

# ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性評価に関する実験的研究

中川武志<sup>\*1</sup> 畑中重光<sup>\*2</sup> 三島直生<sup>\*2</sup> 犬飼利嗣<sup>\*3</sup>

\*1 三重大学 大学院工学研究科 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)  
 \*2 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)  
 \*3 東海コンクリート工業株式会社 (〒511-0274 三重県いなべ市大安町大井田 2250)

要旨：ポーラスコンクリートは植生護岸や透水性舗装に使われることが多いため、その表面は摩耗や骨材の剥脱に対して十分な抵抗性をもつことが求められる。しかし現在、この抵抗性を評価する適切な方法がない。そこで、耐摩耗・剥脱性の評価方法の確立を目的として、改良した奥田式すりへり試験法により、結合材強度、空隙率、骨材粒径、鋼片形状、締固め方法、流水の有無等を因子として実験を行った。その結果、結合材強度 90N/mm<sup>2</sup> の条件において、空隙率 23% 程度までの範囲では空隙率のすりへり速度に対する影響は小さいこと、一方、空隙率 20% の条件では結合材強度が小さくなるとすりへり速度が大きくなり、耐摩耗・剥脱性が低下することがわかった。

キーワード：ポーラスコンクリート、耐摩耗性、耐剥脱性、奥田式すりへり試験、舗装

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

ポーラスコンクリートは、環境改善に対する機能が期待され、透水性舗装や護岸工法などの多くの場で使用されている。ポーラスコンクリートは路盤や護岸の表層を構成することが一般的であるため、経年または劣化に伴う骨材の剥落・剥脱が発生することが懸念され、それらに対する抵抗性の評価が必要となる<sup>1, 2, 3, 4, 5)</sup>。また、ポーラスコンクリートは打設方法および締固めの程度によって空隙および結合材の分布が変動しやすく、強度もばらつきやすい<sup>6, 7, 8)</sup>。したがって、実用の際には、計画した品質が達成されているか、施工部のメンテナンスが必要かどうかなどを現場で判断できる方法の確立が求められている。

そこで、本研究では、ポーラスコンクリートの摩耗またはすりへりを含む剥脱に対する耐久性の把握のための適切な試験方法<sup>9)</sup>を検討するとともに、ポーラスコンクリートの剥脱メカニズムの把握を試みる。本報告では、奥田式すりへり試験を採用し、その試験方法について改良できる点を検討するとともに、各種要因の影響を把握するための実験を実施した。

### 1.2 研究のフローと本報告の位置づけ

Fig.1 に本研究のフローを示す。最終的には、現場でも可能なポーラスコンクリートの耐剥脱性試験方法の提案を行うことをめざして研究を進めている。本研究におけるポーラスコンクリートの剥脱とは、外部からの物理的な力が加わった場合に、骨材および結合材のすりへり、剥落、飛散等を含めた表面損傷が生じることを意味し (Fig.2)、耐摩耗・剥脱性はそれらに対する原形の保

持能力として定義する。「剥脱」という言葉は、外力によって (ある程度) 強制的に剥がされるという現象を明確にするために、「剥落」と区別して用いている。

これまでに、研究の基礎的段階として奥田式すりへり試験機によるすりへり試験を実施した<sup>10)</sup>。

上述の実験では、奥田式すりへり試験によりポーラスコンクリートの摩耗・剥脱の定量的な評価が可能であることを確認し、耐摩耗・剥脱性に関する基礎的データが得られた。一方、供試体のサイズ、製作方法、および鋼片の形状等、試験の実施条件において改善すべき点も明らかとなった。

