

モルタル，コンクリートの表面破壊特性と 衝撃摩耗特性に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON THE SURFACE FRACTURE AND THE IMPACT WEAR OF MORTAR AND CONCRETE

戸川 一夫*・中本 純次**

By Kazuo TOGAWA and Junji NAKAMOTO

1. 緒 言

前報¹⁾²⁾でタイヤチェーンによるモルタルおよびコンクリートの摩耗特性を衝撃あるいは押込みによる表面破壊特性と考え、摩耗粉の発生は Rabinowicz³⁾ によって示されたエネルギーバランス理論で説明できるひびわれ伝播の結果であり、ひびわれの発生条件は材料の表面エネルギーの指標としての限界ひずみエネルギー解放率 G_c ⁴⁾ に関係することをほぼ明らかにした。さらには、タイヤチェーンによるモルタル、コンクリートの耐摩耗性の指標として限界ひずみエネルギー解放率 G_c がある程度まで有用であることを示唆した。

ところで、ぜい性材料とくにガラスの表面に生じるコーンひびわれの成長、すなわち表面破壊について、Lawn⁵⁾ らはインデント（以下衝撃体という）として鋼球を用いて、鋼球を押込んだ時あるいは落下させた時、ガラスに生じるコーンひびわれについての実験の結果、鋼球の径がある大きさまでであると、コーンひびわれの成長はエネルギーバランス理論で説明されるとし、ひびわれの発生条件は材料の表面エネルギーに関係するとしている。

表面のコーンひびわれの発生機構に関する Lawn の理論と表面にひびわれが発生した結果としての摩耗粉の発生機構に関する Rabinowicz の理論は対象とする現象が異なっているが、本論 2. (1) で論じているように理論解はまったく一致した型に帰するものであり、いずれの現象も総じて表面の破壊現象であるとの見方をすれば、種々の衝撃体による表面の破壊機構は結局のところ、材料の表面エネルギーと関係したエネルギーバランス理論で一貫して説明しうる性質のものではないかと考えられるわけである。

本研究は 2 つの目的をもっている。その 1 つは、ペースト、モルタルあるいはコンクリートの表面破壊機構について、対象とする現象がある程度異なる、鋼球を押込むあるいは落下させる場合のコーンひびわれの発生機構とスパイクタイヤあるいはタイヤチェーンによる摩耗粉の発生機構が、材料の表面エネルギーと関係したエネルギーバランス理論で一貫して説明しうるものかを考察することである。他の一つは、材料表面の剝離破壊が衝撃体の押込みあるいは衝撃によって表面にひびわれが生じた結果であると考えられる形態、ここではモルタルあるいはコンクリートの摩耗についてよく問題となる研磨材、スパイクタイヤあるいはタイヤチェーンの繰り返し押込み作用や衝撃作用によると考えられるモルタル、コンクリートの衝撃摩耗現象を取り上げ、その摩耗特性と、モルタル、コンクリートの間摩耗性の指標として、ひびわれ進展性状を巨視的かつ間接的に表わすと考えられる限界ひずみエネルギー解放率 G_c ⁶⁾⁷⁾ の有用性を論じるものである。

なお、タイヤチェーンによる摩耗特性に関してはすでに報告済みであるが、本報告では摩耗試験機を前報のものよりも、より実際に近い摩耗現象をとらえられるように新作したもので、再度タイヤチェーンによる摩耗特性についても検討した。また、研磨材によるモルタル、コンクリートの表面破壊の発生機構については、研磨材が存在するために摩耗粉だけを選別することができないので考察していない。

2. 鋼球によるガラス、ペーストおよびモルタルの表面破壊

ここでは、表面破壊特性に関して、エネルギーバランス理論に基づいて展開された Lawn の解と Rabinowicz の解がまったく一致したものであることを述べ、種々の衝撃によるモルタルあるいはコンクリートの表面破壊機

* 正会員 工修 和歌山工業高等専門学校助教授 土木工学教室
** 正会員 和歌山工業高等専門学校助手 土木工学教室

表一1 コーンひびわれに関する Lawn の理論

	静 的	動 的
エネルギーバランス理論	$P_c/r = \text{Const.}$	$rh_c^{3/5} = \text{Const.}$

構がエネルギーバランス理論で説明できるか否かの糸口をつかむことを目的とする。

(1) ガラスのコーンひびわれの発生について

Lawn らはガラス表面のコーンひびわれの発生条件について、鋼球の径がある大きさまでならば、表一1 に示す理論が適用できることを実験的に確かめている。なお、表一1 の理論が適用できる鋼球の径のある大きさというのは供試材料が変われば変わってくることにしている。ここで、 P_c はコーンひびわれがはじめて発生する静的な押込みによる 限界荷重、 h_c は鋼球を落下させたときコーンひびわれがはじめて生じるときの限界落下高さ、 r は用いる鋼球の半径である。もし、コーンひびわれの発生がエネルギーバランス理論に従うのであれば、静的な押込みの場合 $P_c/r = \text{Const.}$ 、動的な衝撃の場合 $rh_c^{3/5} = \text{Const.}$ なる関係が成り立つことになる。これらの関係の右辺の定数項の中には、材料の表面エネルギー γ が含まれ、 $P_c/r \propto \gamma$ あるいは $rh_c^{3/5} \propto \gamma$ なる表示ができる。したがって、材料の表面エネルギーは材料表面の静的あるいは動的な破壊特性に重要な影響をもつことになり、表面エネルギーの大きい材料はコーンひびわれの発生する静的な限界荷重、動的な限界落下高さともに大きくなることを意味している。表一1 に示す結論を導く過程で、用いた鋼球の半径 r とコーンひびわれの半径 a との間には、

