

報告 ラベリング試験による耐摩耗性の評価と各種耐摩耗性改善対策の効果検証

新村 亮^{*1}・桜井 邦昭^{*2}・高山 昌大^{*3}・石川 健^{*4}

要旨：水利構造物の耐久性確保には、水流や砂礫・転石の衝撃・摩耗作用に対するコンクリートの耐摩耗性を把握し、適切な対策を行うことが重要である。本報告では試験の汎用性を考慮し、アスファルト舗装の摩耗試験法であるラベリング試験を用いて、コンクリートの摩耗性評価を行うとともに、各種の耐摩耗性改善対策の効果を検証した。その結果、ラベリング試験によりコンクリートの耐摩耗性を評価可能であり、高強度混和材や真空養生によりコンクリート強度を高めることで、耐摩耗性が大きく改善できることなどがラベリング試験により明らかとなった。

キーワード：耐摩耗性、ラベリング試験、圧縮強度、真空養生、高強度混和材

1. はじめに

水路、頭首工、ダム越流部および排砂トンネル等の水利構造物のコンクリートは、水流や砂礫・転石などにより摩耗して耐久性が損なわれる場合が多い。コンクリートの摩耗は、水流や比較的小径の砂礫によるすり磨き作用と、波浪や増水時の砂礫・転石による衝撃作用が主たる要因と考えられている¹⁾。

コンクリートの耐摩耗性の評価試験方法は、以前から多くの研究がなされており^{2)~4)}、近年では水流を作用させる試験により水路構造物コンクリートの摩耗性を評価する方法も提案されている^{5), 6)}。これらの試験方法はいずれも専用の試験装置が必要であり、汎用面では課題が残されている。

実構造物での摩耗対策としては、事後保全として既設コンクリート表面に耐摩耗性に優れた材料を設置する工法(張り石工法、鉄板・チタン板、ゴム板設置工法および高強度コンクリート製パネル設置工法など)が採用されることが多いが、剥離が生じる可能性があるという課題もある。なお、これらの工法は竣工時に施工される場合もある。構造物のライフサイクルコスト低減の観点からは、予防保全として、新設時(コンクリート施工時)に耐摩耗性改善対策を講じることが効率的な場合もある。具体的な方法としては、高強度コンクリートの使用、補強繊維の混入、養生方法の工夫および表面改質剤の塗布などが考えられるが、これらの対策による耐摩耗性改善効果の定量的な知見は十分に得られていない。

そこで、本研究では、試験装置の汎用性を考慮し、アスファルト舗装の摩耗試験として広く使用されているラベリング試験⁷⁾のコンクリートの摩耗試験としての適用性について検討した。適切性を確認した後、各種の耐

摩耗対策を講じたコンクリート供試体を作成してラベリング試験を行い、それらの効果について検討した。

2. ラベリング試験による耐摩耗性の評価(シリーズ 1)

2.1 ラベリング試験の概要

ラベリング試験は、アスファルト舗装の耐摩耗性を評価する試験方法「B002 ラベリング試験方法」として日本道路協会により規格化されている試験である(以下、便宜的に、アスファルト舗装規格という)。また、大半の道路工事関連の試験機関が、その試験装置を所有している。ラベリング試験には、往復チェーン型、回転チェーン型および回転スパイクチェーン型の3種類があるが、本実験では最も汎用的に行われている往復チェーン型を採用した。

試験装置の概要を写真-1に示す。供試体(厚さ 50×幅 150×長さ 400mm)を往復運動(66 往復/分)する台の上に乗せ、回転する車輪(外径 250mm, 幅 100mm, 200 回転/分)に取り付けたチェーンで供試体を叩いて摩耗作用を与える試験である。このため、ラベリング試験により与えられる摩耗作用は、大径の砂礫や転石による衝撃的な摩耗ではなく、比較的小さい砂礫によるすり磨き作用による摩耗であると考えられる。