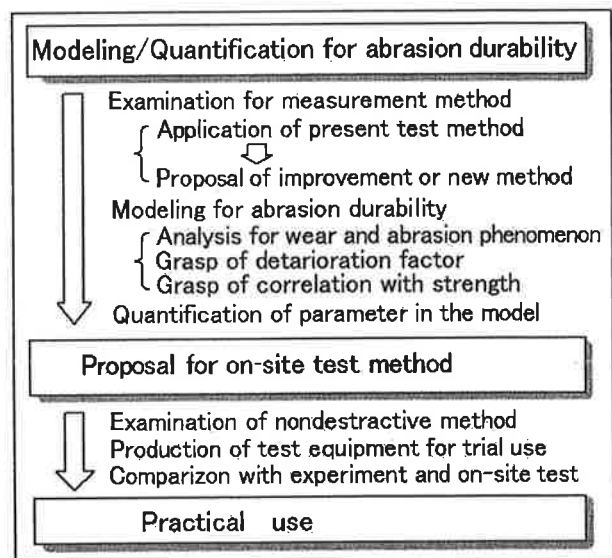


Fig. 1 Flow of study

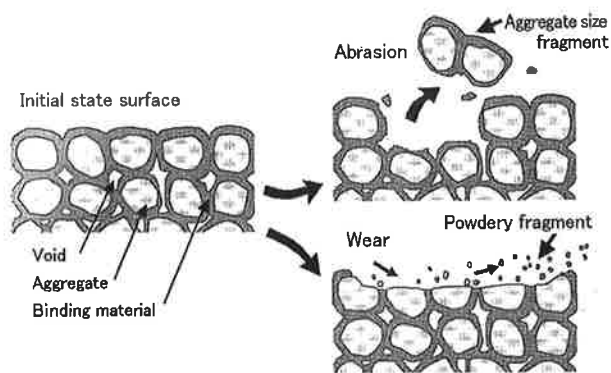


Fig. 2 Abrasion and wear of porous concrete

本論文では、奥田式すりへり試験に対して、供試体製作時の締固め方法、鋼片の形状、流水・乾燥条件の設定、試験結果の整理方法等について改良した試験方法で耐剥脱性試験を行った結果を報告する。

## 2. 試験方法の改良<sup>11,12)</sup>

### 2.1 供試体専用締固め機の製作

ポーラスコンクリートを打設する際、品質確保のため、適切な締固めは重要である<sup>13)</sup>。耐剥脱性試験等の供試体についても、計画した品質を実現する必要がある。製作上の要因によって品質のばらつきが発生することを防止するため、本実験では、高周波バイブレータ(240Hz、48V、5.5A)を組み入れた専用振動圧縮締固め機を製作し、使用した。

本機は供試体の表面全面をカバーする押さえ板により供試体表面を水平かつ平滑に仕上げることができ、また、バイブレータを所定時間作動させることにより締固めエネルギーの安定化が期待できる。

### 2.2 鋼片の形状

奥田式すりへり試験では、円柱状の鋼片(φ29×40mm、20個程度)の使用が標準となっているが、この形状や大きさの影響は不明であるため、その効果を把握する必要がある。今回は、次の3種類を使用した。

- ① 鋼球(小) φ29mm、21個、合計質量 1997g
- ② 立方体 24×24×24mm、18個、合計質量 1966g
- ③ 鋼球(大) 平均φ45mm、5個、合計質量 2011g

これらの鋼片については、試験機の内部を可視化する工夫を行い、予め回転時の状況を把握し、動きが適切であることを確認した。

### 2.3 供試体周辺部防護板の取り付け

奥田式試験機において、試験時に鋼片が供試体型枠に当たり、型枠の振動や変形のために周辺部の剥脱が起こることを防止する対策を施した。

このため本実験では、供試体サイズを300mm×150mmに変更し、以前の150mm×150mmと比べて周辺部の影響を小さくした。さらに、長辺側はやはり影響を受けると考えられるため、この影響を低減するために供試体の型枠周辺部に鋼製防護板を取り付けた。

すりへり面積は、鋼片の形状および試験時間経過と

もに変化するため、今回は、試験後の普通コンクリート供試体表面の実測値から推定することとした。すりへり面積は、鋼球(小、φ29mm)で240cm<sup>2</sup>程度、立方体で220cm<sup>2</sup>程度、鋼球(大、平均φ45mm)で244cm<sup>2</sup>程度であった。

### 2.4 耐剥脱性試験のデータ整理方法

耐剥脱性(すりへり)試験は、各種の材料に対して実施することを想定し、データを可能な限り同一の評価方法で取り扱うことが望ましい。例えば、流水の有無を要因として実施する場合にはそれぞれ、水中・気中での評価となり、これらを直接的に比較できるように補正する必要がある。

すりへり減量は計測した供試体の水中重量の差を気中重量差に換算して求め、すりへり係数は、式[1]を用いて求めた。

$$A_c = V/A \tag{1}$$

- ここに、 $A_c$  : すりへり係数 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>)、  
 $V$  : すりへり体積 (cm<sup>3</sup>)=W/D、  
 $W$  : すりへり減量 (g)= $W_1 - W_2$ 、  
 $W_1$  : 試験前の試験体質量 (g)、  
 $W_2$  : すりへり後の試験体質量 (g)、  
 $D$  : 試験体のかさ密度 (g/cm<sup>3</sup>)、  
 $A$  : すりへりを受けた面積 (cm<sup>2</sup>)

各種ポーラスコンクリートの摩耗・剥脱の比較のための指標には、実験結果についての経過時間とすりへり係数の関係から原点を通る直線近似式を求め、その傾きをすりへり速度と定義して用いる。

## 3. 実験の概要

### 3.1 実験の水準と要因

本実験の要因および水準をTable 1に示す。ポーラスコンクリートの特性に影響を及ぼす要因<sup>13,14,15)</sup>は各種考えられるが、本実験では表中の網かけ部を基本水準として、空隙率、結合材強度、骨材粒径、鋼片形状、流水の有無、供試体製作時の締固め方法の影響を調べた。