$$a^3 = \frac{3}{4}(k/E)P_c r \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$k = \frac{9}{16} [(1-\nu^2) + (1-\nu'^2)E/E']$$

- E : 供試材料のヤング係数
- E' : 衝撃体のヤング係数
- ν : 供試材料のポアソン比
- ν' : 衝撃体のポアソン比

なる関係がある。供試材料と衝撃体との間のみかけの平均圧力 p_0 は式 (2) で示される。

$$p_0 = \frac{P_c}{\pi a^2} \dots\dots\dots (2)$$

したがって、静的な押込みの場合、 $P_c/r \propto r$ なる関係は p_0 を供試材料のみかけの降伏値 σ_y に等しいとして、 σ_y/E は各材料につきほぼ一定とし、さらにみかけの降伏値 σ_y は材料の硬さ p にほぼ比例するとすれば、

$$p = \sigma_y = p_0 = \frac{P_c}{\pi a^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{p}{E} = \frac{P_c}{\pi a^2 E} = \text{Const.} \dots\dots\dots (4)$$

$$\therefore P_c/E = K_1 \pi a^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$\therefore a^3 = \frac{4}{3}(k/E)P_c r = \frac{4}{3}kK_1 \pi a^2 r \dots\dots\dots (6)$$

$$\therefore a = K_2 r \dots\dots\dots (7)$$

$$P_c/r = \frac{p \pi a^2}{r} = K_3 p a \propto r \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 K_1, K_2, K_3 は常数

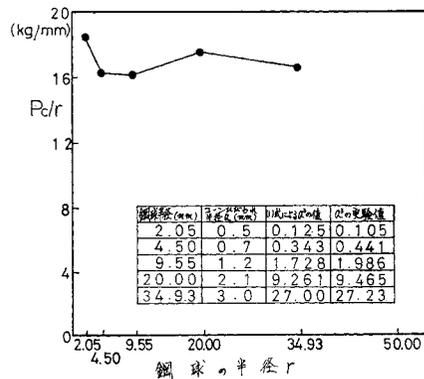
式 (8) なる関係が得られる。すなわち、コーンひびわれの発生に関する Lawn の解は、摩耗粉の発生機構に関する Rabinowicz の解と同一型に帰することになり、対象とする破壊現象は異なるものの、いずれの現象も表面破壊であるという観点にたてば、表面破壊の発生機構は材料の表面エネルギーと関係したエネルギーバランス理論で説明しうることを示唆していると考えられる。

(2) 実験概要

本実験では半径 2.05 mm, 4.50 mm, 9.55 mm, 20.00 mm, 34.93 mm および 50.00 mm の 6 種の鋼球を用いて、市販のソーダガラス、ペーストおよびモルタルについて、静的な押込み試験と動的な落下試験によるコーンひびわれの発生性状を実験的に検討した。なお、ここで用いた鋼球の径は 3. 以降で報告する衝撃体としての研磨材、スパイクあるいはチェーンのみかけの径より大きいかほぼそれらの径に近いと考えられるものである。本実験は静的な押込み試験は鋼球の上にて式(3)の載荷をする方法とし、動的な落下試験は電磁石を利用して鋼球を落下させる方法とした。

(3) 実験結果の考察

ガラスについての実験結果を図一1 と 図一2 に示す。コーンひびわれはガラスの表面からただか 0.5 mm の



図一1 ガラスに生じるコーンひびわれの限界荷重に関する実験結果 (押込み試験)

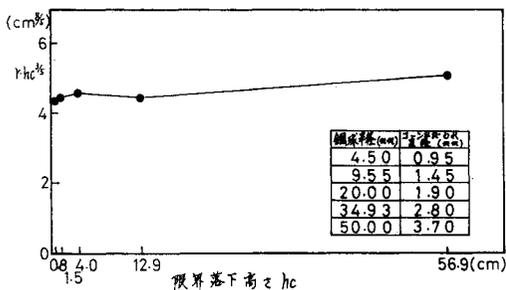


図-2 ガラスに生じるコーンひびわれ限界落下高さに関する実験結果 (落下試験)

さ方向に円錐台形の側面の形となって生じている。本実験では半径 2.05 から 50.00 mm の鋼球を用いてコーンひびわれの発生性状を調べた結果、静的な押込みの場合 $P_c/r = \text{Const.}$ あるいは動的な落下試験については $rh_c^{3/5} = \text{Const.}$ なることが明らかにされたといえる。したがって、ガラスのコーンひびわれの発生は用いた鋼球の径の範囲では静的な場合も動的な場合もエネルギーバランス理論に従うことが示唆されたといえよう。

