

コンクリート舗装の摩耗に関する研究

豊福俊泰¹・三和久勝²・村国誠³・豊福俊英⁴・宮崎都三雄⁵・村木宏行⁶

¹正会員 工博 九州産業大学教授 工学部土木工学科 (前日本道路公団試験研究所)
(〒813 福岡市東区松香台2-3-1)

²正会員 札幌道路エンジニア(株) (〒060 札幌市中央区北5条西6-2札幌センタービル5F)

³工博 日本道路公団本社技術部 (〒100 東京都千代田区霞が関3-3-2新霞が関ビル)

⁴正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564 吹田市山手町3-3-35)

⁵正会員 日本道路公団名古屋管理局豊川管理事務所 (〒442 豊川市麻生田町茶木畑101)

⁶日本道路公団静岡建設局掛川工事事務所 (〒436 掛川市亀の甲1-4-21)

積雪寒冷地のコンクリート舗装は、タイヤチェーン等のタイヤ滑り止め装置を装着した車両の走行によって、摩耗作用を受け損傷する。本研究は、過酷な条件下にあるコンクリート舗装の摩耗現象を実験的に検討し、コンクリートに及ぼす外力と摩耗との関係を明らかにしたものである。さらに、多変量解析によって、外力、コンクリートの材料特性など各種の要因が、摩耗量に及ぼす影響について検討した。

Key Words : concrete pavement, tyre chains, studded tyres, abrasion, concrete quality, mix proportion, aggregate, compressive strength, multiple regression analysis

1. 序論

周知のように、コンクリート構造物のうち、人や物の移動による床面の摩耗¹⁾、交通車両が通行する舗装路面の摩耗^{2)~3)}、落下水や流水中の砂礫・岩によるダムの水叩き・水路の摩耗^{4)~6)}、波浪中の砂礫・岩による海岸構造物(橋脚)の摩耗⁹⁾などのように、著しい外力が表面に作用するものは、摩耗(すりへり)によって損傷が生じ、問題となっている。このため、損傷の原因を解明して対策を講じるべく、各種の研究が進められてきたが、摩耗現象の複雑性から、摩耗理論、摩耗試験法の確立が課題であり、実際の構造物の耐用性(摩耗量)を定量的に推定するまでには至っていないのが現状である¹⁰⁾。

これらの構造物に用いるコンクリートは、摩耗に対する抵抗性を高める必要があることから、土木学会コンクリート標準示方書では、粗骨材のすりへり減量の限度が規定されている¹¹⁾。

コンクリートの摩耗現象は、対象とする構造物の種類によって作用する外力が異なるため、コンクリートの摩耗機構を実際の現象に相似して再現するための試験装置としては、床材料摩耗試験機、ラベリング試験機、ホイールトラッキング試験機、掃流試験機、衝撃摩耗試験機など、多種多様の試験装置が提案されている。

日本道路公団試験研究所では、高速道路における舗装の材料・構造設計技術を確立するため、直径6m、幅90cmの円形走路をトラックタイヤが走行する大型回転式舗装試験機を室内に設置し、昭和45年度から昭和61年にわたり、「コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試

験」^{12)~20)}、「コンクリート舗装のすりへり・すべり抵抗に関する室内試験」^{21)~24)}および「雪氷路面における各種タイヤ・すべり止め装置の性能試験」²⁵⁾を実施した。さらに、これらの試験研究の結果から、コンクリート舗装の摩耗(わだち掘れ)の推定法を提案した^{26)~29)}。また、豊福は、摩耗特性を解明するため、基礎的な実験によって検討を進めてきた^{30),31)}。

本研究は、これらの試験研究結果を総合的に解析することにより、積雪寒冷地域でタイヤチェーン等のタイヤ滑り止め装置による作用を受けて損傷する、苛酷な条件下にあるコンクリート舗装の摩耗現象を解明することにより、コンクリートにおよぼす外力と摩耗との関係を明らかにしたものである。

2. 大型回転式舗装試験機によるコンクリートの摩耗試験の概要

(1) 試験の概要

大型回転式舗装試験機は、中心の回転支持軸からそれぞれ90°の交角をもつ4本の回転フレームの先端に取り付けた走行輪が、供試体上面を走路として回転する装置である(図-1および写真-1参照)。主な仕様は、回転半径:3m(標準)で軌道まで可変、走行輪:トラック用タイヤまたは乗用車用タイヤ、最大走行速度:60km/h、最大輪荷重:3ton、走行軌道の移動:±200mm走行中に可変、走行トルク:最急±6%勾配相当である。走行トルクは、車両が坂道を昇降する際に、回転によって路面に与える力を、加減速装置によって再現するものであ

る。また、コンクリートの供試体は、長辺201cm、短辺116cm、幅160cmの台形であり、円形に12個をセットした12面多角形を走路として摩耗試験を行う。

試験は、表-1に示すように、外力であるタイヤ条件（滑り止め装置の種類、タイヤの種類、空気圧）と走行条件（走行回数、走行速度、輪荷重、輪軌道の半径、輪軌道の交角）に着目し、供試体条件として材料・配合・施工・表面仕上げ・強度などを変えて実施し、摩耗に及ぼす要因を検討した（試験Ⅰ～試験Ⅸ）。路面の状態はすべて湿潤とし、走路の横側から散水した。

タイヤ滑り止め装置としては、チェーンタイヤ（タイヤチェーンを装着したタイヤを呼ぶ）およびスパイクタイヤのほか、試験Ⅰでは各種の非金属製タイヤ滑り止め装置から代表的なもの6種類（ラダー形4種類、ネット形2種類）を選定した（表-2参照）。

(2) 解析方法

大型回転式舗装試験機による各種の摩耗試験結果から、各供試体の摩耗量（ y ）の1測定ごとに、タイヤ条件等の各種の要因をデータ（ x_1, x_2, x_3, \dots ）として整理した。摩耗量は、輪軌道の交角が異なると摩耗深さに影響するため、断面積で表すこととしたが、輪軌道の摩耗幅はトラック用タイヤ10.00-20-14PRの場合約30cmであることから、この幅で除することによって平均的な摩耗深さが求められる。

摩耗量と諸要因との関係は、単回帰分析または重回帰分析によってデータ解析し、次の関係を求めた³⁰⁾。

$$y = a + bX \quad (1)$$

$$y = 10^a \cdot X^b \quad (2)$$

$$y = b_0 \cdot X_1^{b_1} \cdot X_2^{b_2} \cdot \dots \cdot X_p^{b_p} \quad (3)$$

ここで、 a, b ：定数（ r ：単相関係数）

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ ：定数（ R ：重相関係数）

重回帰分析は、最終の走行回数が、タイヤチェーンの場合3～5万回、スパイクタイヤの場合60～120万回である試験Ⅱ～Ⅸのデータ（表-3参照。以後、同表の記号で各項目を表す）を対象とし、変数増減法（分散比 $F = 2.0$ で判定）で解析した。

外周長あたりの金属部荷重 M_L は、すべり止め装置による外力の大きさを表す要因として、路面に接するトレッド部分にある金属（スパイクタイヤの場合はスパイク、チェーンタイヤの場合はクロスチェーン）の全質量を、タイヤの周長で除したものである。

3. 走行車両が摩耗に及ぼす影響

(1) 外力（滑り止め装置）の種類が摩耗に及ぼす影響
コンクリートの摩耗現象は、その表面に作用する外力

の大きさ、形態、通過回数などの特性によって、大きく異なる³⁰⁾。そこで、各種の滑り止め装置によって生じる摩耗機構を検討するため、チェーンタイヤ、スパイクタイヤおよび各種の非金属製タイヤ滑り止め装置装着タイヤの走行（40km/h）による舗装路面の摩耗量の推移を比較すると、図-2に示すとおりである（試験Ⅰ）。図-3は、代表として2万回走行時の摩耗断面の形状を示したものである。

非金属製タイヤ滑り止め装置のラダー形やスパイクタイヤは、輪軌道の交角を $\pm 25\text{mm}$ としたが、タイヤ幅内でほぼ2列に配置されているスパイク部のピンが通過する路面の部材が、集中的に摩耗している。しかも、タイヤ幅内で外側のピンが通過する部分（内側より走行速度が早い）の方が、内側のピンが通過する部分よりも摩耗量が大きくなっている。また、タイヤチェーンの場合はU形に摩耗しており、速度が同一であるにも拘らず、外側の軌道の方が摩耗量が大きくなる傾向が認められる。

摩耗量は、チェーンタイヤが最も大きく、次に非金属製タイヤ滑り止め装置装着タイヤのうちラダー形であり、ネット形はスパイクタイヤとほぼ同じになっている。チェーンタイヤの摩耗量は、スパイクタイヤと比較すると約5倍である。非金属製タイヤ滑り止め装置は、耐久性のバラツキが大きく、装置を締め付けるサイドバンドまたはタイヤの外側部（路面の摩耗で生じた角部に接触する部分）で切断した。