なお、本報告において、試験条件をFig 3のように略記する。

Table 1 Variables and levels in experiment

Variables	Levels
Void ratio	15%, 20%, 25%, Normal con.(3%)
Strength of binder	130 N/mm <sup>2</sup> , 90 N/mm <sup>2</sup> , 40 N/mm <sup>2</sup>
Aggregate size	No.7(2.5~5mm), No.6(5~13mm), No.5(13~20mm)
Shape of steel piece	Sphs.(φ29), Cubic, Big sphs.(D45)
Water condition	Water supplied, Without water
Tamping method	Tamping equipment, Static compacting

Note)   : Basic level

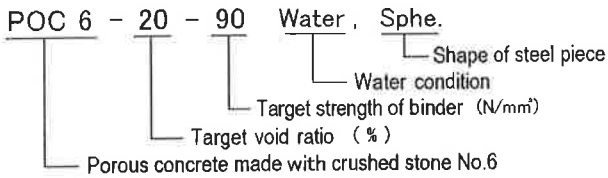


Fig. 3 Simplified expression for test condition

3.2 供試体およびその製作方法

Table 2 に使用したコンクリートの調合表を示す。また、Table 3 に使用材料を示す。

供試体製作用のポーラスコンクリートの練り混ぜは、ペースト先練りとした。また、試練りにおいて、ペーストが目標フロー値となる混和剤の量を決定した。締固めには 2.1 節に示す専用締固め機を用いることを基本とした。打設後、圧縮強度試験用供試体については、24 時間経過をめぐり型枠を外し、28 日間の水中養生とした。すりへり試験用供試体は 24 時間経過後、水中に移し、28 日間の養生を行った。

すりへり試験用供試体は 300mm × 150mm × 厚さ 60mm で、底面および側面は鋼板（厚さ 1mm）の型枠面となっている。

3.3 試験方法

本報では、奥田式すりへり試験の方法を 2 章で述べた点について改良した試験方法 (Fig. 4) を採用して耐剥脱性試験として実施した。

試験は、1 回に 6 個の供試体を取り付けて試験機を運

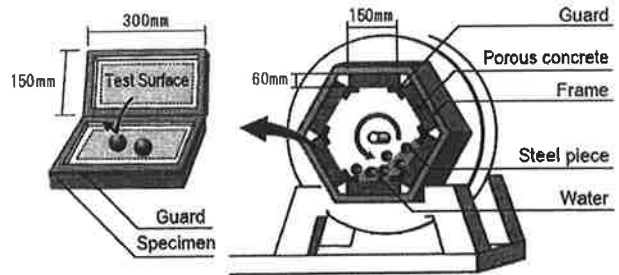


Fig. 4 Improved attrition test instrument

転し、30 分毎に供試体を試験機から取り外して洗浄または粉じんの除去を行い、すりへり減量を測定した。また、表面の状況を観察・撮影した。回転数は 90rpm とし、流水条件の場合 20 l/min の送水を行った。

4. 試験結果

4.1 供試体諸元の測定結果

供試体製作・養生後、供試体の空隙率、かさ密度等の諸元を求めた。すりへり試験用供試体の測定結果を Table 4 に示す。また、すりへり試験の供試体と同じ調合条件で圧縮強度試験用供試体 (φ100 × 200mm の型枠を使用) も製作し、同様に諸元を求めるとともに、JIS A 1132 を参照し、材齢 29 日における圧縮強度試験を行った。また、結合材についても供試体 (φ50 × 100mm の型枠を使用) を製作し、圧縮強度試験を行った。Table 5 および Fig. 5 にその結果を示す。

Fig. 5 における曲線は、ポーラスコンクリート供試体の空隙率と圧縮強度との関係を指数関数として推定した近似曲線である。

今回使用した供試体専用締固め機は、短時間に安定した仕上がりを得られることが製作時に確認できた。Fig. 5 において、供試体によるばらつきが小さいことから締固めが安定的に行われていることが推察できる。

4.2 すりへり試験結果

11 種類の供試体について耐剥脱性試験を 150 分まで

Table 2 Mix proportions of concrete

Spec.	Target void ratio (%)	Target strength of binder (N/mm <sup>2</sup> )	Mixture		Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						
			Water/cement ratio (%)	Super-plasticizer SP/C	Water	Cement	Fly ash	Crushed stone			Fine agg.
								No.5	No.6	No.7	
POC-5	20	90	30	0.1%	121	403	0	1501	0	0	0
POC-6	20	130	25	0.1%	106	424	0	0	1512	0	0
	25	90	30	0.1%	93	309	0	0	1512	0	0
	20	90	30	0.1%	117	390	0	0	1512	0	0
	15	90	30	0.1%	141	471	0	0	1512	0	0
	20	40	30*	0.1%	117	195	141	0	1512	0	0
POC-7	20	90	30	0.1%	130	434	0	0	0	1450	0
Normal con.	-	60	0.6	0.0%	180	300	0	G 1050			\$700

Note 1) Cement paste is mixed previously.  
 2) Flow value of cement paste is measured.  
 3) 28days cured in water.  
 4) G: Coarse aggregate, S: Fine aggregate  
 ※: 50% of cement was replaced by fly ash.