ペーストおよびモルタルについての実験結果を図-3 と図-4 に示す。ペーストおよびモルタルの場合、ガラスと違って実験上まず問題になることはペースト等は不透明であること、また若干の塑性変形能を有していること等がコーンひびわれの発生を明確に測定するのを困難にしている点である。そこで、ペースト等のコーンひびわれの発生とその限界荷重を知る方法として鋼球を押込んだり、落下させたとき供試材料表面に生じて、破壊の発生あるいは破壊の発生につながるかと仮定する円形のくぼみを利用することによって限界荷重あるいは限界落下高さを見積ることにしてみた。ガラスの表面に生じるコーンひびわれの半径とそのとき用いられた鋼球の半径との間に本実験 (図-1 参照) では式 (1) の関係がほぼ成立しているの、もし、ペーストあるいはモルタルに式 (1) の関係が適用できるとするならば、本実験で用いたガラス、ペーストあるいはモルタルの弾性係数およびポアソン比の値から算定して、同一鋼球と同一限界荷重の場合で考えると、ペースト等のコーンひびわれの径はガラスのコーンひびわれの径の大略 1.4 倍大きくなることになる。もちろん、ガラス、ペーストあるいはモルタルの表面エネルギーはそれぞれ異なり、したがって、限界荷重はおのずと異なると考えられ、限界荷重時のコーンひびわれの径については、ガラスのコーンひびわれの径に対するペーストあるいはモルタルのコーンひびわれの径の比率は上述した 1.4 倍になるとは限らないであろう。しかしながら、本実験ではペーストあるいはモルタルの表面破壊性状の解明の糸口をみつける目下的方法として、ペースト等については、ある径の鋼球を押込んだ

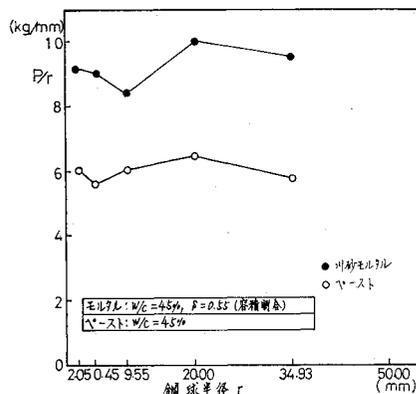


図-3 鋼球によるペースト等の表面破壊試験結果 (押込み試験)

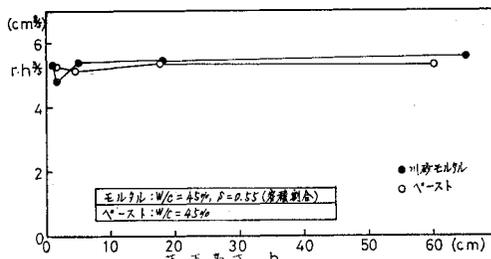


図-4 鋼球によるペースト等の表面破壊試験結果 (落下試験)

ときあるいは落下させたとき、ガラスに限界荷重時に生じるコーンひびわれの径の 1.4 倍からなるくぼみがペースト等に生じたときの荷重あるいは落下高さをペースト等の限界荷重 P あるいは限界落下高さ h と仮に定めることにした。

本実験結果を考察すると、用いた鋼球の範囲では $P/r = \text{Const.}$ あるいは $rh_c^{3/5} = \text{Const.}$ なる傾向が得られ、ペーストあるいはモルタルの表面に生じて、破壊につながるかと仮定したくぼみの発生条件は静的な押込みの場合も動的な落下の場合も、エネルギーバランス理論で説明できる性質のものではないかと思われる。しかしながら、今後より合理的な実験方法を確立することで確かな結論を得ねばならないと考えている。

3. 研磨材によるモルタル、コンクリートの摩耗特性

(1) 研磨材による摩耗について

研磨材による摩耗試験は一般に研削摩耗とよばれる現象を試験するもので、粉体と材料表面との間に生じる摩耗すなわち材料表面に粉体が入った場合、粉体と材料表面が衝突する場合などを想定したものである。研削摩耗

は巨視的には引っかきと押込み作用によって材料表面に傷ができることが摩耗の原因といわれている⁸⁾。しかしながら、微視的に考えれば、供試材料表面には無数の凸凹があり、研磨材は引っかき移動するときも、おそらく飛びはねていること、また試験型式にもよるが、一般に試験機自体も振動していると考えられるので、たとえば本型式のように供試体とタイヤとの間にある研磨材も振動していると予想され、研削摩耗といえども、粉体による一種の衝撃摩耗に類せられるものであろう。したがって、供試材料表面が研磨材によって剝離して摩耗されるのは衝撃を伴った引っかきあるいは押込みによって材料表面にひびわれが生じた結果であると考えられることができる。