これらの傾向には、各種のタイヤ滑り止め装置の形状、材質等が要因となること、本試験機ではタイヤが半径約3mで回転運動をするため遠心力が働くこと等が、影響しているものと考えられる。遠心力は、タイヤが回転支持軸に固定される回転フレームを軸として回転するため、タイヤの外径方向ほど側面部方向に変形（外側の側面部が凹状となる形状）するように作用すると推察される。そこで、摩耗の原因となるスパイク部のピンまたはメタルが路面に及ぼす影響が、頭部の総面積 M_h で表されると想定して摩耗量との関係を求め、図-4に示す。ラダー形（チェーンタイヤを含む）とネット形（スパイクタイヤを含む）とに区分すると、それぞれ頭部の総面積は摩耗量との関係が認められ、ラダー形の4種類の場合、頭部の総面積と摩耗量との相関が良い。タイヤチェーンについては、スパイク部相当の面積を求めることが困難であるが、ほぼラダー形の4種類と同様の関係があるものと推察される。ネット形のNAT、NBTの場合、スパイクタイヤSTを含む4種類で比較すると、頭部の総面積にかかわらず摩耗量がほぼ一定となっている。

このように、ラダー形とネット形とで摩耗に及ぼす金属部の影響が異なる原因として、前者はピンを埋め込んだトレッド部がタイヤの外周面に対し直線状にクロス(断

表-3 解析データ (試験II~IX)

項目	区分	記号	単位	解析データ (注3)		
				チェーンタイヤ (n=601)	スパイクタイヤ (n=748)	
y	摩耗断面積	AA	cm ²	0.7~164.0	1.4~81.8	
	摩耗深さ	Ad	mm	0.4~50.5	0.7~29.8	
x	空気圧	P	kgf/cm ²	3.0~6.5	3.0~6.5	
	外周長あたりの金属部荷重	ML	g/cm	9.01~22.93	1.05~2.34	
	走行回数	N	万回	0~5	0~120	
	走行速度	V	km/h	20~60	20~60	
	輪荷重	WL	ton	0.5~2.0	0.5~2.0	
	軌道半径	RA	m	2.67~3.40	2.66~3.37	
	軌道変位	He	mm	±15~±60	±30~±60	
	セメント	圧縮強度 (材齢28日)	C ₂₈	kgf/cm ²	356~417	367~417
		曲げ強度 (材齢28日)	C _{28b}	kgf/cm ²	67.3~72.6	67.3~70.2
	細骨材	粗粒率	SFM	%	2.58~3.01	2.19~3.41
比重		SH	-	2.56~2.62	2.58~2.63	
吸水率		Sq	%	1.3~3.3	1.1~2.9	
単位容積質量		St	kg/l	1.62~1.83	1.62~1.85	
実積率		S ₂	%	63.4~71.4	63.4~71.4	
最大寸法		GM	mm	25~40	15~60	
粗粒率		GFM	-	6.83~7.54	6.83~7.58	
粗骨材	比重	GH	-	2.60~2.81	2.47~3.01	
	吸水率	Gq	%	0.5~2.0	0.4~4.3	
	単位容積質量	Gt	kg/l	1.54~1.87	1.54~1.83	
	実積率	Gc	%	58.4~71.3	58.4~67.6	
	すりへり減量	Gs	%	13.5~28.7	10.3~43.1	
	細骨材率	s/a	%	27.1~41.5	26.8~41.5	
	水セメント比	W/C	%	32.5~53.8	30.0~53.8	
配合	単位セメント量	C	kg/m ³	240~400	240~634	
	単位水量	W	kg/m ³	122~150	115~170	
	スランプ	SL	cm	1.5~3.5	1.0~9.0	
	空気量	A	%	3.2~5.5	2.9~6.5	
コンクリート	圧縮強度 (材齢28日)	f _{c28}	kgf/cm ²	268~448	268~595	
	曲げ強度 (材齢28日)	f _{b28}	kgf/cm ²	42.1~60.9	34.1~71.3	
	走行開始時の材齢	Z _A	日	28~271	7~365	

注1). 注2) チェーンタイヤの場合A_{AT}, A₀₂. スパイクタイヤの場合A₁₂, A₀₂.
両者を合わせた全体的場合A_{AT}, A₀₂ 注3) n: データ数 (個)

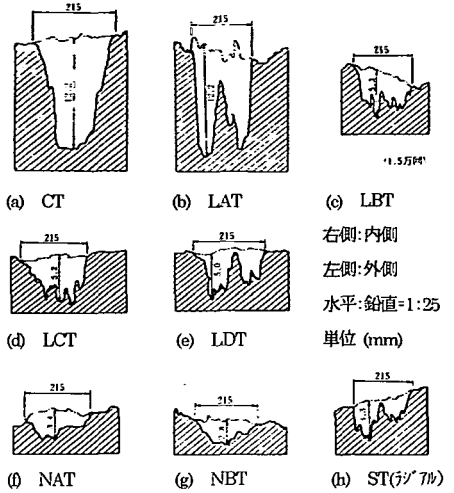


図-3 路面の摩耗断面の形状(試験I, 2万回走行時)

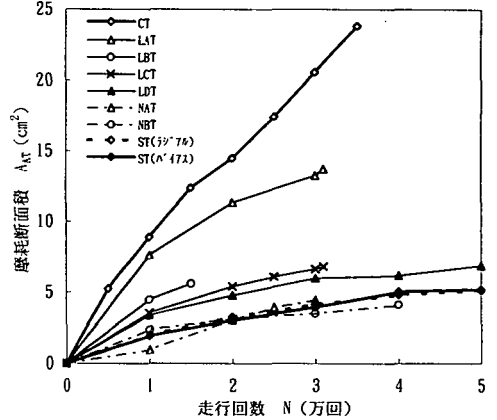


図-2 各種のタイヤ滑り止め装置装着タイヤの摩耗量の比較(試験I)

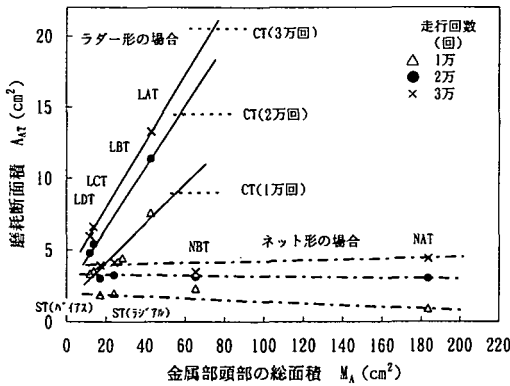
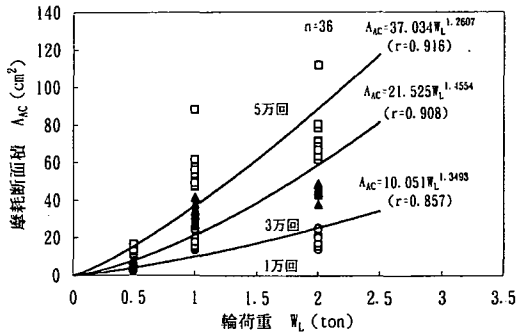


図-4 スパイク部の頭部の総面積と摩耗量との関係(試験I)

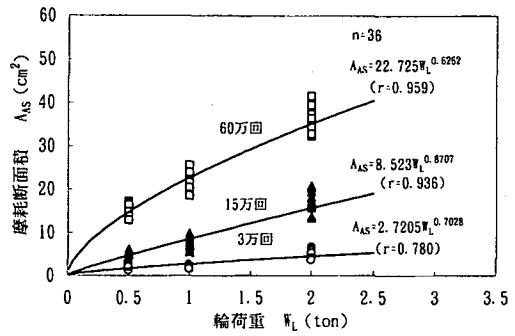
面幅方向)する形状であるため、タイヤが高速で回転すると拘束が小さく外側に凸に変形し易いことから、路面に衝撃荷重を与えること、輪荷重がトレッド部で線荷重として路面に作用すること等が考えられる。これに対し後者は、タイヤとの拘束が大きくトレッド部が外側に凸に変形し難いことから、路面に与える衝撃荷重が小さく、しかも輪荷重がスパイク部以外の面でも広く路面に作用するため、スパイクにかかる荷重が低減すること等が考えられる。

(2) 外力の大きさが摩耗に及ぼす影響

外力の大きさと摩耗との関係は、車両の輪荷重に着目すると、図-5に示すとおりである(試験IVおよび試験VIII)。タイヤの種類は、実交通を想定し、0.5tonの場合、乗用車用普通タイヤ6.00-13-6PR (空気圧3.0kgf/cm²)にJIS D 4241の種類56180 (質量3.5kg)のタイヤチェーンまたは72本のスパイクを装着して、1.0ton・2.0tonの場合、トラック用スノータイヤ (空気圧 6.0kgf/cm²)に89194 (質量16.9kg)のタイヤチェーンまたは78本のスパイクを装着して、それぞれ試験を行っている。同図からスパイクタイヤの場合、輪荷重の変化にほぼ比例して摩耗量が増加しているのに対し、チェーンタイヤの場合は、1.0tonでは0.5tonの約5倍の摩耗量となっているが、2.0tonと1.0tonとでは増加量が少なくなっている。これはクロ

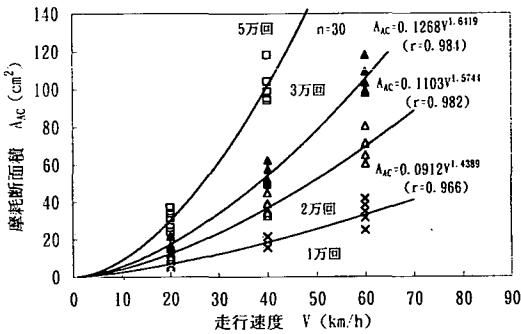


(a) チェーンタイヤの場合(試験IV)