チェーンには通称クロスチェーンと呼ばれる「JIS G 3505 軟鋼線材」の規格を満足する材料(SWRM12)を用いた。ラベリング試験時間は、アスファルト舗装規格では90分間と定められているが、本実験は対象物がアスファルトに比べ硬質なコンクリートであることを踏まえ 390分まで行った。

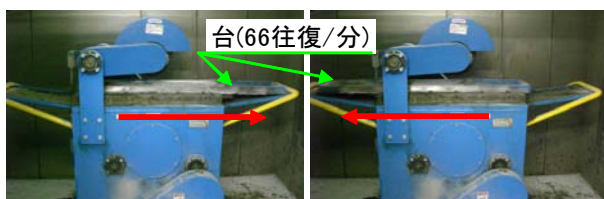
ラベリング試験後に、写真-2に示す凹凸測定器にて供試体表面の摩耗深さを測定し、平均摩耗深さおよびす

*1 (株)大林組 土木本部 生産技術本部 基盤技術部 主任技師 工修 (正会員)

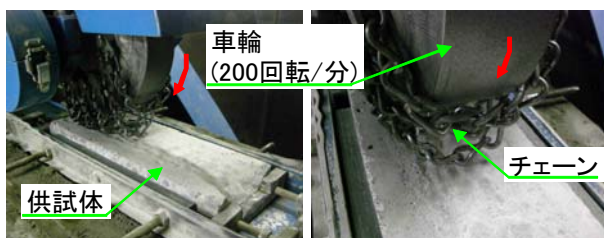
*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 工修 (正会員)

*3 フォレストコンサルタント(株)東京試験所 副所長

*4 フォレストコンサルタント(株)技術部長

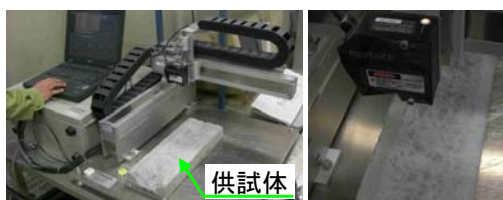


(a) 試験装置の外観

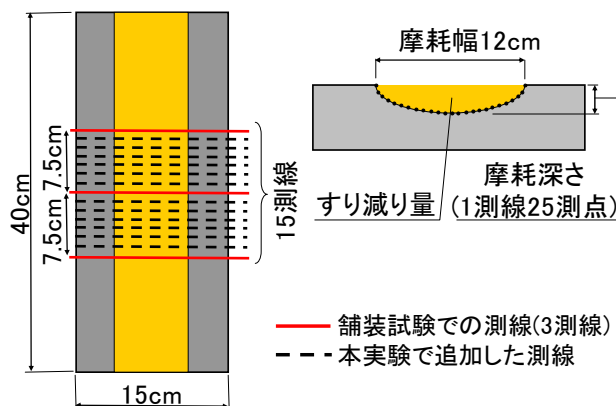


(b) 車輪およびチェーンの外観

写真－１ ラベリング試験装置の概要



写真－２ 凹凸測定器の概要



図－１ 摩耗深さおよびすり減り量の測定概要

表－１ 使用材料(シリーズ１)

分類	記号	種類
セメント	C	早強ポルトランドセメント, 密度3.14g/cm ³
細骨材	S	陸砂, 密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.76%, F.M.2.94
粗骨材	G	碎石, 最大寸法20mm, 表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.76%, F.M.6.61, 実積率58.6%
混和剤	WR	AE減水剤
	HWR	高機能AE減水剤
	SP	高性能AE減水剤

表－２ コンクリートの配合および試験結果の概要(シリーズ１)