(2) 実験計画

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は人工軽量細骨材（比重 1.94）、川砂（比重 2.65）、石灰岩砕砂（比重 2.67）および高炉スラグ細骨材（比重 2.59）を用い、使用に際してはあらかじめ粒度調整を行って各細骨材ともに同一粒度分布にし、粗粒率 2.77 と 3.63 の 2 種類の粒度分布のものを各細骨材について準備した。粗骨材は最大寸法 10 mm の石灰岩砕石（比重 2.62）および高炉スラグ（比重 2.45）を用いた。モルタ

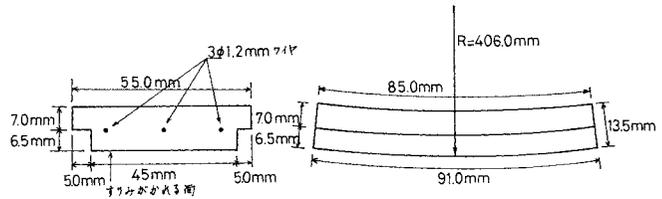


図-6 急速すりみがき試験に使用される供試体形状

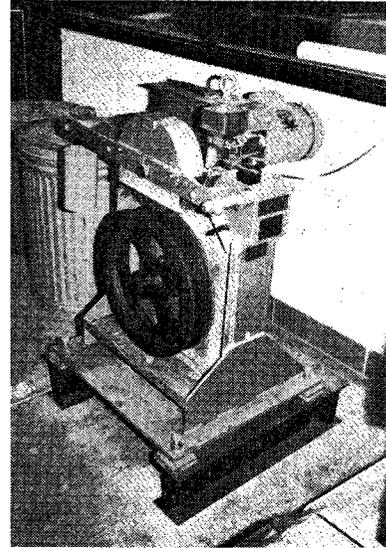


写真-1 急速すりみがき試験機

表-2 実験計画表

要 因		水 準	
A	細骨材種類	4	(1) 人工軽量骨材 (2) 川砂 (3) 石灰岩砕砂 (4) 高炉スラグ
B	細骨材量 (セメント砂容積割合)	2	(1) 1:1.5 (2) 1:3
C	細骨材粒度率 (粗粒率)	2	(1) 2.77 (2) 3.63
D	粗骨材種類	2	(1) 石灰岩砕石 (2) 高炉スラグ
E	粗骨材量 (コンクリート容積に 対して)	2	(1) 0% (2) 30%
F	水セメント比 (%)	2	(1) 45% (2) 55%

ルおよびコンクリートの配合計画を 表-2 に示す。実験は実験計画法によって行った。

摩耗試験機は BS 812 規格⁹⁾の急速すりみがき試験装置を使用した（図-5 および 写真-1 参照）。ロードホイールはフラットな円周をもち、1分間に 315~325 回転する。その円周上には直径 406 mm、幅 45 mm の連続した表面をもつように 14 個の供試体を取り付けられるようになっている（図-6 参照）。ゴムタイヤは幅 50 mm、硬さ 55±5 IRHD（国際規格ゴム硬さ値）、タイヤ空気圧 3.16 kg/cm² であり、ロードホイールの円周上に取り付けられた供試体表面に 30.7±0.5 kg の荷重をかけられるように設計されている。研磨材としてシリコンカーバイト（サイズ 150）と水がそれぞれ 1分間に 6~8 g と 50~70 ml、ゴムタイヤとロードホイールが接するところに直接注がれている。一回の摩耗試験は 7 種類の供試体を一種類につき 2 個、計 14 個の供試体をロードホイールに取り付けて、9時間連続して行った。摩耗深さはあらかじめ摩耗試験前の個々の供試体の厚さを指定した 4 箇所についてマイクロメーターで測定しておく、摩耗試験後の厚さとの差の平均値で表わすことにした。材料のひびわれ進展に関する抵抗性を示すと考えら

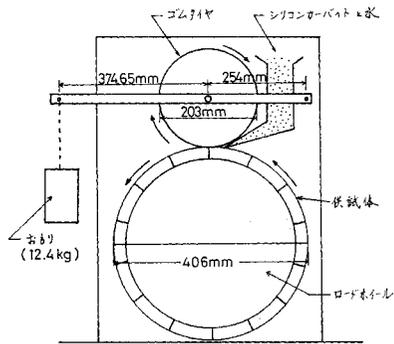


図-5 急速すりみがき試験機

れる限界ひずみエネルギー解放率 G_c の算定には Kaplan⁴⁾ の提案式を用いた。 G_c 値を測定する供試体は 4×4×16 cm の角柱供試体の長さ方向引張り側中央部に深さ 1.5 cm、開角 30° の切欠ぎをつけている。同一配合につき供試体は 2 個用意した。曲げ試験はミハエリス 2 重てこ形試験機を用いて一点載荷法で行った。弾性係数とポアソン比は φ5×10 cm の供試体を用いて求めた。

(3) 実験結果の考察

モルタルおよびコンクリートの摩耗深さに関する配合要因の分散分析結果を表-3 に示す。摩耗深さにもっとも影響する配合主効果は細骨材種類であり、ついで粗骨材種類、粗骨材量そして細骨材の粗粒率の順になっている。細骨材は川砂を使った場合がもっとも摩耗されにくい結果となり、ついで石灰岩砕砂、人工軽量細骨材そし