Table 3 Materials of concrete

Cement	Ordinary portland cement	
Aggregate (Hard sand stone)	Solid content (%)	Abrasion loss (%)
	No.5	19.9
	No.6	22.1
	No.7	21.4
Fly ash	Type III	
Chemical admixture	High range water reducing agent	

Table 4 Specifications of test pieces for abrasion test

Spec.	Target value		Tamping method	Number of test piece	Result of measurement	
	Void ratio (%)	Strength of binder (N/mm <sup>2</sup> )			Void ratio (%)※	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )※
POC-5	20	90	T.E.	10	18.7	1.86
	20	90	S.C.	2	24.5	1.81
POC-6	15	90	T.E.	2	7.9	2.01
	20	130	T.E.	2	18.1	1.94
	20	90	T.E.	10	13.8	1.93
	20	90	S.C.	4	18.7	1.92
	20	40	T.E.	2	23.0	1.81
POC-7	25	90	T.E.	2	21.7	1.86
	20	90	S.C.	4	10.0	1.97
Normal con.	20	90	T.E.	2	5.7	2.01
	-	90	T.E.	10	---	2.35

Note) T.E.: Tamping equipment, S.C.: Static compacting  
 ※: Average value

実施し、同一種類供試体各 2 個についてのすりへり量（摩耗・剥脱量）を計測した。

なお、乾燥条件下の結果については気中重量の差からすりへり量を求め、流水条件下の結果については、測定した水中重量の差によるすりへり量の値を気中重量に換算している。

Photo. 1 に、試験終了後の供試体表面の状況例を示す。本実験で設置した型枠部の防護板の効果により、いずれの条件においても周辺の局所的な剥脱は発生せず、供試体の試験面はほぼ均一に摩耗・剥脱が進行していた。

Fig. 6 に、式[1]により求めたすりへり係数と経過時間の関係の例を示す。Fig. 6 において、①、②の番号は同一シリーズ中の供試体番号である。累積のすりへり量は時間経過に伴い、ほぼ一定の勾配で増加している。

#### 4.3 各種条件のすりへりに対する影響

Fig. 7 から Fig. 13 に、各種要因とすりへり速度の関係を示す。すりへり速度は、同水準の複数供試体の平均値である。

Fig. 7 に、空隙率とすりへり速度の関係を示す。空隙率 23% 程度までの範囲であれば、空隙率のすりへり速

度に対する影響は小さいと考えられる。

Fig. 8 に、結合材強度とすりへり速度の関係を示す。空隙率 20% の場合、結合材強度が小さくなると、すりへり速度は大きくなる。

Fig. 9 に、圧縮強度とすりへり速度との関係を示す。圧縮強度が 15N/mm<sup>2</sup> 程度以上になるとすりへり速度が小さくなるとみられる。

Fig. 10 に、骨材の代表寸法（骨材の中心粒径）とすりへり速度の関係を示す。鋼立方体では骨材代表寸法が大きくなるとすりへり速度が大きくなるようにも見えるが、顕著な差はみられない。

Fig. 11 に、鋼片の形状とすりへり速度の関係を示す。ポーラスコンクリートでは、3 種の形状の中では鋼球（φ29mm）および鋼球大（φ45mm）が比較的すりへり速度が大きく、立方体ではやや小さいが、条件により傾向は若干異なる。普通コンクリートでは立方体の場合にすりへり速度が大きいので、立方体の角とポーラスコンクリートの空隙の相対関係にかかわりがある可能性が考えられる。

Fig. 12 は、締固め方法（専用締固め機およびコテ仕

Table 5 Specifications of test pieces for compressive strength test

Spec.	Target value		Result of measurement			
	Void ratio (%)	Strength of binder (N/mm <sup>2</sup> )	Void ratio (%)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Compressive strength ※ (N/mm <sup>2</sup> )	Strength of binder ※ (N/mm <sup>2</sup> )
POC-5	20	90	26.2	1.864	13.3	115.2
POC-6	20	130	24.7	1.915	19.9	141.2
	25	90	30.1	1.786	12.4	115.2
	20	90	24.6	1.893	16.4	
	15	90	17.7	1.998	19.9	
	20	40	29.1	1.791	8.0	40.7
POC-7	20	90	18.7	1.970	19.3	115.2
Normal con.	-	60	2.3	2.367	37.2	-

Note) ※: Average value of three specimens.