W/C (%)	s/a (%)	Vg (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)			スランブ (cm)	空気量 (%)	材齢7日 圧縮強度 (N/mm ²)	平均摩耗 深さ (cm)	すり減り量 (cm ²)
			W	C	S	G	WR	HWR	SP					
70.0	48.4	0.37	162	231	912	987	0.25	－	－	12.0	4.9	23.6	0.26	3.1
60.0	47.5			270	880	987	0.25	－	－	13.0	4.8	30.2	0.34	4.1
50.0	46.2			324	835	987	0.25	－	－	12.0	4.9	36.4	0.37	4.4
40.0	44.1			405	767	987	－	1.00	－	13.5	4.7	45.6	0.46	5.6
30.0	40.3			540	655	987	－	－	1.10	19.0	5.2	65.7	0.57	6.8

*平均摩耗深さおよびすり減り量は、ラベリング試験時間390分での値

り減り量を算出した。摩耗深さの測線数はアスファルト舗装規格では3測線(1測線で25測点)があるが、測定値のばらつき等を考慮して、本実験では15測線とした(図－1)。なお、各測線での平均摩耗深さ(D)とすり減り量(S)は、文献⁷⁾に示される以下の式(1)～(2)から算出した。

$$D = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_{25})}{25} \quad (1)$$

$$S = D \times L \quad (2)$$

ここに、

D : 平均摩耗深さ(cm)

x_i : 各測定点での摩耗深さ(cm) $i=1 \sim 25$

S : すり減り量(cm²)

L : 摩耗幅(12cm)

2.2 実験概要

既往の研究¹⁾により、コンクリートの耐摩耗性は圧縮強度と高い相関があるとの知見が得られている。そこで、

水セメント比を変化させたコンクリート供試体を作成し、ラベリング試験によりコンクリートの摩耗性評価が可能であるかを検証した。

使用材料を表－1に、コンクリート配合を表－2に示す。モルタル部分と粗骨材部分とでは摩耗性が相違すると想定されるため単位粗骨材容積は一定の配合条件とした。単位水量を一定とし、水セメント比を30～70%の範囲で5水準変化させて強度水準の異なるコンクリートを製造した。また、水セメント比に応じて3種類の減水剤を使い分けた。

コンクリートの練混ぜには、二軸強制練りミキサ(公称容量60L)を使用し、1バッチの練混ぜ量は40Lとした。練混ぜ方法は、セメントおよび骨材を投入して10秒間練り混ぜた後、予め混和剤を溶解させた練混ぜ水を投入して60秒間練り混ぜた。なお、試験は20℃に温度管理された室内で実施した。

コンクリートが練り上がった後、スランブおよび空気

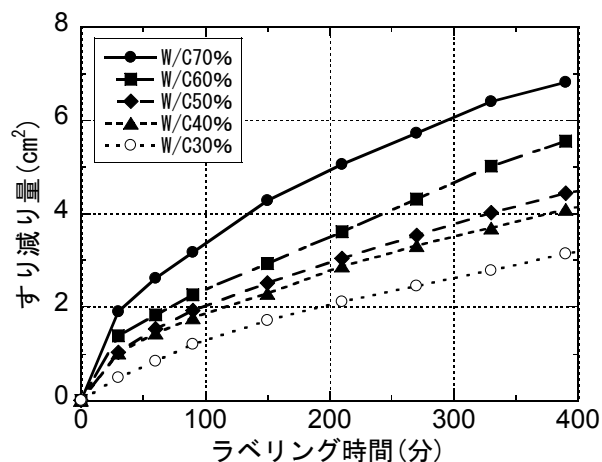


図-2 ラベリング試験結果(シリーズ1)