て高炉スラグ細骨材の順に摩耗されにくくなっており、粗骨材は石灰岩砕砂を用いた方が高炉スラグを用いる場合より摩耗深さは少なくなり、モルタルとコンクリートではコンクリートの方が摩耗抵抗が大きくなっている(図-7 参照)。

限界ひずみエネルギー解放率 G_c に関する配合要因の分散分析結果を表-4 に示す。 G_c に影響する配合主効果としては、細骨材種類と粗骨材種類である。細骨材に川砂を使用した場合が最も G_c 値は大きくなり、石灰岩砕砂、人工軽量細骨材、高炉スラグ細骨材の順に G_c は大きくなっており、粗骨材は石灰岩砕砂を用いた方が高炉スラグを用いた場合より G_c は大きくなる傾向がある(図-8 参照)。したがって、 G_c と摩耗抵抗に影響するモルタルおよびコンクリートの配合効果はほぼ同じ主効果を上げることができ、また、 G_c 値の大きい配合は摩

表-3 摩耗深さに関する配合要因の分散分析結果

	SS	DF	MS	F
A	584.7	3	194.9	71.6*
B	7.9	1	7.9	2.9
C	11.8	1	11.8	4.3*
D	43.1	1	43.1	15.8*
E	39.8	1	39.8	14.6*
F	3.3	1	3.3	1.2
AB	472.5	3	157.5	57.8*
AC	211.6	3	70.5	25.9*
BC	119.6	1	119.6	43.9*
AD	29.9	3	10.0	3.7
BD	8.6	1	8.6	3.2
CD	15.5	1	15.5	5.7*
AE	243.1	3	81.0	29.8*
BE	12.7	1	12.7	4.7*
CE	2.4	1	2.4	0.9
DE	22.0	1	22.0	8.1*
AF	60.7	3	20.2	7.4*
BF	161.0	1	161.0	59.1*
CF	29.6	1	29.6	10.9*
DF	0.1	1	0.1	0.0
EF	71.2	1	71.2	26.1*
R =	348.5	128	2.7	

* 95% 信頼限界で有意差あり

表-4 G_c に関する配合要因の分散分析結果

	SS	DF	MS	F
A	0.170	3	0.057	11.17*
B	0.011	1	0.011	2.20
C	0.007	1	0.007	1.36
D	0.024	1	0.024	4.70*
E	0.021	1	0.021	4.11
F	0.004	1	0.004	0.79
AB	0.342	3	0.114	22.51*
AC	0.120	3	0.040	7.92*
BC	0.012	1	0.012	2.41
AD	0.020	3	0.007	1.35
BD	0.000	1	0.000	0.00
CD	0.011	1	0.011	2.20
AE	0.112	3	0.037	7.33*
BE	0.015	1	0.015	2.93
CE	0.020	1	0.020	4.04
DE	0.001	1	0.001	0.29
AF	0.014	3	0.005	0.90
BF	0.105	1	0.105	20.75*
CF	0.001	1	0.001	0.20
DF	0.034	1	0.034	6.80*
EF	0.053	1	0.053	10.49
R =	0.649	128	0.005	