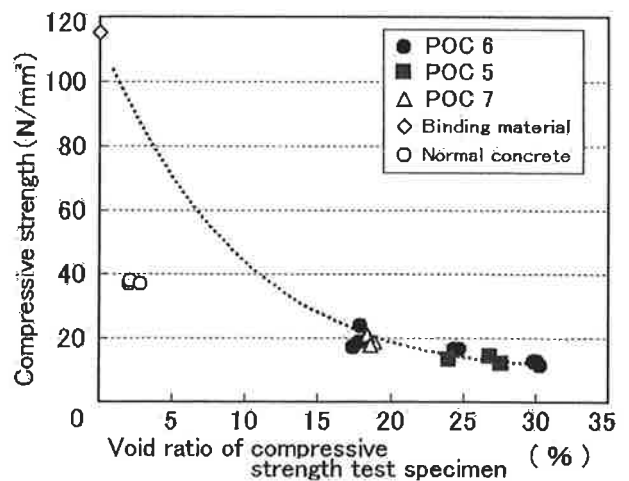


Fig. 5 Relation between compressive strength and void ratio

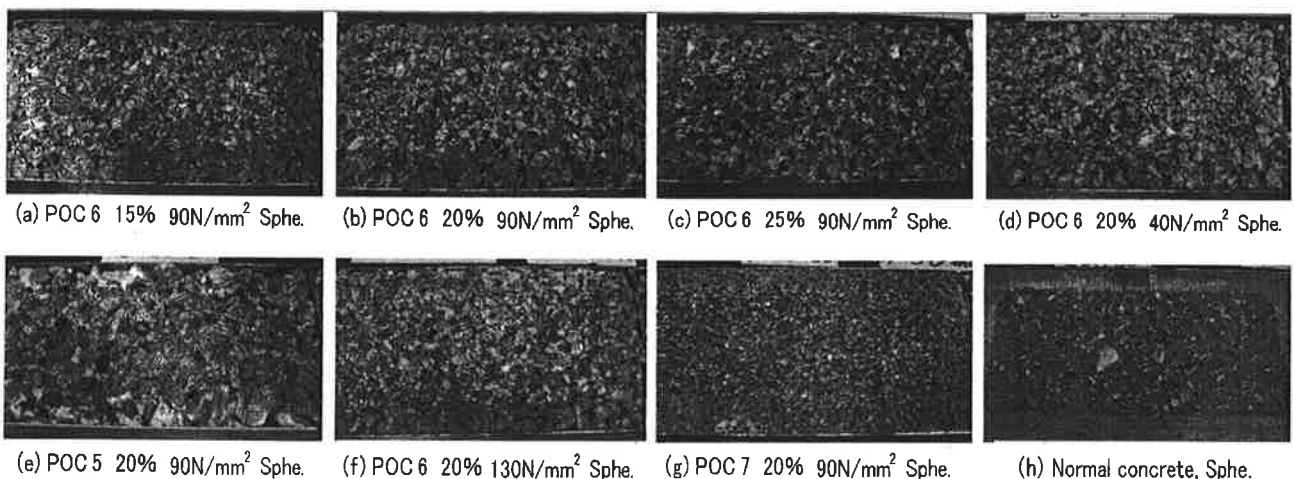


Photo. 1 Surface of specimens after attrition test (under water supplying condition)