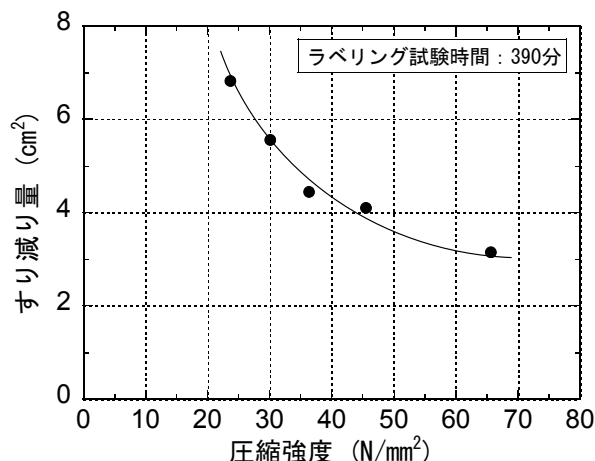


図-3 圧縮強度とすり減り量の関係(シリーズ1)

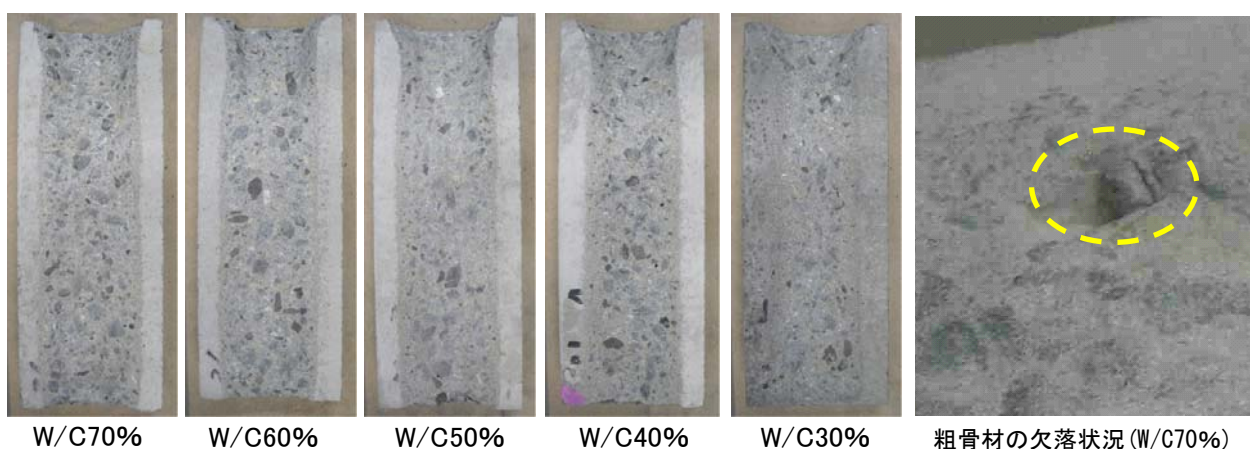


写真-3 ラベリング試験後の供試体状況結果

量試験を行うとともに、ラベリング試験用供試体および圧縮強度試験用供試体を採用した。コンクリート供試体は材齢7日まで20℃室内で封かん養生した後、ラベリング試験および圧縮強度試験を行った。

2.3 実験結果および考察

ラベリング試験結果を図-2に、圧縮強度とすり減り量の関係を図-3に示す。すり減り量は15測線の平均である。いずれの水セメント比のコンクリートでも、すり減り量はラベリング試験時間に伴い増加するが、試験時間が長くなるほど単位時間当たりのすり減り量の増分は少なくなる傾向にある。また、すり減り量は水セメント比が小さいコンクリートほど小さくなり、圧縮強度とすり減り量には高い相関関係が認められた。この相関関係は、既往の知見^{1), 8)}と同様に強度増加に伴いすり減り量が減少し、減少勾配が強度の増加に伴い緩やかになる曲線形状を示している。ラベリング試験によってもコンクリートの耐摩耗性を評価できることが確認できた。

ラベリング試験後の供試体状況を写真-3に示す。いずれの供試体とも、モルタル部分がすり減り粗骨材が露出していた。また、水セメント比の大きな供試体では粗骨材の欠落も認められた。既往の知見⁹⁾によれば、すり