* 95% 信頼限界で有意差あり

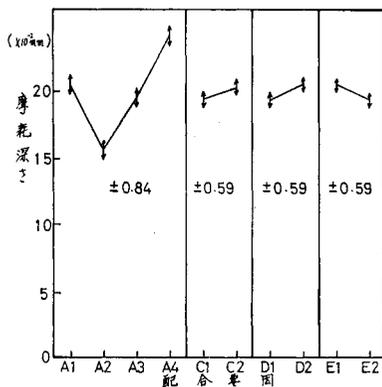


図-7 摩耗深さと配合要因との関係

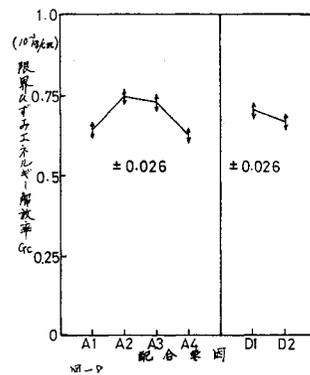


図-8 G_c と配合要因との関係

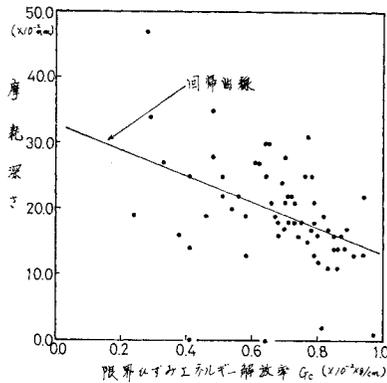


図-9 研磨材による磨耗深さ- G_c の関係

耗抵抗も大きくなる傾向を有しているようである。

研磨材によるモルタルおよびコンクリートの磨耗特性がひびわれ伝播の結果であるとするならば、前報¹⁾で述べたように材料のひびわれ進展に対する抵抗性に相当する磨耗抵抗とひびわれ進展特性を示す限界ひずみエネルギー解放率 G_c との間には相関性がえられるはずである。図-9 は磨耗深さと G_c との関係を示したものであり、限界ひずみエネルギー解放率 G_c が大きければひびわれ進展の結果と考えられる衝撃磨耗に対する抵抗性が大きくなる傾向を示しているようである。しかしながら、磨耗深さと G_c との相関係数 (43.4% で 95% の信頼限界で有意) は小さい。この理由として、この種の粉体による磨耗特性は、供試体のごく表面部 (たかだか 0.5 mm 深さ) の性質に結びついたものであり、供試体のマトリックスと骨材およびそれらの界面特性を含めた総合的、平均的な性質をとらえている G_c とは 1 対 1 の対応づけに若干の無理が生じているのではないかと考えられる。

限界ひずみエネルギー解放率 G_c に関して小柳⁶⁾らあるいは筆者ら⁷⁾はマトリックスの性質が変化しないと考えられる領域では骨材がマトリックスより堅硬であれば骨材量が多いほど、さらには骨材がマトリックスより軟かい場合には骨材量が少ないほど G_c は増加するとしている。コンクリートの磨耗特性には粗骨材の性質がきいてくるといわれ¹⁰⁾、また、そのように考えられるが、この章で取り扱った磨耗特性は粗骨材の性質に関係するほどまでには磨耗深さが至っていないので、磨耗深さと G_c との間にはばらつきが生じたと考えられる。

4. タイヤチェーンによるモルタル、コンクリートの磨耗特性

(1) 実験計画

タイヤチェーンによるモルタル、コンクリートの磨耗

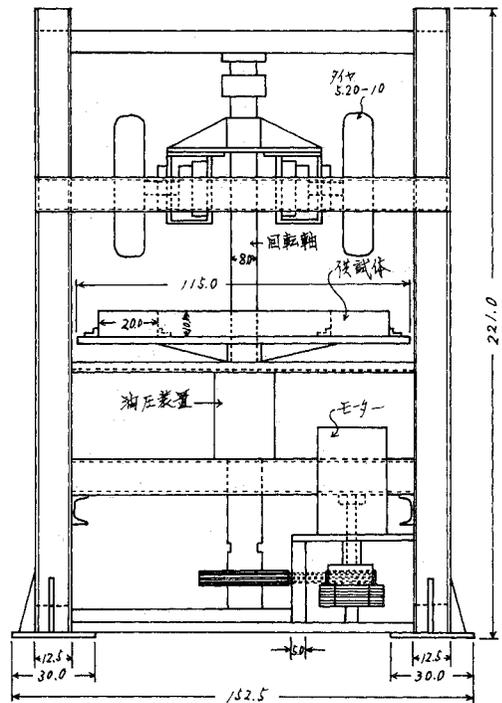


図-10 タイヤチェーン等による磨耗試験機

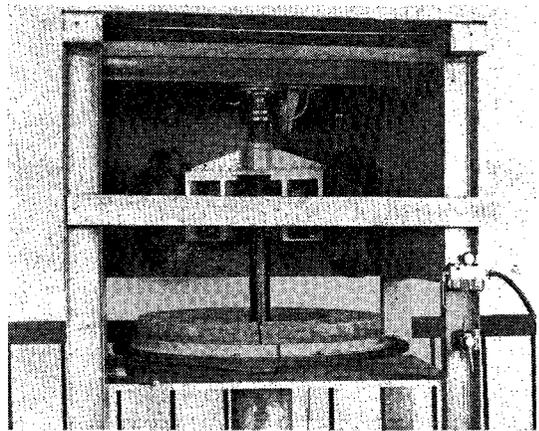


写真-2 タイヤチェーン、スパイクタイヤによる磨耗試験機

特性を調べるには 図-10 と 写真-2 に示す試験機を用いた。今回の磨耗試験装置は前報¹⁾の装置よりタイヤチェーンをつけた車両が道路上を通行するときに生じる磨耗現象をより实际的にとらえることができると考えられる。タイヤ (規格 5.20-10, 空気圧 1.6 kg/cm²) は一定の走行速度 30 km/hr で供試体面上を通過し、2本のタイヤは1位置を1秒間につき計約7回通過することになる。タイヤ部には1本につき0から0.5tまでの荷重を加えることができる。用いたタイヤチェーンは JIS 規格 500-10, 4×5 であり、横わたしチェーンは等間隔に

計8本タイヤのまわりについている。摩耗試験用供試体は外径 95 cm, 内径 55 cm, 幅 20 cm, 厚さ 10 cm のドーナツ型の中ぬき円盤である。同一配合, 同一試験条件につき供試体は一体製作し, タイヤチェーンによる摩耗特性を調べる場合には供試体の打込み面(仕上げ面)を使用した。表面仕上げ特性が摩耗特性に關与するのではないかと考えられたが, 予備実験の結果, タイヤチェーンによる摩耗特性について, 各供試体間で実験室で表面仕上げをほぼ均一に施している限りでは, 表面仕上げ性状はほとんど摩耗特性に影響しないとみなされた。試験は室内で行い, 供試体面は一部をのぞいて気乾状態とした。なお一部の供試体(表-5 に示す No. 2 供試体をさす)は散水状態で試験した。