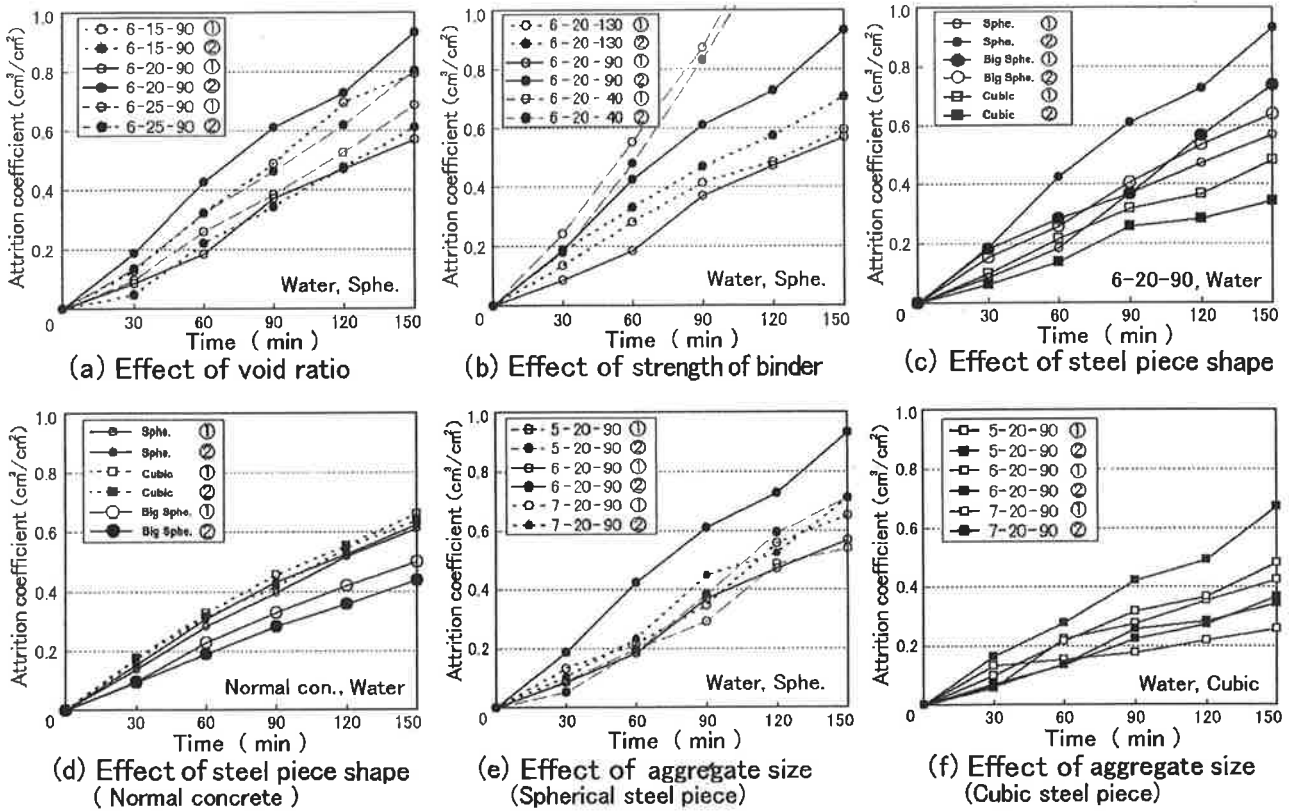


Fig. 6 Relation between attrition coefficient and duration time

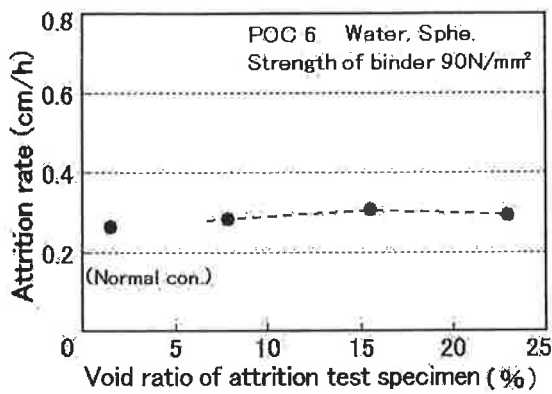


Fig. 7 Relation between attrition rate and void ratio

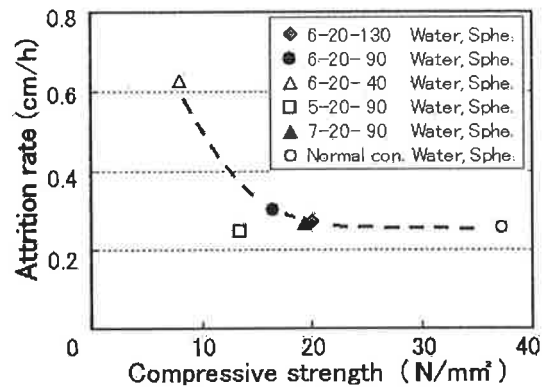


Fig. 9 Relation between attrition rate and compressive strength

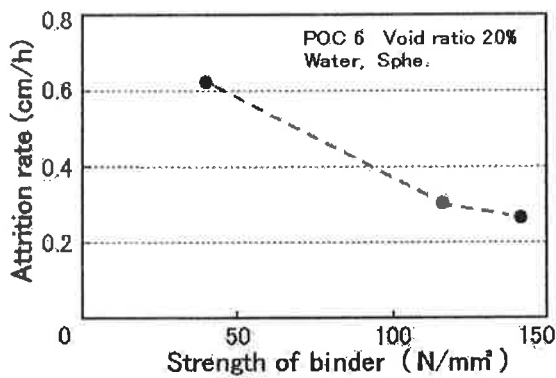


Fig. 8 Relation between attrition rate and strength of binder

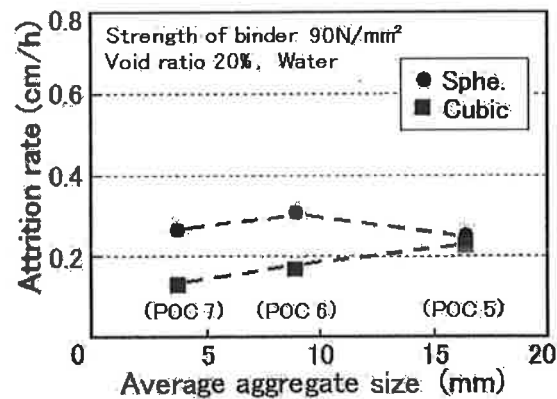


Fig. 10 Relation between attrition rate and aggregate size

上げ)によるすりへり速度の比較である。専用締め機により製作した供試体は、空隙率は同程度であるが、コテ仕上げで製作した供試体に比べてすりへり速度が小さい。

Fig. 13 に、耐剥脱性試験中の流水ありの条件と乾燥条件におけるすりへり速度の比較を示す。流水の有無は、摩耗・剥脱に対して比較的影響が大きいと見られる。必

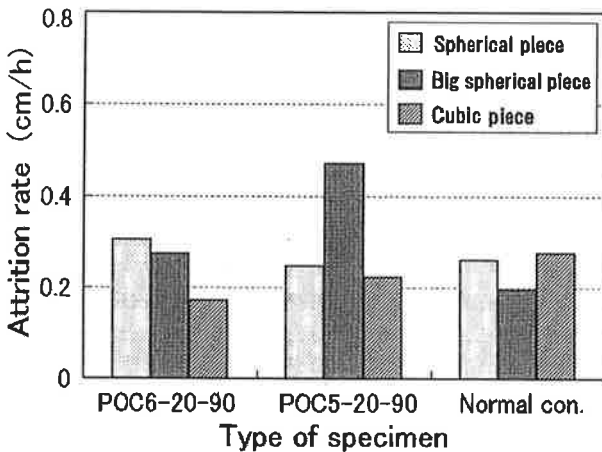


Fig. 11 Effects of steel piece shape on attrition rate

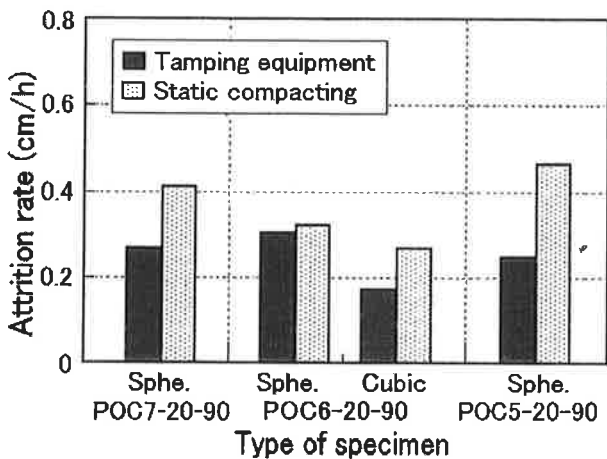