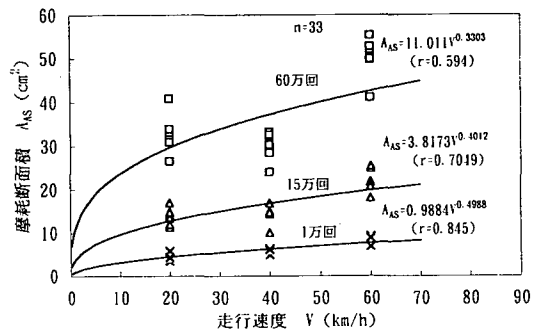


(b) スパイクタイヤの場合(試験VIII)

図-5 輪荷重と摩耗量との関係(走行速度40km/h)



(a) チェーンタイヤの場合(試験V)



(b) スパイクタイヤの場合(試験IX)

図-6 走行速度と摩耗量との関係(輪荷重2.0ton)

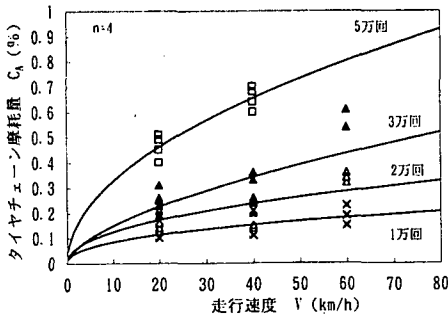


図-7 チェーンタイヤ走行による走行速度とタイヤチェーンの摩耗量との関係(試験V, 輪荷重2.0ton)

スチーンの質量・寸法の影響の方が、輪荷重よりも卓越しているためと考えられる。走行回数5万回ではデータのばらつきが大きくなっており、また、輪荷重の最大値が2.0tonまでの試験結果であることから、これより輪荷重が大きい場合の傾向は不明であるが、摩耗量の増加量は、関係式よりも低下傾向になるものと推察される。

図-6は、走行速度と摩耗量との関係である(試験Vおよび試験IX)。チェーンタイヤの場合、速度の変化に

ほぼ比例して摩耗量が増加しており、しかも、走行回数の増加に伴い速度の影響が拡大する傾向があり、走行回数3万回で比較すると20km/hに対し40km/hは約3倍、60km/hは約6倍である。スパイクタイヤの場合、20km/hに対し40km/hは差が小さく、走行回数15万回で比較すると約1.1倍であり、60km/hでは約1.3~1.9倍の摩耗量となっている。走行回数60万回では、データのばらつきが大きくなっており、相関性が低下している。20km/hの摩耗量が多く40km/hが少ない傾向が認められる理由としては、軌道半径が前者は2.66m(内側)、後者3.37m(外側)であるため、コーナリングフォース(走行速度が同一の場合、内側ほど遠心加速度が大きい)の影響によると考えられる。

このようにチェーンタイヤの走行によってコンクリート舗装路面は摩耗作用を受けるが、一方、外力であるタイヤチェーンの方も摩耗作用を受ける。図-7は、タイヤチェーンの摩耗量 C_A (累積摩耗質量の比率)と走行速度との関係であり、コンクリートの摩耗作用の大きい高速走行ほど、タイヤチェーンの摩耗量も大きくなる傾向が認められる。

記号	粗骨材			配合			圧縮強度 (材料28日)			
	種別	実積率 %	すりへり減量 %	種別	配合率 %	単位容積質量 kg/l				
△ A	砕石	58.3	21.4	0	川砂F	2.75	1,620	38.1	142	268
▲ B					砂	2.66	1,680	37.5	145	369
○ C	川砂利F	61.6	16.1	1.8	川砂F	2.75	1,620	32.7	128	404
● D					砂	2.66	1,680	34.0	132	383
× E	川砂利K	62.5	16.0	4.2	川砂K	2.78	1,666	31.1	123	391

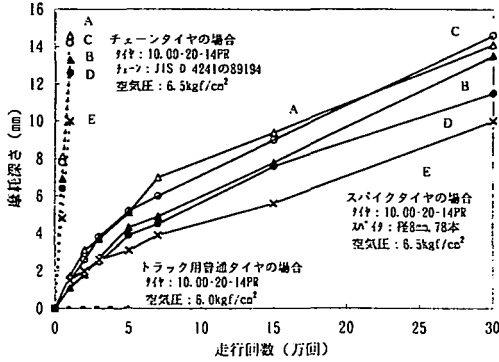


図-8 タイヤの走行と摩耗深さとの関係 (試験Ⅲ, V=60km/h, W_L=2.0ton)

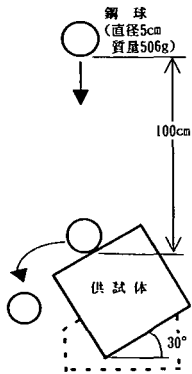


図-10 衝撃摩耗試験装置

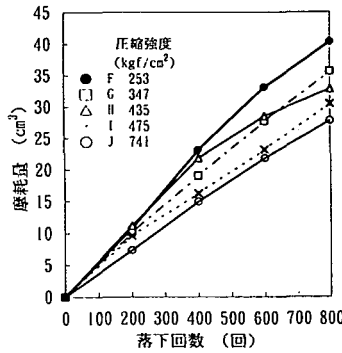


図-11 鋼球の落下回数と摩耗量との関係

4. コンクリートの品質が摩耗に及ぼす影響

(1) 路面の摩耗機構

a) タイヤによる摩耗現象

図-8および図-9は、タイヤの種類および骨材・コンクリートの品質に着目した試験結果である(試験Ⅲ, 走行速度60km/h)。摩耗現象は、次のように説明される。

① トラック用普通タイヤの場合、タイヤ自身の摩耗が著しく、摩擦熱で軟化したゴムが路面に付着し、路面の摩耗現象はほとんど生じない。

② スパイクタイヤの場合、路面のモルタル厚さに相当する深さ2mm程度までは、ほぼ直線的に摩耗している。深さ2~5mm程度では、勾配が次第にゆるやかになり、摩耗が大きいものと小さいものとの差が明らかになる。

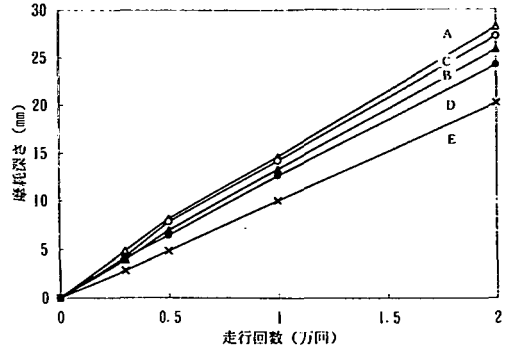


図-9 チェーンタイヤの走行と摩耗深さとの関係 (試験Ⅲ, V=60km/h, W_L=2.0ton)

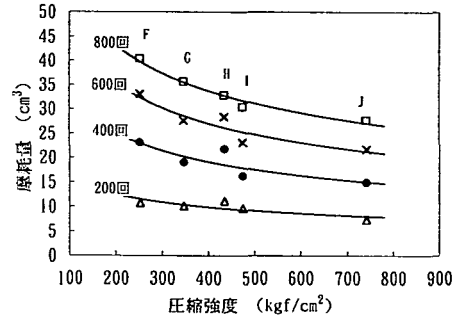


図-12 コンクリートの圧縮強度と摩耗量との関係

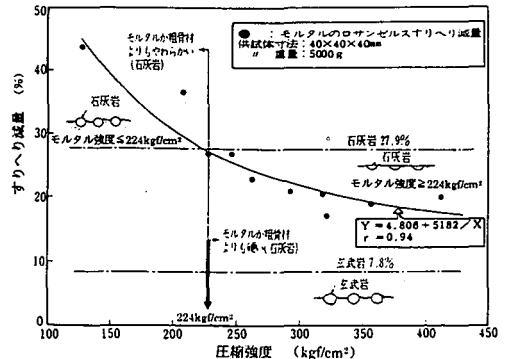
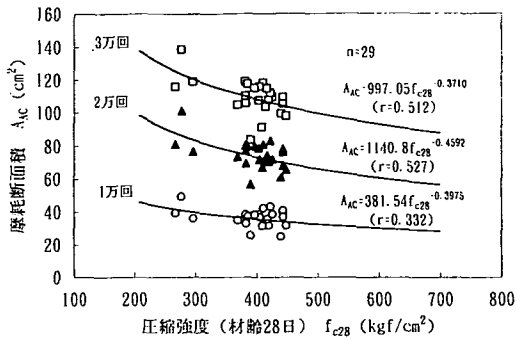


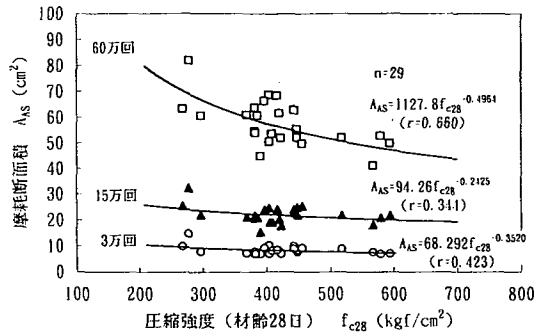
図-13 モルタルの圧縮強度とすりへり減量

さらに、深さ5mm程度を超えると、再び直線的に摩耗し、コンクリートの品質の相違による摩耗量の差が大きくなる。すなわち、摩耗初期にはコンクリート中のモルタル分の品質の影響が強く、粗骨材の露出に伴い、コンクリートの品質の影響が強くなる。

