
	混和材	シリカヒューム (K社製) 密度 2.10 g/cm ³
	混和剤	ポリエーテル系高性能減水剤 (K社製), 密度 1.10 g/cm ³

トはD社製の普通ポルトランドセメントを、高性能減水剤はK社製のナフタリン系を用いた。骨材には淀川産砕石を使用した。セメントペーストの配合は水セメント比(W/C)を25%とし、高性能減水剤を適量添加した。結合材量は骨材の空隙に対してそれぞれ体積比で30, 40, 50%とした。配合を表－2に示した。また、普通コンクリートはW/C=50%, スランプ8cm, 圧縮強度27Mpaのものとした。

(2) 供試体の作製方法

水、高性能減水剤、セメントをペーストミキサーにより3分間攪拌し、所定量の砕石とともにパン型の強制攪拌式ミキサーを用い3分間混

練した。ポーラスコンクリートの供試体はコテ型バイブレーター(9000vpm)を使用して30×30×10cmの鋼製型枠に2層詰め打設した。24時間後脱型し、所定の材齢(7, 14, 28日)まで、それぞれ20±2°Cにおいて気中養生を行った。普通コンクリートの供試体も同様の寸法のものを用い、コンクリートはφ16×50cmのつき棒を使用してJIS法に準じて打設し作製した。

(3) 試験方法

試験には、写真－1に示す摩耗試験機(T社製)を使用した。この試験機には鋼製の摩耗ヘッド(φ6.5, 重さ4.8kg)が3連あり、図－1に示すように、それぞれの摩耗ヘッドは152rpmで回転し、全体も12rpmで大きく回転する構造となっている。摩耗面に珪砂と水を供給しながら供試体を強制摩耗した。摩耗量の測定は2時間毎に、マイクロメーターを使用して1/1000mm単位で3点の摩耗深さを測定しその平均値を測定値とした。測定は6時間後まで実施した。この試験方法はASTM C779に類似したもので、ポーラスコンクリート表面に沿ったすり磨き作用に対する摩耗抵抗性を評価する。

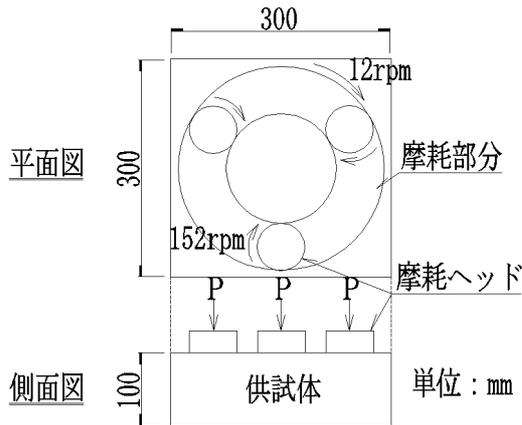
2.2 摩耗試験2(突き砕き作用)

(1) 使用材料と配合

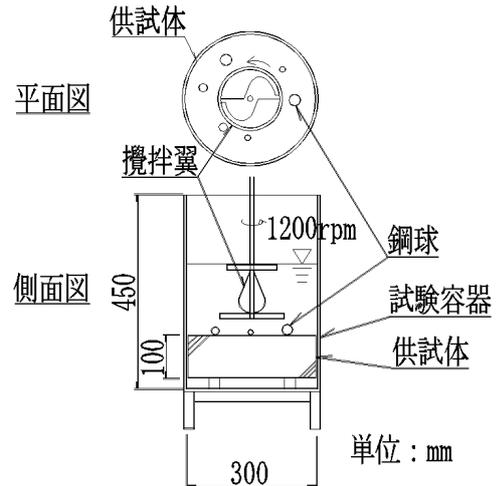
使用した材料を表－1に、供試体の配合を表－2示した。セメントはT社製の高炉セメントB種を、高性能減水剤はK社製のポリエーテル系、粗骨材は兵庫県西島産の砕石を使用した。

表－2 配合表

試験種類	配合記号	粗骨材の最大寸法(mm)	W/C (%)	B/V (%)	空隙率 (%)	単位量(kg/m ³)					
						水 W	セメント C	混和材 SF	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
摩耗試験 1	P1	7	24	30	32	57	238	0	0	1466	4.8
	P2	7	24	40	27	76	317	0	0	1466	6.3
	P3	7	24	50	23	95	396	0	0	1466	7.9
	N1	7	50	—	0	204	408	0	743	982	4.8
摩耗試験 2	P4	15	30	45	23	81	279	0	0	1601	2.8
	P5	15	30	55	17	107	342	26	0	1601	3.7
	N2	15	63	—	5	161	256	0	822	1019	0.6