Fig. 12 Effect of use of tamping equipment

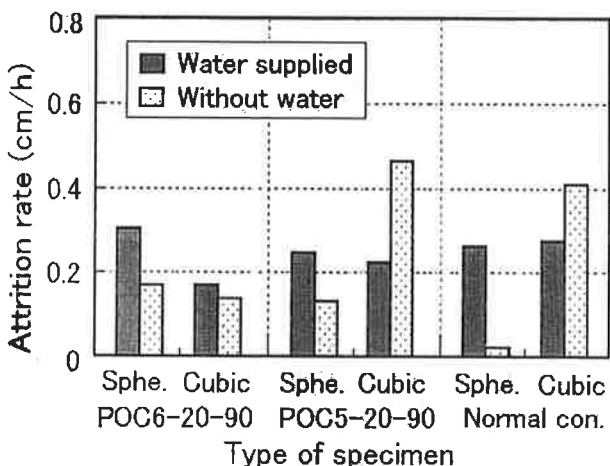


Fig. 13 Effect of conditions of water supply

ずしも明確ではないが、乾燥条件では、対象によりすりへり状況ないしすりへり速度が大きく変わりやすいとみられ、流水条件では傾向が安定化するようである。

### 5. 考察

Photo. 1 に示した試験後の供試体に見られる特徴は、すりへりが支配的なことである。骨材には摩耗による傷が見られ、結合材強度、骨材寸法、空隙率等の条件によらず、骨材の剥脱(剥落、飛散)は少ないと見られる。通常のポーラスコンクリートでは、40N/mm<sup>2</sup>程度以上の結合材強度をもち、今回のように製作方法に十分注意して施工すれば、今回の鋼片程度の衝撃には十分耐え得ることを示唆している。ただし、ポーラスコンクリートの耐剥脱性を評価するための試験方法として、今回の鋼片程度の衝撃荷重が妥当かどうか検討していく必要がある。

鋼片形状の影響について、Fig. 11 で明瞭な傾向がみられないが、試験途中の観察において立方体では細かい剥脱痕もみられた。

また Fig. 7、Fig. 9、Fig. 11 などの実験結果から判断すれば、ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性は普通コンクリートと同程度であると見られる。

なお、今回の試験で、ひび割れを生じていた結合材の供試体において、ひび割れ付近で剥脱の集中が見られた(Photo. 2)。コンクリートおよびポーラスコンクリートの表面にひび割れや打継ぎ目等がある場合の剥脱特性については今後の課題としたい。