③ チェーンタイヤの場合、衝撃力が強いいため、ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり減量が、回転数に比例して直線的に摩耗する³⁰⁾のと同様に、摩耗量が走

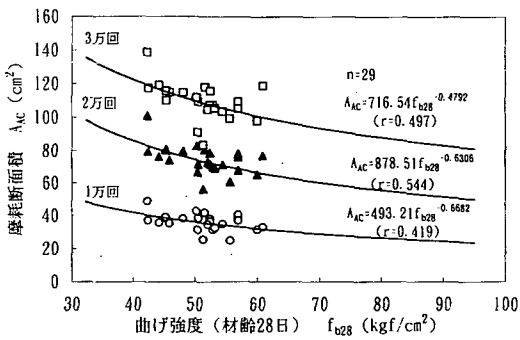


(a) チェーンタイヤの場合(試験Ⅲ・試験Ⅴ)

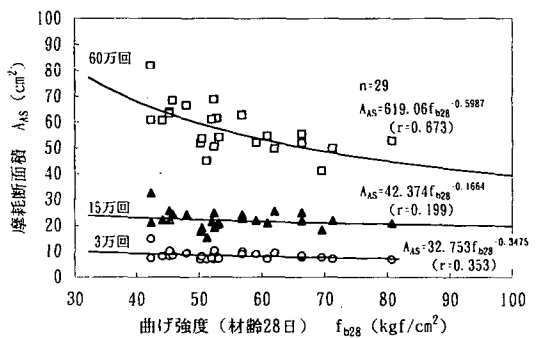


(b) スパイクタイヤの場合(試験Ⅲ・試験Ⅸ)

図-14 コンクリートの圧縮強度と摩耗量との関係(走行速度60km/h, 輪荷重2.0ton)



(a) チェーンタイヤの場合(試験Ⅲ・試験Ⅴ)



(b) スパイクタイヤの場合(試験Ⅲ・試験Ⅸ)

図-15 コンクリートの曲げ強度と摩耗量との関係(走行速度60km/h, 輪荷重2.0ton)

行回数に比例して直線的に増加する。なお、摩耗量をスパイクタイヤの場合と比較すると、約10倍である(走行回数3万回程度まで)。

④ 使用した骨材の種類によって摩耗量の差が生じており、川砂Fを使用したものの摩耗が大きくなっている。スパイクタイヤについては、Eの場合、約2mmまで急激に摩耗した後は直線的に摩耗深さが増加しているのに対し、Aの場合、約7mmまで急激に摩耗し、その後はEとほぼ同じ勾配で直線的に摩耗深さが増加している。チェーンタイヤについては、Eの場合、ほぼ直線的に摩耗しているが、Aの場合、約8mmまでの摩耗深さの増加が大きく、その後はEよりやや大きい勾配で直線的に摩耗している。

b) 摩耗の基礎的なメカニズム

外力とコンクリートの品質との関係を把握するため、図-10の衝撃摩耗試験装置によって、鋼球の落下回数と摩耗量(摩耗体積)との関係を求め、図-11および図-12に示す。モルタル強度が高いJ供試体(コンクリートの圧縮強度741kgf/cm², W/C=25%)の場合、ほぼ直線的に摩耗量が増加しているのに対し、モルタル強度が低いF供試体(コンクリートの圧縮強度253kgf/cm², W/C

=70%)の場合は、深さ約10mmに相当する摩耗量20cm³(400回)までは直線的に摩耗量が増加しているが、その後粗骨材の露出に伴い摩耗量の増加が減少し、600回以後はJ供試体の摩耗量と勾配が同程度となっている。コンクリートの圧縮強度の増加に伴い摩耗量が低減するが、600kgf/cm²程度から摩耗量が増加する勾配がほぼ一定となる傾向が認められる。また、落下高さが高い、換言すると速度が早いほど摩耗量が多くなることが実験で確認されている⁵⁾。

図-13は、モルタルの圧縮強度とすりへり減量との関係を求めたものであり、圧縮強度が大きいほどすりへり減量が小さくなる高度の相関が認められる。同図には石灰岩と玄武岩のすりへり減量を合わせて示しているが、すりへり減量の小さい玄武岩はモルタルのすりへり減量の相関線との交点がなく、モルタルと粗骨材の相対的な図-10の衝撃摩耗試験装置によって、鋼球の落下回数と強度差が大きいので、粗骨材間で凹凸が生じ易い。一方、すりへり減量の大きい石灰岩は、モルタルの圧縮強度が224kgf/cm²よりも大きくなると、摩耗が進み骨材間の凹凸が生じなくなることがわかる。

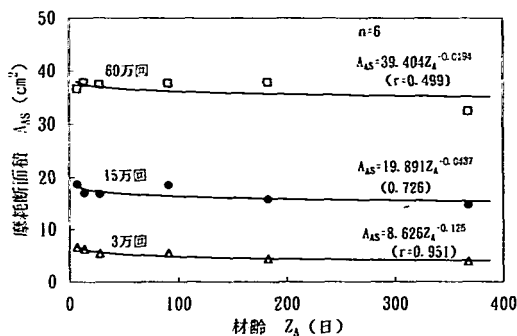


図-16 コンクリートの材齢と摩耗量との関係 (ST, 試験Ⅳ, V=40km/h, W_L=2.0ton)

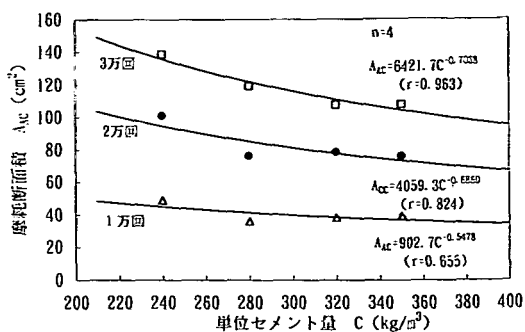


図-17 単位セメント量と摩耗量との関係 (CT, 試験Ⅲ, V=60km/h, W_L=2.0ton)

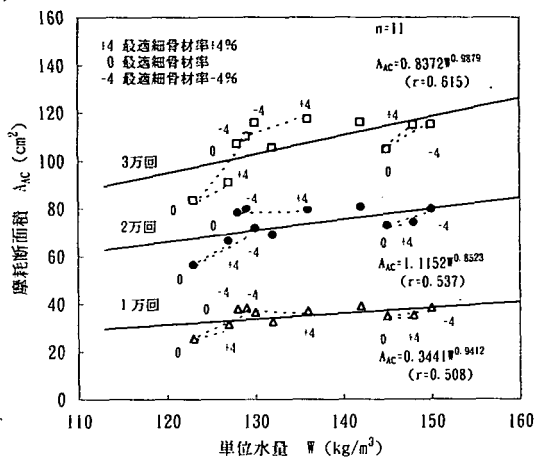


図-18 単位水量と摩耗量との関係 (CT, 試験Ⅲ, V=60km/h, W_L=2.0ton)

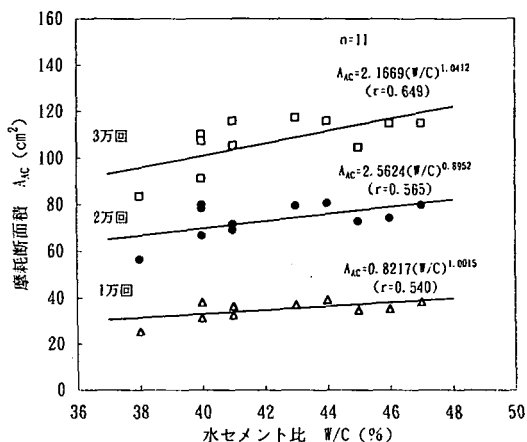


図-19 水セメント比と摩耗量との関係 (CT, 試験Ⅲ, V=60km/h, W_L=2.0ton)

(2) コンクリートの品質が摩耗に及ぼす影響

摩耗作用に及ぼすコンクリートの品質との関係として、圧縮強度および曲げ強度が高い相関性を示すことは、多くの研究でも確認されている^{2), 6), 9)}など。図-14および図-15は、本研究で求められた摩耗量とコンクリートの圧縮強度、曲げ強度(材齢28日)との関係である(試験Ⅲ・V・IX)。いずれも強度が高いほど、摩耗量が減少する傾向が認められ、強度の増加とともに摩耗量の増加が小さくなっている。

コンクリートの強度は、材齢の経過とともに増加するが、材齢と摩耗量との関係は、図-16に示すように若材齢ほど摩耗し易い傾向があるものの、材齢7日と1年との摩耗量の差は約1mmと小さくなっている(試験Ⅳ)。

なお、一般には、道路のコンクリート舗装は設計基準曲げ強度として45kgf/cm²が採用されているが、摩耗量を低減するため強度を高くする場合には、路面のすべり抵抗の低下を考慮しておく必要がある。

(3) コンクリートの配合が摩耗に及ぼす影響

一般に単位セメント量Cが多く単位水量Wが少ない(水セメント比が小さい)配合ほど、最適細骨材率が小さくなり、圧縮強度が高いコンクリートとなる^{32), 36)}。これらの配合条件と摩耗量との関係は、図-17～図-19に示すとおりである(試験Ⅲ)。単位セメント量の増加に伴い摩耗量が減少しており、強度の場合と同様に摩耗量の増加が小さくなる傾向がある。