図－１ 摩耗試験機の概略図
(摩耗試験 1)



図－２ 摩耗試験機の概略図
(摩耗試験 2)



写真－１ 摩耗試験機の外観 (摩耗試験 1)



写真－２ 摩耗試験機の内部 (摩耗試験 2)

結合材量は骨材の空隙に対してそれぞれ体積比で 45, 55%とした。また、普通コンクリートの仕様は摩耗試験 1 と同様とした。ただし、W/C のみ既存研究との継続性から 63%とした。

(2) 供試体の作製方法

摩耗試験 1 と同様に、セメントペーストを所定量の砕石とともにパン型の強制ミキサーを用い 3 分間混練した。ポーラスコンクリートの供試体はコテ式バイブレーター (9000vpm) を使用して $\phi 30 \times 10\text{cm}$ の鋼製型枠に 2 層詰めで打設した。24 時間後脱型し所定の材齢 (28 日) まで気中養生した。普通コンクリートの供試体も同様の寸法のもので製作した。

(3) 試験方法

摩耗試験は ASTM C1138-97 に準じて行った。摩耗試験機は図－2 に示すように、試験容器と攪拌翼で構成されている。写真－2 に示すように、試験容器の中に供試体をセットし、その上

に所定の数量の鋼球を入れて試験容器に注水する。攪拌翼を回転数 1200rpm で 12 時間運転した。供試体の水中質量ならびに表乾質量を測試験前後で測定して摩耗損失量を求める。

この試験は、水流により鋼球が供試体表面を 3 次元的に移動することから、供試体の表面に摩耗が突き砕き作用として働く。この試験では摩耗量として供試体の損失体積が得られる。

2.3 圧縮試験ならびに空隙率

各供試体の圧縮強度ならびに空隙率を必要に応じて測定した。圧縮強度試験は JIS A1108 に準じて行った。空隙率は「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法 (案)」の容積法⁹⁾に準じて行った。

3. 結果ならびに考察

3.1 摩耗試験 1

(1) 摩耗時間と摩耗深さの関係

写真-3は、摩耗試験機で6時間摩耗させた供試体の表面状況である。この試験方法ではポーラスコンクリートの表面にすり磨き作用で摩耗を与えるため、この写真のように摩耗ヘッドが接触する部分が平滑となった。

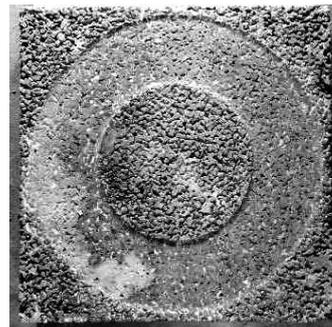


写真-3 試験の供試体（摩耗試験1）

摩耗試験による摩耗時間と摩耗深さの関係を配合別に図-3に示した。いずれの配合も摩耗深さは摩耗時間とほぼ比例の関係にあった。また、P2タイプとP3タイプに比べると空隙率の大きいP1タイプで大きな摩耗深さとなった。空隙率が大きいほど摩耗深さが大きくなる傾向が見られた。