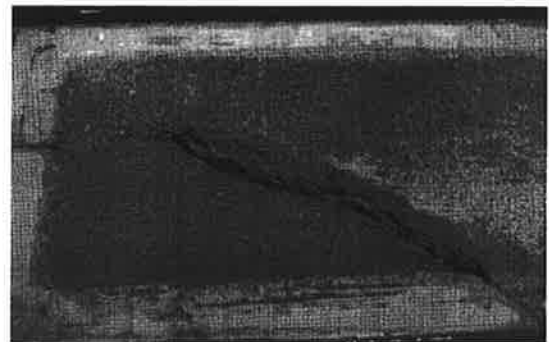


Photo. 2 Specimen with abrasion concentrated in crack

### 6. まとめ

改良した奥田式すりへり試験法を用いた実験の結果から、以下の知見が得られた。

- (1) ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性は、奥田式すりへり試験において、供試体製作のための専用締め機の導入、供試体型枠付近の防護などの改良を行うことにより、ある程度の評価が可能になると考えられる。
- (2) ポーラスコンクリートのすりへり速度を小さくする条件として、結合材強度が大きいこと、圧縮強度がある程度以上大きいこと、などがあげられる。

- (3) ポーラスコンクリートのすりへり速度に対する鋼片の形状の影響は、条件により傾向が異なり、さらなる検討が必要と考えられる。
- (4) ある程度の結合材強度をもつポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性は、普通コンクリートと比較して同程度である。
- (5) ポーラスコンクリートの空隙率および骨材粒径が耐摩耗・剥脱性に及ぼす影響は小さい。
- (6) ポーラスコンクリートのすりへり速度は、振動締固めを行った場合、静的なコテ仕上げの場合より小さくなる。ポーラスコンクリートの打設には適切な締固めが肝要である。
- (7) ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性の実験では、乾燥条件よりも流水条件の方が安定的な結果が得られるものと考えられる。

## 7. 今後の課題

ポーラスコンクリートの剥脱現象が発生する力学的条件についての検討を進めるとともに、耐剥脱性評価に適する試験方法について引き続き検討したい。

また、施工現場における評価方法の開発および耐剥脱性に優れたポーラスコンクリートの施工方法の確立に進展させたいと考えている。

## 謝辞：

実験を実施するにあたり、三重県科学技術振興センターおよび東海コンクリート工業株式会社技術部のご協力を得た。付記して謝意を表する。

## 参考文献：

- 1) 長尾澄雄、伊藤美行：耐摩耗コンクリートに関する配合試験報告書、中部電力株式会社総合技術研究所、pp. 4-5 (1986)
- 2) 吉森和人ほか：ポーラスコンクリートの強度と耐久性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、Vol. 49、pp. 660-655 (1995)
- 3) 浅野嘉津真：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書 (2.4.5 すりへり作用)、日本コンクリート工学協会、pp. 83-85 (2003)
- 4) (社)セメント協会：舗装用ポーラスコンクリート共通試験結果報告、舗装技術専門委員会報告 (1999)
- 5) 吉田宗久、玉井元治：ポーラスコンクリートの耐久性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 24、No. 1、pp. 1185-1190 (2002)
- 6) 山本貴正ほか：ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 27、No. 1、p. 1267-1272 (2005)
- 7) 吉田知弘ほか：ポーラスコンクリートの空隙分布が曲げ強度に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 26、No. 1、pp. 1437-1442 (2004)
- 8) 大谷俊浩ほか：結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 23、No. 1 (2001)
- 9) 藤崎隆一郎、堀口敬、佐伯昇：ポーラスコンクリートの耐摩耗性の評価試験方法、ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp. 143-150 (2003)
- 10) 中川武志ほか：すりへり試験によるポーラスコンクリートの剥脱耐性評価のための基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 27、pp. 1261-1266 (2005)
- 11) 中川武志ほか：ポーラスコンクリートの剥脱耐性評価に関する研究、その 1. 試験方法の検討および実験概要、日本建築学会東海支部研究報告集第 44 号、pp. 33-36 (2006)
- 12) 中川武志ほか：ポーラスコンクリートの剥脱耐性評価に関する研究、その 2. 改良型奥田式すりへり試験機による実験結果、日本建築学会東海支部研究報告集第 44 号、pp. 37-40 (2006)
- 13) 湯浅幸久ほか：ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No. 552、pp. 37-44 (2002)
- 14) 石黒哲、湯浅幸久、畑中重光：ポーラスコンクリートの物理的性質に及ぼす各種要因の影響、日本建築学会東海支部研究報告集、第 38 号、pp. 73-76 (2000)
- 15) 湯浅幸久ほか：ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材強度の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 26、No. 1、pp. 1425-1430 (2004)