使用セメントは普通ポルトランドセメント, 使用細骨材は川砂(比重 2.61, 粗粒率 2.60)と人工軽量細骨材(比重 1.92, 粗粒率 2.75)の2種, 使用粗骨材は最大寸法 30 mm, 粒度分布 30~20 mm 40%, 20~10 mm 35%, 10~5 mm 25%の硬質砂岩碎石(比重 2.60), 石灰岩碎石(比重 2.69)および安山岩碎石(比重 2.57), さらには最大寸法 15 mm(粒度 15~10 mm 30%, 10~5 mm 70%), あるいはギャップグレード(粒度 30~20 mm 63%, 10~5 mm 37%)の硬質砂岩碎石および造粒型の人工軽量骨材(最大寸法 15 mm, 比重 1.40)である。

試験した供試体の種類, 実験条件ならびに各種試験結果を表-5 に示す。摩耗試験は夏期室内(平均気温 28°±2°C, 湿度 75~90%)において1日1試験(タイヤチェーンによるものとスパイクタイヤによるものを1回ずつ)のペースで12日間連続して行った。供試体の試験

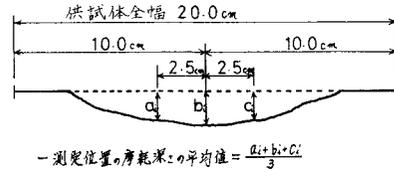


図-11 一測定位置の平均摩耗深さの算出方法

材合は 28 日である。摩耗試験は一試験につき 50 分間行ったが, その間, 試験開始時より 10 分間隔で摩耗深さの測定を行った。一位置の平均的摩耗深さは 図-11 に示す方法で算出した。測定位置はあらかじめきめた4か所であり, 4か所の平均摩耗深さを平均して表-5の摩耗深さの結果としている。

G_c 値は供試体長さ方向引張り側中央部に高さ 1.5 cm, 開角 30°の切欠きを有する 10×10×40 cmの角柱供試体を用いて3等分点載荷法によって算定した。同一配合につき4本準備した。なお, 材料の表面エネルギーに関しては, モルタル, コンクリートのような複合材料ではその真値を測定することが目下のところ不可能と考えられるが, 材料の表面エネルギーを巨視的かつ間接的に表わす限界ひずみエネルギー解放率 G_c を採用することにし, この場合, 表面エネルギー $\tau = \frac{G_c}{2}$ なる関係をもっている。圧縮強度, 動弾性係数, ポアソン比および硬さの測定には同一配合につき3本のφ10×20 cmの円柱供試体を用いた。摩耗粉の平均粒径は摩耗粉を網ふるいでふるいわけて粒度分布曲線を書き, 重量で 50% 通過するときのふるい目の径とした。なお, 摩耗粉の粒径はこれが生じた直後と試験後では相違するのではないかと考えられもするが, ここでの試験のように摩耗粉が発生後

表-5 タイヤチェーン, スパイクタイヤによる摩耗試験計画と諸結果

供試体 No.	供試体種類	水セメント比 (%)	セメント量 (kg/m³)	骨材量 (容積割合) S+G (S), (G)*	圧縮強度 (kg/cm²)	曲げ強度 (kg/cm²)	動弾性係数 (×10⁵ kg/cm²)	G _c (×10 ⁻² kg/cm)	摩耗粉平均粒径 (mm)		反発係数	摩耗深さ** (mm)	
									スパイク	チェーン		スパイク	チェーン
1	砂岩コンクリート	48	315	0.3 +0.45	380	50	5.2	1.14	0.12	0.25	18	4.0	12.0
2	砂岩コンクリート (散水試験)	48	315	0.3 +0.45	380	50	5.2	1.14	—	—	18	5.1	13.1
3	砂岩コンクリート (188 kg 載荷)	48	315	0.3 +0.45	380	50	5.2	1.14	0.13	0.24	18	1.8	7.3
4	ギャップグレードコンクリート	48	315	0.29+0.46	345	45	3.9	1.23	0.15	0.21	18	3.5	8.6
5	ギャップグレード骨材+ベースト	48	693	(0.45)	337	54	4.7	1.47	0.13	0.22	23	3.3	10.5
6	砂岩コンクリート (G _{max} 15 mm)	48	315	0.3 +0.45	332	46	4.3	1.17	0.13	0.23	17	3.3	12.8
7	高強度コンクリート (高性能減水剤使用)	28	500	0.28+0.42	597	59	4.7	1.79	0.14	0.23	27	3.6	8.6
8	川砂モルタル	48	577	(0.55)	382	37	3.6	0.90	0.14	0.20	15	4.0	27.3
9	石灰岩コンクリート	48	315	0.3 +0.45	326	42	4.8	0.85	0.13	0.20	15	6.3	21.0
10	安山岩コンクリート	48	315	0.3 +0.45	329	48	4.9	1.12	0.14	0.23	15	3.8	12.0
11	人工軽量骨材コンクリート	48	315	0.3 +0.45	255	33	3.0	0.84	0.10	0.16	15	6.1	24.3
12	人工軽量骨材モルタル	48	577	(0.55)	323	28	3.0	0.61	0.10	0.13	12	7.7	32.0