単位水量は、ワーカビリティ(スランプ2.5±1cm)・単位セメント量が同一な場合、骨材品質の相違に起因して増加するのに伴い、摩耗量が増加している。細骨材率を、単位水量が少なくなる最適細骨材率から±4%増減した場合、単位水量が1~8kg/m³増加し、摩耗量も増加する傾向が認められる。タイヤ通過回数増加とともに、摩耗量の差が増大しているが、これは摩耗の進行とともに粗骨材が露出し、コンクリートの品質の影響が大きくなるためである。したがって、摩耗抵抗性を高めるためには、細骨材率を小さく(単位粗骨材容積を大きく)

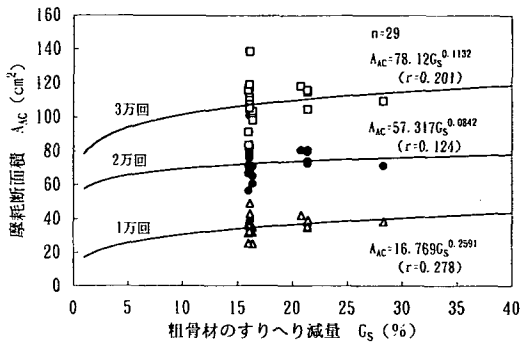


図-20 粗骨材のすりへり減量と摩耗量との関係 (CT, 試験Ⅲ・試験Ⅴ, V=60km/h, W_L=2.0ton)

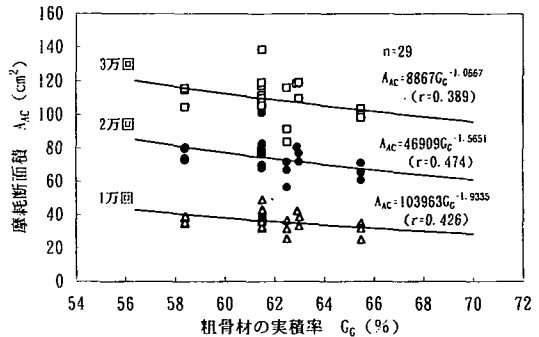


図-21 粗骨材の実積率と摩耗量との関係 (CT, 試験Ⅲ・試験Ⅴ, V=60km/h, W_L=2.0ton)

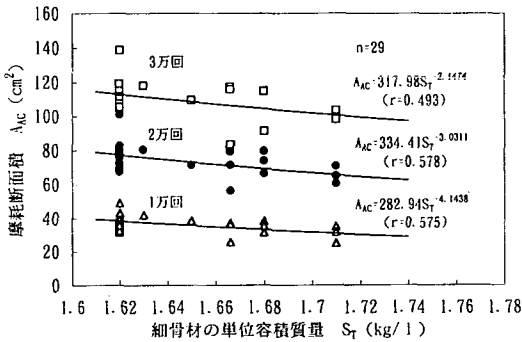


図-22 細骨材の単位容積質量と摩耗量との関係 (CT, 試験Ⅲ・試験Ⅴ, V=60km/h, W_L=2.0ton)

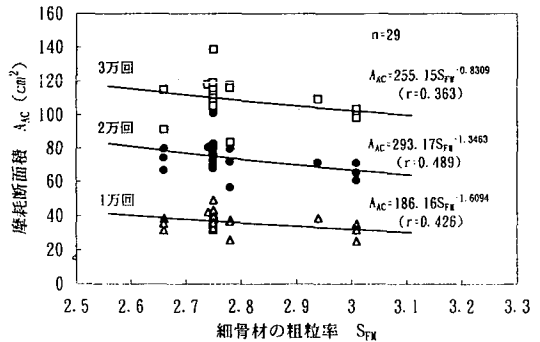


図-23 細骨材の粗粒率と摩耗量との関係 (CT, 試験Ⅲ・試験Ⅴ, V=60km/h, W_L=2.0ton)

する方法が考えられるが、図-18からはこの傾向は認められず、単位水量が少ない密実なコンクリートとする方が効果があると考察される。

水セメント比は、強度と同様に摩耗量との相関性がよく、単位セメント量、細骨材率あるいは骨材の種類が変わっても、水セメント比の小さい配合ほど摩耗量が少なくなっている。

(4) 骨材の品質が摩耗に及ぼす影響

a) 粗骨材

摩耗抵抗性を良くするために骨材に要求される品質としては、コンクリート舗装の場合、粗骨材のすりへり減量の限度を一般に35%とすることが規定されており、タイヤチェーン等による大きな摩耗作用を受ける積雪寒冷地の道路では、25%以下とすることが望ましいとされている¹¹⁾。また、ダムコンクリートの場合、この限度は40%を標準としている¹¹⁾。

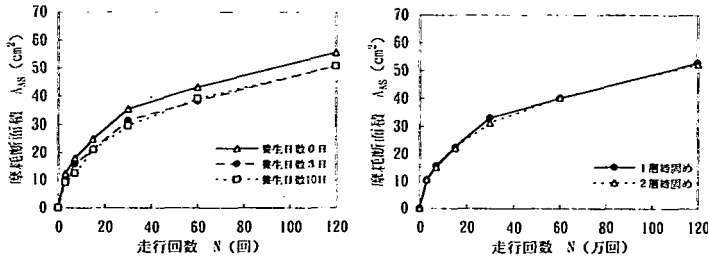
粗骨材のすりへり減量と摩耗量との関係は、図-20に示すように、全体的には粗骨材のすりへり減量が多いほど摩耗量が大きくなる傾向にあるが、相関性は小さくなっている。一方、図-21から、粗骨材の実積率が大き

いほど摩耗量が減少する有意な相関が認められる。これまでの研究でも、強度が同一であっても碎石を用いたコンクリートの方が、砂利を用いたコンクリートよりも摩耗量が大きくなる傾向があることが確かめられており^{9), 12)}、これは外力が作用した場合に、角張りが多い(実積率が小さい)骨材ほど、丸みがある骨材に比較して、角張り部分の狭い範囲で外力を受けるため摩耗し易くなるものと推察される。

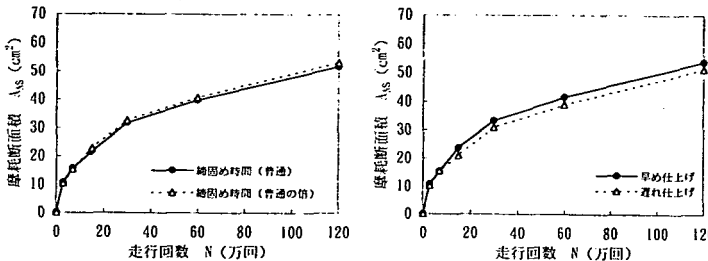
また、粗骨材の最大寸法と摩耗量との関係は、鋼球を用いたロサンゼルス試験を行った場合、骨材の粒径(5~60mm)とすりへり減量との関係は、大粒径になるにつれて減量が低下することが検証されており^{34), 37)}、一方、最大寸法が大きいほど骨材間のモルタル分が多くなるため摩耗量が大きくなる傾向にある。したがって、最大寸法は配合によって摩耗量と正^{23), 24)}、負²²⁾の関係が認められ、相関性は小さくなっている(試験Ⅲ・Ⅵ・Ⅸ)。

b) 細骨材

図-22、図-23は、それぞれ細骨材の単位容積質量、粗粒率と摩耗量との関係である。単位容積質量・実積率が大きく、粗粒率が大きいほど摩耗量が減少する傾向が認められる。単位容積質量が大きい細骨材は、粒形が良



(a) 湿潤養生日数 (b) 締固め方法



(c) 締固め時間 (d) 表面仕上げ時期

図-24 施工方法と摩耗量との関係 (ST, 試験VII, V=40km/h, W_L=2.0ton)

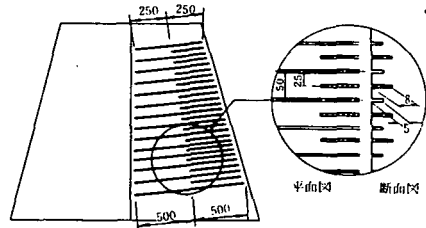


図-26 グルーピングの形状

く、コンクリートの単位水量が少なく圧縮強度が高くなる傾向があることが検証されており^{32), 33)}, このためと考えられる。また、吸水率が大きいほど圧縮強度が減少し³²⁾, 摩耗量が増加する傾向が認められる。

粗粒率の大きい細骨材は、粒径が大きい粒度の組成が多く粗めとなっているが、前述のように、鋼球を用いたロサンゼルス試験を行った場合、大粒径になるにつれてすりへり損量が低下することが検証されており、この傾向と適合しているものと考えられる。

(5) 施工方法

施工方法がコンクリートの摩耗に及ぼす影響を調べるため、湿潤養生日数 (0, 3, 10日), 締固め方法 (1層締固め, 2層締固め), 振動機種 (内部振動式, 表面振動式), 締固め時間 (普通, 普通の2倍), 表面仕上げ時期 (早め, 遅め) およびコンクリートのスランプ (0, 6 cm) を変えて試験を行った (試験VII)。摩耗量と相関性が認められたのは、コンクリートの強度と相関がある湿