磨きの摩耗作用を受けるコンクリートは、①かぶり部のモルタルの摩耗、②粗骨材の露出・欠落の順に劣化していくとされており、ラベリング試験は実際の摩耗作用による劣化状況を再現できていると考えられる。

3. 各種耐摩耗性改善対策の効果検証(シリーズ2)

3.1 実験概要

コンクリート構造物の施工段階で対応可能な各種の耐摩耗性改善対策の効果を定量的に把握するため、各種対策を講じたコンクリート供試体を用いてラベリング試験を行った。

本実験では耐摩耗性を向上する対策として、材料面(配合面)の対策、施工・仕上げ時の対策および硬化後の対策について検討した。材料面の対策としては高強度混和材あるいは補強繊維(鋼繊維、非鋼繊維)を混入したケース、施工・仕上げ時の対策としては真空養生を行うケースと膜養生剤を塗布したケース、硬化後の対策としては2種類の浸透性改質剤を塗布したケースについて試験した。なお、比較用のデータを得るため対策を講じないケースについても試験した。

使用材料を表-3に、コンクリート配合を表-4に示す。骨材および混和剤には前章と同じ材料を用いた。標

表－4 コンクリートの配合および試験結果の概要（シリーズ2）

耐摩耗性向上対策		W/C (%)	Vg (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)					補強繊維 (Vol%)		混和剤 (C+D×%)		圧縮 強度 (N/mm ²)	平均 摩耗 深さ (cm)	すり 減り量 (cm ²)	すり減り 量の 低減率 (%)
				W	C	D	S	G								
比較用コンクリート		60.0	0.37	162	270	－	882	987	－	－	0.25	－	36.8	0.41	4.97	－
材料	高強度混和材					27	851		－	－	0.25	－	48.6	0.30	3.62	27
	繊維補強SF					－	882		0.3	－	0.25	－	35.9	0.36	4.28	14
	繊維補強PP					－	882		－	0.3	－	1.50	39.3	0.35	4.22	15
施工・ 仕上げ	真空養生					－	882		－	－	0.25	－	61.9	0.29	3.42	31
	膜養生剤					－	882		－	－	0.25	－	36.4	0.41	4.92	1
施工後	浸透性改質剤RC					－	882		－	－	0.25	－	36.4	0.40	4.76	4
	浸透性改質剤CC					－	882		－	－	0.25	－	36.4	0.37	4.44	11

*平均摩耗深さおよびすり減り量は、ラベリング試験時間390分での値

表－3 使用材料(シリーズ2)

分類	記号	種類
結合材	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
	D	高強度混和材(エトリンサイト系混和材) 密度2.36g/cm ³
細骨材	S	陸砂, 密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.76%, F.M.2.94
粗骨材	G	碎石, 最大寸法20mm, 表乾密度2.66g/cm ³ 吸水率0.76%, F.M.6.61, 実積率58.6%
混和剤	WR	AE減水剤
	HWR	高機能AE減水剤
補強繊維	SF	鋼繊維, 密度7.85g/cm ³ , φ0.6×L30mm
	PP	ポリプロピレン繊維 密度0.91g/cm ³ , 13dtex×L 12mm
膜養生剤	RP	ポリマーセメント層を生成
浸透性 改質剤	RC	ケイ酸質浸透性改質剤(RC) 水で希釈するタイプ
	CC	ケイ酸質浸透性改質剤(CC) 原液使用タイプ

準的な水利構造物に用いられるコンクリートの圧縮強度は実強度で 30～35N/mm² 前後であることが多いことから、表－2に示す水セメント比 60%の配合と同じ配合を用いた。ただし、セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。練混ぜ方法も前章と同様である。採取した供試体は 20℃の室内で 3 ヶ月間封かん養生した後、ラベリング試験を行った。

以下に、各種対策を講じた場合のコンクリート供試体の製造および養生方法の概要を示す。なお、打設時のコンクリート品質はスランプ 8～12cm, 空気量 4.3～5.5%であった。