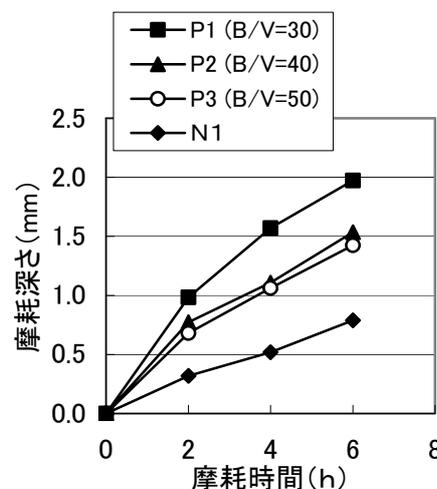


図-3 摩耗時間と摩耗深さの関係

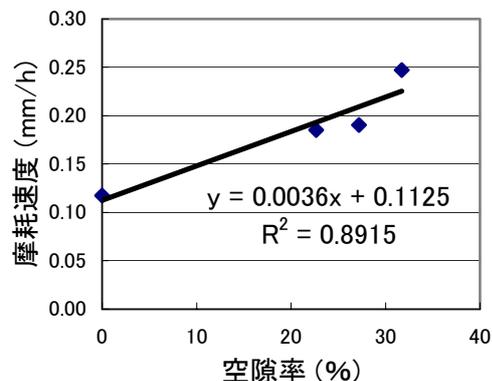
ポーラスコンクリートの配合ケースでは、摩耗時間2時間までの摩耗量が、その後のものより大きな値となった。最初は表層部のセメントペーストが摩耗して削り取られ、その後は剥き出しになった粗骨材の摩耗に移行したと考える。また、普通コンクリートでは、一般に単位面積当りの摩耗量は表面付近において大きくなるとされている。それはブリージングに伴い水セメント比が大きくなり、密度と強度が低いためである。N1タイプの供試体はコンクリート打設底面を摩耗試験面として用いたため、ブリージング等の影響がなく、摩耗量と摩耗時間がほぼ一次の線形関係になったと考える。

表-3 摩耗速度

配合	摩耗速度 (mm/h)	摩耗速度の比
P1	0.2473	2.10
P2	0.1905	1.62
P3	0.1853	1.58
N1	0.1175	1.00

(2) 摩耗速度と空隙率の関係

摩耗時間が2時間から6時間までのデータを使って、最小二乗法で摩耗速度（単位時間当たりの平均摩耗深さ）を求めた。表-3に摩耗速度ならびにN1タイプを基準とした摩耗速度の比を示した。P1タイプの摩耗速度は普通コンクリートの2.1倍であった。



次に、空隙率（全空隙）と摩耗速度の関係を図-4に示した。空隙率が大きくなると摩耗速度が大きくなる傾向がみられた。ポーラスコンクリートの空隙率を小さくすれば、摩耗に対する抵抗性は向上すると考える。

図-4 空隙率と摩耗速度の関係

(3) 材齢と摩耗深さの関係

供試体の材齢を7, 14, 28日として、材齢と摩耗深さの関係を図-5に示した。ただし、

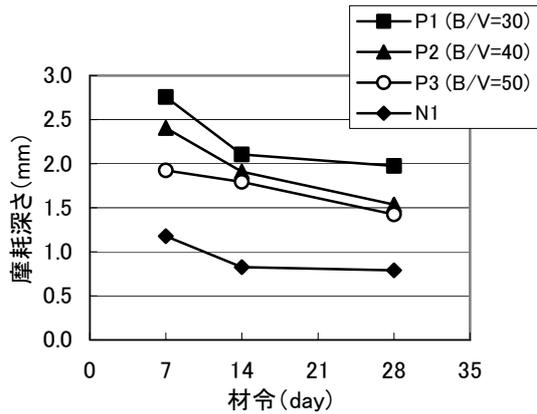


図-5 材齢と摩耗深さの関係

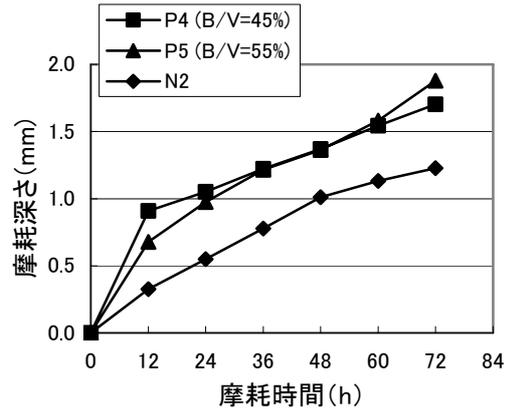


図-6 摩耗時間と摩耗深さの関係

摩耗深さの値は摩耗時間6時間のものである。ポーラスコンクリートの配合ケースでは、材齢が進むに従い摩耗抵抗性が高くなった。また、同一材齢であれば空隙率の小さいポーラスコンクリートほど摩耗抵抗性が高かった。

3.2 摩耗試験 2

(1) 摩耗時間と摩耗深さの関係

写真-4は、累積72時間の摩耗試験を経た供試体の状況である。この試験方法ではポーラスコンクリートの表面に突き砕き作用を与えることになるが、試験中に骨材の欠落等の破壊は観察されなかった。摩耗深さは摩耗による損失重量から換算している。供試体の空隙分を割増補正したのちに、供試体の表面積で除して平均的な摩耗深さを求めた。