表-4 耐摩耗材の種類

材料名	比重	モース硬度	備考
外国製耐摩耗材	3.21	9	主成分、シリコンカーバイド
人工エメリー	3.71	8	すりへり減量(D粒度)17.5%
天然エメリー	3.26	8	すりへり減量(D粒度)14.0%
珪粉	7.26	8	相違、焼戻シマルテンサイト
珪砂	2.52	7	すりへり減量(D粒度)11.9%

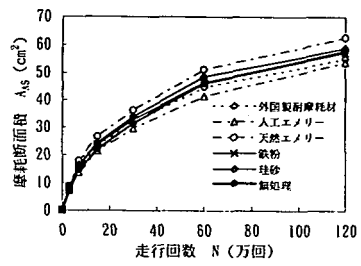


図-25 耐摩耗材と摩耗量との関係 (ST, 試験II, V=40km/h, W_L=2.0ton)

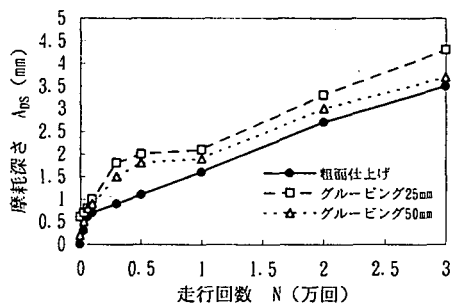


図-27 グルーピングのある路面の摩耗 (ST, 試験III, V=60km/h, W_L=2.0ton)

潤養生日数, スランプ (単位水量の相違), 表面仕上げ時期であり, これら以外の施工方法による摩耗抵抗性の相違は認められない (代表として図-24参照)。

(6) 耐摩耗材

耐摩耗材が摩耗抵抗性に及ぼす影響を調べるため, 表-4に示す5種類の耐摩耗材をコンクリート表面に散布し, 摩耗試験を実施した (試験II)。図-25に示す試験結果から, いずれの耐摩耗材も摩耗抵抗性の改善は認められない。試験の終了後, 各供試体からコアを採取し断面を観察すると, 各耐摩耗材は表面から深さ0~5mm程度の範囲に分布しており, 表面のモルタル層に埋め込まれているが, 摩耗試験中には, 細骨材と同様に剥離飛散してしまうため, 耐摩耗材としての効果が現われてこな

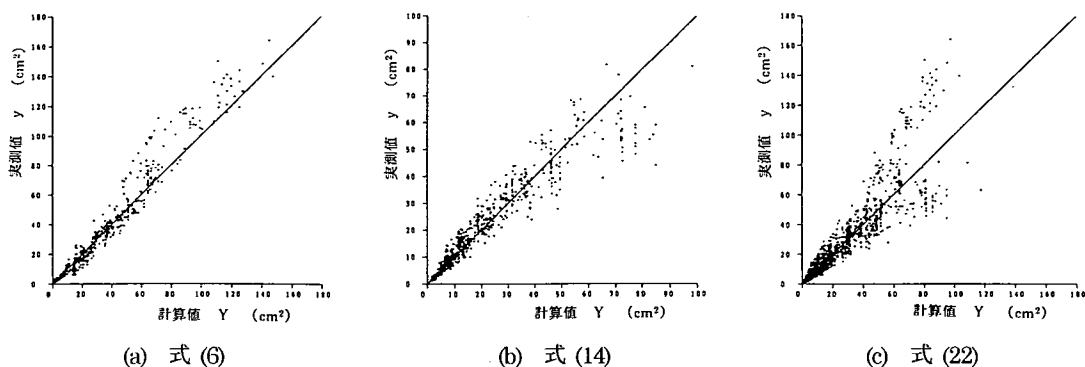


図-28 摩耗量の実測値と計算値との代表的な関係

いものと考えられる。

(7) グルーピング

路面のすべり抵抗を向上させるためグルーピングを採用した場合、換言すると供用前から人工的に路面に凹凸がついているわけであり、一般の路面とは摩耗現象が異なる。図-26および図-27は、グルーピングの有無による摩耗量の相違を示したものである(試験Ⅲ)。グルーピングのある路面では、溝の切削により当初から0.6mm(25mm間隔の場合)または0.2mm(50mm間隔の場合)の摩耗深さが存在しているものとみなすことができ、スパイクタイヤの走行により平均摩耗深さ約2mmまで急激に摩耗が進行する。この結果、グルーピング路面は、一般路面の摩耗深さが2mmに達する通過回数の約半分の回数で、同一の深さに達している。ところが、角欠けが終りグルーピングが摩耗する深さ約2mm以上になると、一般の路面とほぼ同等の勾配で摩耗が進行しており、最終的な摩耗量の差は、当初の溝の切削による摩耗深さの差になっている。この現象は、砂利に比較して角張りの多い(実積率が小さい)碎石の方が、摩耗量が多くなることも一致している。また、溝の方向が走行方向に直角な場合も、同様な傾向となっている²³⁾。

5. コンクリートの摩耗量の推定

(1) 摩耗量の重回帰分析結果

以上に、コンクリートの摩耗に及ぼす各種の要因について述べたが、これらの諸要因と摩耗量との関係を総合的にデータ解析(重回帰分析)した結果から、主要な関係を表-5および図-28に示す(記号は表-3参照)。説明変数 x_1, x_2, \dots は、変数増減法で取り込まれた順番(相関性の順)に配列している。また、データの範囲は表-3で示したが、データの偏りのため、変数とする各要因相互の相関性(多重共線性)等に起因して合理性

に欠ける関係となる変数や、変域が狭少な変数は除外することによって、高度の相関が認められる変数の組み合わせとなるように採用する項目数 i を検討した。

変数とした項目は、タイヤの種別ごとに次に示す3ケースについて、コンクリートの圧縮強度、曲げ強度を変数として区分して対比した。

[ケース1] : 主要な諸要因で、項目数15とする場合

[ケース2] : 項目数11~7とする場合

[ケース3] : 項目数5~4に限定する場合

チェーンタイヤの場合、表-3から、摩耗断面積 A_{AC} が 164cm^2 (平均摩耗深さ55mm程度)までと広いが、重相関係数 $R=0.97\sim 0.99$ で高度の相関性が認められる。摩耗に対しては、タイヤ条件および走行条件の及ぼす影響が大きく、供試体条件の影響が比較的小さいことがわかる。相関性が高い順に示すと、走行回数 N 、外周長当たりの金属部荷重 M_L 、速度 V が卓越しており、次に軌道半径 R_A 、細骨材の単位容積質量 S_T 、軌道変位 H_E 、輪荷重 W_L 、粗骨材の実積率 G_G 、細骨材の粗粒率 S_{FM} 、コンクリートの圧縮強度 f_{c28} 、曲げ強度 f_{b28} 、走行開始時の材齢 Δt 等となっている。タイヤの走行条件のうち、 R_A とは正の相関が認められ、回転半径が大きいほどタイヤに働く遠心力が小さくなりコーナリングフォースも小さくなるために、チェーンの荷重が路面に作用する分力が大きくなることに起因すると考えられる。したがって、 H_E ととも正の相関が認められる。

スパイクタイヤの場合、表-3から、摩耗断面積 A_{AS} の変域が 82cm^2 (平均深さ30mm程度)までであり、重相関係数 $R=0.82\sim 0.84$ で、チェーンタイヤの場合に比較して相関性が低下している。相関性が高い順は、ほぼ次のとおりである。

$N, W_L, V, f_{c28}, S_T, S_{FM}, G_G, S_Q, G_M, R_A$
 チェーンタイヤの場合と異なる傾向は、 N, W_L との相関性が高いものの M_L との相関は認められず、 V との相関が低くなっていることである。また、 R とは負の相関が認