(1) 材料面の対策を講じた場合

高強度混和材の混入量は製造メーカーの仕様に準じてセメント量の 10%とし、細骨材に置換して、コンクリートの練混ぜ時に他の材料とともに混入した。

補強繊維の混入量は 0.3Vol%とし、コンクリートの練上り後に投入し 1 分間追加攪拌した。

(2) 施工・仕上げ時の対策を講じた場合

膜養生剤を塗布するケースでは、コンクリートを型枠



写真－4 真空養生の概要

内に打設した後に表面仕上げを行う際に、コンクリート表面に膜養生剤を 250g/m² 散布してコンクリートに塗りこむように仕上げた。

真空養生は、以下の手順で行った(写真－4)。まず、厚さ 5cm で 1m 四方の型枠にコンクリートを打設し 30 分静置した。次に、真空パネルを供試体上面に設置して中心部に吸引ホースを接続し、0.06MPa の圧力で水が吸引されなくなるまで吸引した(吸引時間 15 分)。その後、コンクリート表面をコテで仕上げた後、他のケースの供試体と同様に 20℃室内で封かん養生した。なお、吸引した水量から概算すると真空養生後のコンクリート供試体の水セメント比は 44.8%であった。3 ヶ月の養生後、

平版供試体の中心部から試験体を切り出して試験した。

(3) 硬化後の対策を講じた場合

各種の浸透性改質剤を塗布するケースでは、コンクリート供試体を材齢1ヶ月まで封かん養生した後、製造メーカーの仕様に準じて改質剤を所定量(改質剤RCは改質剤と水を質量比13:7で混合した水溶液 $0.2\text{L}/\text{m}^2$ 、改質剤CCは改質剤原液 $0.25\text{kg}/\text{m}^2$)をコンクリート表面に塗布した。その後、材齢3ヶ月まで封かん養生した。

3.2 実験結果および考察

各種の耐摩耗性改善対策を講じたコンクリートのラベリング試験結果を表-4および図-4～6に示す。

(1) 材料面の対策を講じた場合(図-4)

高強度混和材を混入したケースは、比較用コンクリートに比べすり減り量が約 1.4cm^2 (低減率27%)低減できている。前章の水セメント比40%のコンクリート(単位セメント量 $405\text{kg}/\text{m}^3$)と同程度である。耐摩耗性を確保するために水セメント比を低下させると(単位セメント量の多いコンクリートを用いると)温度ひび割れ発生のリスクが高まり、耐久性が損なわれる可能性もある。躯体厚さの厚い水利構造物の耐摩耗対策として、高強度混和材を適用することは効果的と考えられる。

補強繊維を混入したケースでのすり減り量の低減率は15%程度であり、繊維種類による顕著な違いは認められなかった。補強繊維を混入することでモルタル分や粗骨材の欠落を低減できるため、すり減り量が低減できていると考えられる。なお、写真-5に示すように、試験後の供試体には繊維の一部が抜け出してきている状況が認められた。ラベリング試験は、チェーンにより衝撃・摩耗作用を与えるため、繊維がチェーンに絡まり抜け出す場合もあると想定される。実際の衝撃・摩耗作用ではこのような状況は生じないため、本試験方法は補強繊維の混入による耐摩耗性改善効果が小さめに評価されている可能性もあると推測される。

(2) 施工・仕上げ時の対策を講じた場合(図-5)

膜養生剤を塗布したケースは、ラベリング試験時間が短い範囲では比較用コンクリートに比べすり減り量が低減できているが、最終的なすり減り量は比較用と同程度であった。膜養生剤により改善できる部分がコンクリートのごく表層のみであり、改質された層がすり減った後では耐摩耗性の改善効果が期待できないことを示す結果と考えられる。