この摩耗深さと摩耗時間の関係を配合別に図-6に示した。いずれの配合においても、摩耗深さは摩耗時間とほぼ比例の関係であった。P4



写真-4 試験後の供試体（摩耗試験2）

表-4 摩耗速度

配合	摩耗速度 (mm/h)	摩耗速度の比
P4	0.0132	0.76
P5	0.0183	1.06
N2	0.0173	1.00

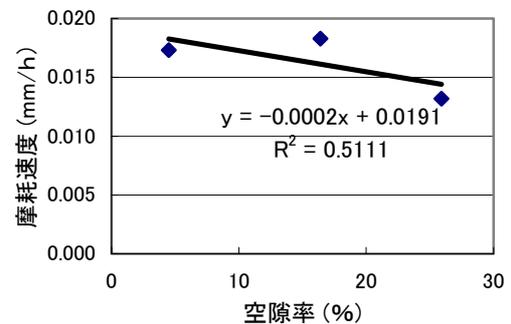


図-7 空隙率と摩耗速度の関係

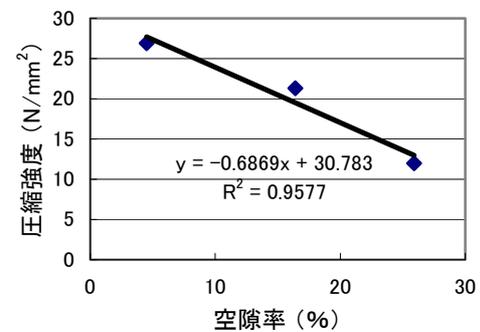


図-8 空隙率と圧縮強度の関係

タイプと P5 タイプでは、摩耗深さに大きな差は見られなかった。また、ポーラスコンクリートの配合では、摩耗時間 1 2 時間までの摩耗量が、その後のものより大きな値を示した。これは摩耗試験 1 と同様の理由と考える。

(2) 摩耗速度

摩耗時間が 1 2 時間から 7 2 時間までのデータを使って、摩耗速度を求めた。表 4 に摩耗速度ならびに N2 タイプを基準とした摩耗速度の比を示した。また、図 7 と図 8 に空隙率と摩耗速度、圧縮強度の関係を示した。P3 タイプでは N2 タイプより摩耗速度が大きくなったが、空隙率の大きな P4 タイプでは逆に N2 タイプより摩耗速度が小さくなった。これは摩耗試験 1 と異なる傾向であった。使用したポーラスコンクリートは、図 8 に示すように空隙率と圧縮強度が反比例の関係にあり、既存の知見^{9),10)}とも一致している。

今後、ポーラスコンクリートの突き砕き作用による摩耗機構の解明が必要である。また、摩耗速度は 1 2 時間から 7 2 時間までの短期間のデータを用いていることから、長期の摩耗についての検討も必要である。

5. まとめ

以下に、本研究により得られた結果を示す。

- (1) すり磨き作用、突き砕き作用のいずれの摩耗試験においても、ポーラスコンクリートの摩耗深さは摩耗時間に比例した。
- (2) すり磨き作用での摩耗では、ポーラスコンクリートの空隙率が大きくなると摩耗速度が大きくなる傾向が見られた。
- (3) 材齢 2 8 日までのすり磨き作用の摩耗では、材齢とともに摩耗抵抗性が高くなり、同一材齢であれば空隙率が小さいポーラスコンクリートほど摩耗抵抗性が高かった。
- (4) 突き砕き作用に関する摩耗実験では、摩耗速度と空隙率に明確な関係は得られなかったが。

謝辞 本研究の一部には、平成 13 年度文部科学省科学研究費（基盤研究 B-2 13450182）の資金によったものであり、ここに記して感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 玉井元治：地球環境とコンクリートポーラスコンクリート，エココンクリートのはたす役割－，セメント・コンクリート，No. 619，pp. 1-9，1998. 9
- 2) 吉田宗久，玉井元治：沿岸域の生物多様性を修復するポーラスコンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 1，pp. 181-186，2001
- 3) 岡本享久ほか：ポーラスコンクリートの製造・物性・試験方法，コンクリート工学，Vol. 36，No. 3，pp. 52-62，1998. 3
- 4) 財団法人先端建設技術地センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き，山海堂，pp. 48-52，2001
- 5) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 2000，社団法人日本コンクリート工学協会，pp. 78-89，2000. 9
- 6) ASTM C1138-97：Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)，Annual Book of ASTM Standards 2001
- 7) 堀口 敬，猪又 稔：コンクリートに関する各種の摩耗試験法の特性について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 1，pp. 685-690，1992
- 8) 松本公一ほか：舗装用ポーラスコンクリートの耐摩耗性について，土木学会第 56 回年次学術講演会，V-099，2001. 10
- 9) 社団法人日本コンクリート工学協会：エココンクリート研究委員会報告書，1995. 11
- 10) 吉田宗久，米本龍史，玉井元治：沿岸海に適用した鉄系骨材を含むポーラスコンクリートの性質，土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集，V-230，2001. 10