表一5 摩耗量の重回帰分析結果

ケース1	$A_{AC} = 10^{-7.7427} \cdot N^{0.5375} \cdot M_L^{2.1936} \cdot V^{0.9266} \cdot R_1^{1.8887} \cdot S_T^{-4.5006} \cdot H_E^{0.3175} \cdot f_{c28}^{-0.3417} \cdot G_S^{0.2900} \cdot C_G^{2.3292} \cdot S_{FB}^{-0.5622} \cdot G_1^{0.4271} \cdot Z_A^{0.0855}$ (3.3) (85.7) (50.5) (27.9) (11.4) (-9.0) (5.0) (-3.5) (4.4) (4.2) (-2.2) (2.6) (1.7) (4)
	$A_{AC} = 10^{-5.6679} \cdot N^{0.8350} \cdot M_L^{2.1996} \cdot V^{0.9304} \cdot R_1^{1.9475} \cdot S_T^{-4.5911} \cdot H_E^{0.2056} \cdot f_{b28}^{-0.4359} \cdot G_S^{1.7822} \cdot S_{FB}^{-0.7245} \cdot G_5^{0.1471}$ (7.0) (86.8) (51.0) (27.9) (12.2) (-9.6) (7.4) (-3.8) (4.2) (-3.1) (2.7) (2.7) (5)
ケース2	$A_{AC} = 10^{-0.0668} \cdot N^{0.8077} \cdot M_L^{1.5850} \cdot V^{1.1425} \cdot S_T^{-3.5519} \cdot S_{FB}^{-1.5024} \cdot W_L^{0.29744} \cdot f_{c28}^{-0.4528}$ (9.5) (85.6) (19.8) (38.8) (-11.0) (-5.8) (4.8) (-4.5) (6)
	$A_{AC} = 10^{2.8589} \cdot N^{0.7968} \cdot M_L^{1.5113} \cdot V^{1.1624} \cdot G_C^{2.1330} \cdot f_{c28}^{-0.5621} \cdot W_L^{0.39804} \cdot S_{FB}^{-0.5929}$ (4.8) (80.5) (18.2) (37.6) (-7.7) (-5.2) (6.2) (-2.3) (7)
ケース3	$A_{AC} = 10^{-1.2312} \cdot N^{0.7625} \cdot M_L^{1.4219} \cdot V^{1.2447} \cdot W_L^{0.5185} \cdot f_{c28}^{-0.5833}$ (4.1) (81.5) (17.1) (40.9) (9.3) (-5.9) (8)
	$A_{AC} = 10^{-2.7908} \cdot N^{0.7418} \cdot M_L^{2.1023} \cdot V^{1.2681} \cdot f_{c28}^{-0.2996}$ (10.5) (76.2) (49.0) (39.1) (-3.0) (9)
ケース4	$A_{AC} = 10^{1.1694} \cdot N^{0.7812} \cdot W_L^{1.3505} \cdot V^{1.2235} \cdot f_{c28}^{-0.8405}$ (3.6) (68.9) (41.3) (33.0) (-7.0) (10)
	$A_{AC} = 10^{0.5480} \cdot N^{0.7180} \cdot W_L^{1.3272} \cdot V^{1.2340} \cdot f_{b28}^{-0.9193}$ (2.2) (68.6) (41.6) (33.3) (-6.6) (11)
ケース5	$A_{AS} = 10^{1.8483} \cdot N^{0.6466} \cdot M_L^{0.7602} \cdot V^{0.3861} \cdot f_{c28}^{-0.3172} \cdot S_T^{-3.7683} \cdot S_{FB}^{-0.6243} \cdot R_1^{-0.8305} \cdot G_S^{0.1797} \cdot Z_A^{-0.0334}$ (5.5) (36.2) (9.4) (3.8) (-1.9) (-5.3) (-2.3) (-1.9) (1.6) (-1.6) (12)
	$A_{AS} = 10^{0.5265} \cdot N^{0.6436} \cdot M_L^{0.9842} \cdot V^{0.3368} \cdot S_T^{-3.0098} \cdot S_{FB}^{-0.8968} \cdot M_L^{-0.3428} \cdot G_S^{0.2755} \cdot G_0^{-0.1180}$ (3.8) (36.2) (7.9) (3.8) (-3.9) (-3.6) (-1.9) (2.4) (-1.6) (13)
ケース6	$A_{AS} = 10^{1.7383} \cdot N^{0.6492} \cdot M_L^{0.8081} \cdot V^{0.2737} \cdot f_{c28}^{-0.4145} \cdot S_T^{-3.3072} \cdot S_{FB}^{-0.6664} \cdot G_0^{0.1666}$ (5.1) (37.2) (10.5) (3.1) (-2.6) (-4.8) (-2.5) (1.5) (14)
	$A_{AS} = 10^{1.1267} \cdot N^{0.6366} \cdot M_L^{0.8384} \cdot V^{0.3792} \cdot f_{c28}^{-0.4849} \cdot S_0^{0.3864} \cdot S_{FB}^{-0.7601}$ (2.6) (36.1) (11.1) (4.4) (-3.1) (4.3) (-2.7) (15)
ケース7	$A_{AS} = 10^{4.6499} \cdot N^{0.6498} \cdot M_L^{0.9424} \cdot V^{0.2637} \cdot f_{c28}^{-0.3936} \cdot G_C^{-2.0070} \cdot S_{FB}^{-0.4662}$ (3.8) (36.9) (14.0) (2.9) (-2.5) (-3.2) (-1.7) (16)
	$A_{AS} = 10^{0.0982} \cdot N^{0.6637} \cdot M_L^{1.2072} \cdot V^{0.4423} \cdot f_{c28}^{-0.2998}$ (0.2) (33.4) (9.9) (4.5) (-1.9) (17)
ケース8	$A_{AS} = 10^{1.0583} \cdot N^{0.6452} \cdot W_L^{0.10169} \cdot V^{0.3686} \cdot f_{c28}^{-0.5568}$ (2.4) (36.5) (17.5) (4.2) (-3.9) (18)
	$A_{AS} = 10^{0.2784} \cdot N^{0.6418} \cdot W_L^{0.9722} \cdot V^{0.4052} \cdot f_{b28}^{-0.4189}$ (0.9) (36.0) (17.1) (4.7) (-2.8) (19)
ケース9	$A_{AT} = 10^{-0.1013} \cdot N^{0.7298} \cdot M_L^{0.9023} \cdot V^{0.9319} \cdot W_L^{0.5272} \cdot S_T^{-2.6858} \cdot f_{c28}^{-0.3005} \cdot Z_A^{-0.0525} \cdot S_{FB}^{-0.6247} \cdot G_S^{0.2113} \cdot S_0^{0.1531} \cdot G_0^{-0.0765}$ (4.1) (59.5) (51.6) (20.2) (11.0) (-4.6) (-2.6) (-3.0) (-2.9) (2.7) (1.9) (-1.9) (20)
	$A_{AT} = 10^{-0.7978} \cdot N^{0.7268} \cdot M_L^{0.9055} \cdot V^{0.9508} \cdot W_L^{0.5177} \cdot S_T^{-2.8400} \cdot Z_A^{-0.0597} \cdot S_{FB}^{-0.8367} \cdot G_S^{0.2369} \cdot G_0^{-0.0948} \cdot S_0^{0.1402}$ (4.0) (59.4) (51.8) (20.9) (10.8) (-4.9) (-3.4) (-4.1) (3.0) (-1.9) (1.7) (21)
ケース10	$A_{AT} = 10^{0.0643} \cdot N^{0.7298} \cdot M_L^{0.9047} \cdot V^{0.9315} \cdot W_L^{0.5201} \cdot S_T^{-2.1346} \cdot f_{c28}^{-0.3256} \cdot Z_A^{-0.0574} \cdot S_{FB}^{-0.6537} \cdot G_S^{0.1575} \cdot S_0^{0.1169}$ (4.3) (59.5) (51.9) (20.4) (10.9) (-4.7) (-2.8) (-3.3) (-3.0) (2.2) (1.5) (22)
	$A_{AT} = 10^{1.2209} \cdot N^{0.7251} \cdot M_L^{0.8976} \cdot V^{0.9397} \cdot W_L^{0.5722} \cdot S_0^{0.3008} \cdot f_{c28}^{-0.3259} \cdot S_{FB}^{-0.5693} \cdot G_C^{-1.1695} \cdot Z_A^{-0.0308} \cdot G_S^{0.1173} \cdot G_M^{0.1400}$ (1.5) (58.4) (51.1) (20.0) (12.4) (4.8) (-2.8) (-2.6) (-2.8) (-1.9) (1.6) (1.5) (23)
ケース11	$A_{AT} = 10^{-0.3919} \cdot N^{0.7303} \cdot M_L^{0.9065} \cdot V^{0.9486} \cdot W_L^{0.6764} \cdot f_{c28}^{-0.4781}$ (1.3) (64.0) (53.2) (21.0) (18.4) (-4.6) (24)
ケース12	$A_{AT} = 10^{-0.8031} \cdot N^{0.7276} \cdot M_L^{0.9067} \cdot V^{0.9584} \cdot W_L^{0.6517} \cdot f_{b28}^{-0.4911}$ (3.7) (63.9) (53.1) (21.4) (18.4) (-4.4) (25)

注) 下段の()内はt値 n: データ数(個) i: 項目数(個) p: 自由度 F_{out} : 取り込まれなかった項目 R: 重回帰係数 K: 決定係数 e_i : 残差eの標準偏差 z_i : (=実測値/計算値)の標準偏差 e, z の平均値を、 \bar{z} は、それぞれいずれも0.1.0

められ、回転半径が小さいほどタイヤの横すべりによるコーナリングフォースが路面に大きく作用するためと考えられる。

次に、チェーンタイヤおよびスパイクタイヤを合わせた全体の場合、すりへり断面積 A_{AT} は両者の中間的な傾向となっているが、外力の相違は M_L および W_L で表されており、相関性が高い順はほぼ次のとおりである。

$N, M_L, V, W_L, S_T, S_Q, f_{c28}, f_{b28}, Z_A, S_{FM}, G_G, G_S$

コンクリートの品質としては、 f_{b28} よりも f_{c28} の方が相関性が良くなっている。

(2) 摩耗量の推定式

摩耗に及ぼす影響が大きいのは、 M_L (チェーンタイヤの場合)、 W_L (スパイクタイヤの場合) が大きいトラックタイヤ (大型車) の走行であり、この回数に支配される。したがって、摩耗深さ A_{DC}, A_{DS}, A_{DT} (mm) の推定式としては、摩耗断面積 A_{AC}, A_{AS}, A_{AT} (cm²) をトラック用タイヤのトレッド部の幅30cmで除することにより、表-5から代表式として次式が導かれる。

$$A_{DC} = A_{AC} / 3 \quad (26)$$

$$A_{DS} = A_{AS} / 3 \quad (27)$$

$$A_{DT} = A_{AT} / 3 \quad (28)$$

実際に路面の摩耗深さを推定計算するには、要因となる車種別の走行回数、タイヤ滑り止め装置の種類別装着比率、輪荷重の分布、車線内の横断方向での車両走行位置の分布、路面のコンクリートの品質について調査を行い、これらのデータを推定式に適用する。適用に当たっては、相関性の高い要因を変数とする式を選定することおよび推定式が得られたデータの範囲は、表-3に示したとおりであることに留意する必要がある。