一方で、真空養生を行ったケースでは、すり減り量が約30%改善できている。コンクリート中の余剰水を取り除くことで水セメント比が低減し水和組織が緻密化したためと考えられる。真空養生は特殊な材料を用いることなく実施できる対策であり、スラブ等の平面的な部材の耐摩耗性改善に効果的であると言える。

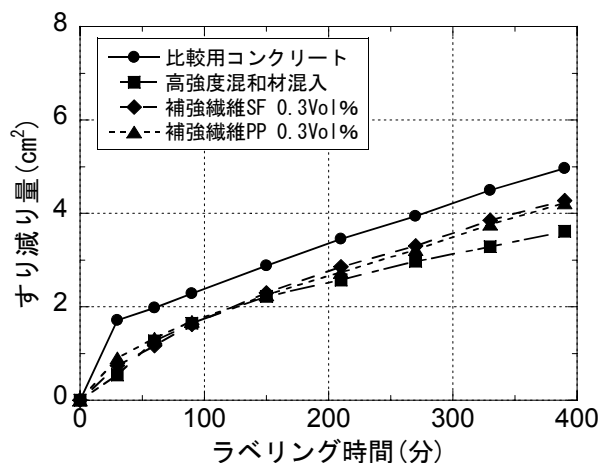


図-4 ラベリング試験結果(材料面の対策)



写真-5 補強繊維コンクリート供試体の試験後状況

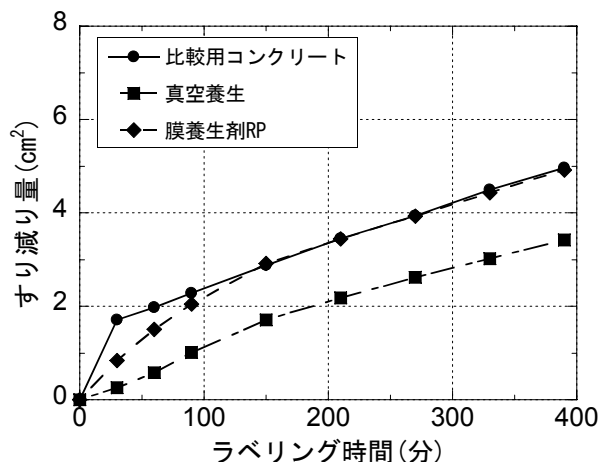


図-5 ラベリング試験結果(施工・仕上げ時の対策)

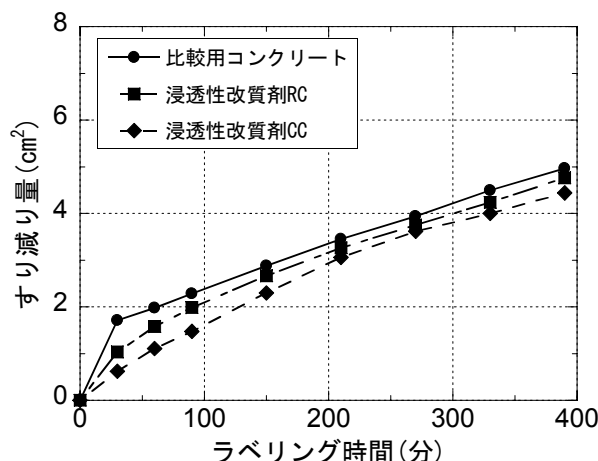


図-6 ラベリング試験結果(硬化後の対策)

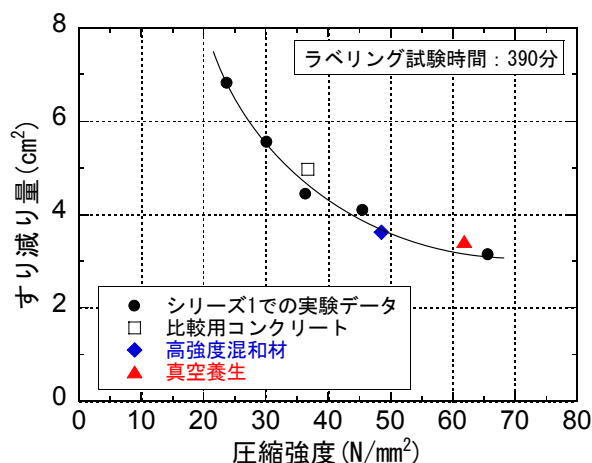


図-7 圧縮強度とすり減り量の関係(シリーズ2)