6. 結論

本研究により得られた結果をまとめると、次のとおりである。

(1) 路面の摩耗の原因となる各種のタイヤ滑り止め装置は、ラダー形 (タイヤチェーンを含む) とネット形 (スパイクタイヤを含む) とで路面に及ぼす外力の大きさが異なり、摩耗への影響度が異なる。

(2) 路面の摩耗現象は、作用する外力の大きさとコンクリート中のモルタル分の品質および粗骨材の品質との相互の関係によって生じる。

(3) チェーンタイヤによる路面の摩耗は、走行回数、外周長あたりの金属部荷重、走行速度および輪荷重の及ぼす影響が大きく、コンクリートの品質によっても摩耗量の差が生じる。

(4) スパイクタイヤによる路面の摩耗は、走行回数、輪荷重の及ぼす影響が大きく、走行速度およびコンクリートの品質によっても摩耗量の差が生じる。

(5) 骨材として単位容積質量および粗粒率が大きく吸水率が小さい細骨材、すりへり減量が小さく実積率が大きい粗骨材を選定し、水セメント比が小さく圧縮強度および曲げ強度の高いコンクリートとするほど、摩耗抵抗性が増加する。

(6) 摩耗による寿命の予測式としては、式(3)の重回帰式との適合性がよく、表-5から摩耗深さの推定式の代表式として式(26)~式(28)を提案する。

(7) タイヤ滑り止め装置による外力の相違は、外周長あたりの金属部荷重、走行速度および輪荷重で代表される。

謝辞：本研究にあたり日本タイヤ協会林宏技術部長、日本タイヤチェーンJIS工業会古谷淳会長から有益なご教示を賜った。ここに、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 岡田尚三：コンクリート系床の耐摩耗性，セメント・コンクリート，NO. 308，pp. 38-43，1972年10月。
- 柳田力，樽沼昌明：コンクリートの摩損試験，土木技術資料17-4，pp. 14-19，1975年4月。
- 市原薫：スパイクタイヤ問題と舗装路面，土木学会論文集，第354号/V-2，pp. 13-25，1985年2月。
- 奥田徹：ダムコンクリートリートのすりへり・洗掘損傷，コンクリート工学，Vol. 17，No. 11，pp. 40-43，1979年11月。
- 奥田徹：コンクリート構造物のすりへり摩耗による機能的寿命とその再生，第57回コンクリート講習会テキスト，セメント協会，pp. 65-78，1984年8月。
- 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年6月。
- 武井芳一，豊島憲明，岡田博明，松尾久幸，丸山武彦，下村恭巳：高強度コンクリートの耐摩耗特性に関する一考察 (その1掃流試験)，土木学会第47回年次学術講演会，pp. 352-353，1992年9月。
- 豊島憲明，岡田博明，武井芳一，松尾久幸，丸山武彦，下村恭巳：高強度コンクリートの耐摩耗特性に関する一考察 (その2衝撃すりへり試験)，土木学会第47回年次学術講演会，pp. 354-355，1992年9月。
- 増田隆，松永嘉久，渡邊芳春：高耐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年7月。
- 堀口敬：コンクリートの摩耗に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol. 31，No. 10，pp. 17-27，1993年10月。
- 土木学会：コンクリート標準示方書舗装編・ダム編 [平成8年制定]，1996年3月。
- 三和久勝，堀田宣道，金子恒夫，飯田文夫：コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験，試験所報告 (昭和45年度)，日本道路公団試験所，pp. 18-31，1971年11月。
- 金子恒夫，飯田文夫：コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験-第2報-，試験所報告 (昭和46年度)，日本道路公団試験所，pp. 113-117，1972年12月。

- 14) 金子恒夫, 飯田文夫: コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験-第3報-, 試験所報告(昭和46年度), 日本道路公団試験所, pp. 118-122, 1972年12月.
- 15) 兼田郁, 堀田宣道, 飯田文夫: コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験-第4報-, 試験所報告(昭和47年度), 日本道路公団試験所, pp. 65-71, 1973年12月.
- 16) 三和久勝, 豊福俊泰, 飯田文夫: コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験-第5報-, 試験所報告(昭和49年度), 日本道路公団試験所, pp. 64-75, 1975年12月.
- 17) 三和久勝, 豊福俊泰: コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験-第6報-, 試験所報告(昭和49年度), 日本道路公団試験所, pp. 76-92, 1975年12月.
- 18) 三和久勝, 細田和夫: コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験-第7報--コンクリート舗装のすりへり・すべり特性に影響する配合および施工要因-, 試験所報告(昭和50年度), 日本道路公団試験所, pp. 75-89, 1976年12月.
- 19) 三和久勝, 村木宏行: コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験-第8報--コア供試体を用いたすりみかき試験-, 試験所報告(昭和51年度), 日本道路公団試験所, pp. 51-61, 1977年12月.
- 20) 豊福俊泰, 村木宏行: コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験-第9報-, 試験所報告(昭和52年度), 日本道路公団試験所, pp. 153-178, 1978年12月.
- 21) 宮崎都三雄, 村木宏行: コンクリート舗装のすりへり・すべり抵抗に関する室内試験-新しい材料・配合による研磨試験-, 試験所報告(昭和53年度), 日本道路公団試験所, pp. 81-91, 1979年11月.
- 22) 宮崎都三雄, 村木宏行: コンクリート舗装のすりへり・すべり抵抗に関する室内試験-新しい材料・配合による研磨試験(第2報)-, 試験所報告(昭和54年), 日本道路公団試験所, pp. 84-96, 1980年12月.
- 23) 宮崎都三雄, 村木宏行: コンクリート舗装のすりへり・すべり抵抗に関する室内試験(第3報)-路面性状とすべりについて-, 試験所報告(昭和55年度), 日本道路公団試験所, pp. 62-69, 1981年11月.
- 24) 豊福俊泰, 吉岡博幸, 高橋隆: コンクリート舗装のすりへり・すべり抵抗に関する室内試験(第4報)-骨材とすべり抵抗の関係-, 試験所報告(昭和61年度), 日本道路公団試験所, pp. 62-69, 1981年11月.
- 25) 村国誠, 林康啓, 桜井茂, 長瀬恒久: 雪氷路面における各種タイヤ・すべり止め装置の性能試験, 試験所報告(昭和61年度), 日本道路公団試験所, pp. 123-139, 1987年11月.
- 26) 赤井公昭, 豊福俊泰: すりへりを考慮したコンクリート舗装の構造設計法, 第13回日本道路会議論文集, 日本道路協会, pp. 299-300, 1979年10月.
- 27) 豊福俊泰, 宮崎都三雄・村木宏行: 高速道路におけるコンクリート舗装の構造設計法-ひびわれ及びわだち掘れの推定法-, 試験所報告(昭和53年度), 日本道路公団試験所, pp. 67-80, 1979年12月.
- 28) 赤井公昭, 豊福俊泰: 骨材の性質・性能-すりへり-, コンクリート工学, Vol. 16, No. 9, pp. 25-28, 1978年9月.
- 29) 宮崎都三雄: コンクリートの耐久性-コンクリート舗装とすりへり抵抗-, 道路とコンクリート, No. 49, pp. 33-39, 1980年9月.
- 30) 豊福俊英: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, 日本コンクリート工学協会, pp. 1245-1250, 1990年6月.
- 31) 豊福俊英: アラムド繊維補強コンクリートの掃流および衝撃摩耗特性, セメント論文報告集, pp. 766-771, 1995年12月.
- 32) 豊福俊泰: データ解析によるコンクリートの圧縮強度の推定方法に関する研究, 土木学会論文集, 第420号/V-13, pp. 125-134, 1990年8月.
- 33) 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年6月.
- 34) 高桑重三, 土田広, 村尾剛: ロサンゼルス試験における骨材のすりへり損失発生に関する実験報告, セメント技術年報XVIII, pp. 444-447, 1964年12月.
- 35) 小柳洽, 六郷恵哲, 斎藤保則: コンクリートの衝撃摩耗におよぼす乾湿条件および衝撃角度について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp. 265-270, 1989年6月.
- 36) 豊福俊泰: データ解析によるコンクリートの配合, 強度および耐久性の推定方法に関する研究, 土木学会論文集, 第433号/V-15, pp. 239-242, 1991年8月.
- 37) 奥田徹, 中野毅弘, 角田武司: ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり減量に関する2, 3の考察, セメントコンクリート, NO. 252, pp. 14-21, 1968年2月.

(1996. 3. 18 受付)

STUDIES ON ABRASION CHARACTERISTICS OF CONCRETE PAVEMENT

Toshiyasu TOYOFUKU, Hisakatu MIWA, Makoto MURAKUNI,
Toshihide TOYOFUKU, Tomio MIYAZAKI and Hiroyuki MURAKI

In water-freezing and snow-falling areas, concrete pavement suffers abrasion from the traffic of wheels equipped with slip-prevention devices such as tyre chains or studded tyres. This study aims to clarify the effects vehicles and concrete qualities (i.e., mix proportion, aggregate, and compressive strength) have on abrasion in experiments using a large rotating wheel-type apparatus fitted with common tyres for automobiles and autotrucks.

Various factors suggested by the experiments are analyzed with multiple regression analysis, and equations estimating the amount of abrasion on concrete pavement are proposed.