なお、真空養生時の吸水量から概算した平版コンクリート供試体の水セメント比は44.8%と推定され、シリーズ1の試験結果から圧縮強度は40~45N/mm²程度と推測されるが、実際の強度は約62N/mm²と大きくなっていた。今回の真空養生は1m四方の平版供試体中心に設置したホースにより吸引したため、中心付近では水セメント比が小さくなり、圧縮強度が大きくなったと考えられる。今後、コンクリート面から均質に水を吸引できるように真空養生の方法を改善していく必要があると考えられる。

(3) 硬化後の対策を講じた場合(図-6)

硬化後の対策として浸透性改質剤を塗布した場合には、比較用コンクリートに比べすり減り量を5~10%低減できている。先述の膜養生剤と同様に、ラベリング試験時間の短い範囲ではすり減り量を大きく低減できているが、試験時間の増加に伴い改善効果が小さくなる傾向にある。改質剤による改善効果が高いのはコンクリートの表層であることを示唆する結果と考えられる。

(4) すり減り量と圧縮強度の関係

前章(シリーズ1)で得られた圧縮強度とすり減り量の関係(図-2)に、高強度混和材を混入、あるいは真空養生を行ったコンクリートの試験結果を追記して図-7に示す。追記したケースの圧縮強度とすり減り量の関係は、水セメント比を変化させた場合の圧縮強度とすり減り量の関係と同じ曲線上にプロットされている。強度増加の方法によらず、コンクリートの圧縮強度を増加させることで、耐摩耗性が改善できることを示す結果と考えられる。

4. まとめ

試験装置の汎用性を考慮し、アスファルト舗装の摩耗試験であるラベリング試験を用いて、コンクリートの摩耗性評価を行うとともに、各種の耐摩耗性対策による改

善効果を検討した。本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) ラベリング試験は、圧縮強度の違いによるすり減り量の変化を捉えることができ、既往の文献での成果と一致することから、比較的小径の砂礫のすり磨き作用によるコンクリートの耐摩耗性評価に適用可能と考えられる。
- (2) 高強度混和材の混入や真空養生の実施により耐摩耗性を大幅に改善できることをラベリング試験によって確認できた。
- (3) ラベリング試験から、膜養生剤や浸透性改質剤の塗布による耐摩耗性改善効果はコンクリート表層に限られると推測され、長期間にわたり厳しい摩耗作用を受ける場合には、大きな改善効果は期待できないと考えられる。

今後、ラベリング試験により得られる摩耗特性(すり減り量)と実構造物における摩耗状況との関連性を把握する必要がある。

参考文献

- 1) 増田隆, 松永嘉久, 渡邊芳春; 高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) 小柳治ほか; コンクリートの耐衝撃摩耗特性に及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.10, No.2, pp.463-468, 1988
- 3) 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, 1993
- 4) 杉田英明, 永松武教, 大和竹史; 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, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.885-888, 1986
- 5) 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
- 6) 水流摩耗試験機を用いたモルタルおよびペーストの摩耗試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.695-700, 2006
- 7) 日本道路協会; 舗装調査・試験法便覧 第3分冊 第3章 試験編, pp.17-38, 2007.6
- 8) 取達剛ほか; コンクリートの炭酸化による耐摩耗性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.573-578, 2008
- 9) セメントジャーナル社; コンクリートの劣化と補修がわかる本, pp.108-112, 2009.2