* S: 細骨材量, G: 粗骨材量, (S): 細骨材のみ, (G): 粗骨材のみ ** 最終摩耗深さ(試験時間 50 分)

ただちにはげしく飛散するような状況では発生直後の摩耗粉の径と試験後の径の間にはほとんど差はないと考えている。硬さ値としてはシュミットハンマーによる反発係数を採用した。

(2) 実験結果の考察

材料の摩耗特性を究明していく過程で摩耗性状の時間的な遷移を明らかにする必要がある。図-12 にモルタルならびにコンクリートの摩耗深さと試験時間との関係を示している。供試体 No. 3 を除いて他の供試体を試験する場合はタイヤ部に1本につき 375 kg の荷重をかけている。供試体 No. 3 についてはタイヤ1本に 188 kg の荷重をかけている。前報¹⁾で、タイヤチェーンによるモルタルおよびコンクリートの摩耗特性は処女面摩耗に匹敵することを明らかにしてきた。処女面摩耗とは摩耗量が試験時間に比例して増加する摩耗形態のことであるが、これは摩耗粉の蓄積による表面保護効果が得られない場合あるいは酸化摩耗の形態をとらない場合にみられる摩耗特性である。すなわち、処女面摩耗の場合は摩耗量は衝撃回数に比例して増加するために、摩耗量が一定量におちつくことなく、永久的に増加していくことを意味している。今回の実験でも、タイヤチェーンによる摩耗特性は処女面摩耗であることが確かめられたといえよう。

タイヤチェーンによる摩耗はチェーンによる押込みと衝撃作用によって起ると考えられるが、表面エネルギーの指標としての限界ひずみエネルギー解放率 G_c と摩耗

粉の平均粒径と硬さ値の指標としての反発係数との関係を 図-13 に示す。表面破壊の発生機構、すなわち摩耗粉の発生機構がエネルギーバランス理論で説明できるものならば、 G_c は摩耗粉の平均粒径と硬さとの積に比例することになるが 図-13 にみられるようにこれらの関係はほぼ直線関係を有していることがわかる。したがって、今回もタイヤチェーンによるモルタルおよびコンクリートの表面破壊の発生がエネルギーバランス理論に従うことが確認できたわけであり、表面破壊がひびわれの進展の結果であることになる。ひびわれが進展しやすい材料は摩耗されやすいことになるが、図-14 には材料のひびわれ進展性状を巨視的に表わし、ひびわれ発生の限界荷重に比例する G_c とタイヤチェーンによる摩耗深さとの関係を示している。 G_c と摩耗深さに関して常に直線比例関係があるとはいえないが、 G_c の大きい配合は摩耗抵抗が大きいといえるようである。摩耗抵抗の大き

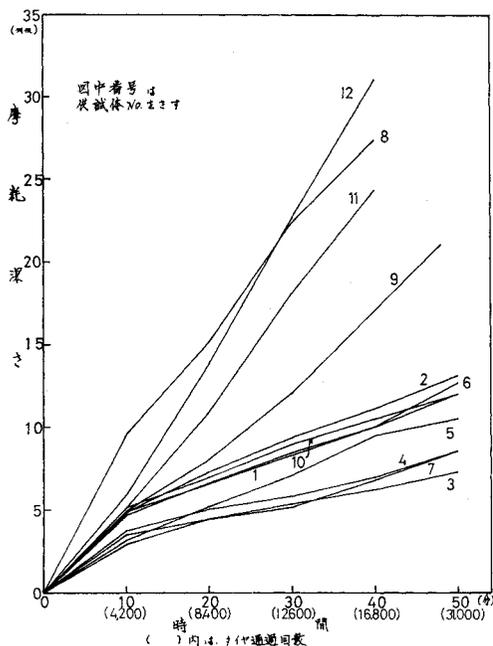


図-12 タイヤチェーンによる摩耗深さ-時間の関係

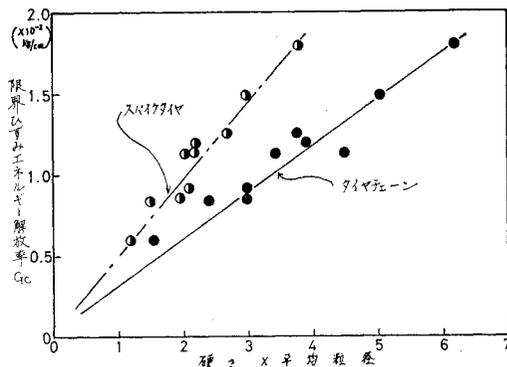


図-13 G_c と (硬さ) × (摩耗粉の平均粒径) との関係

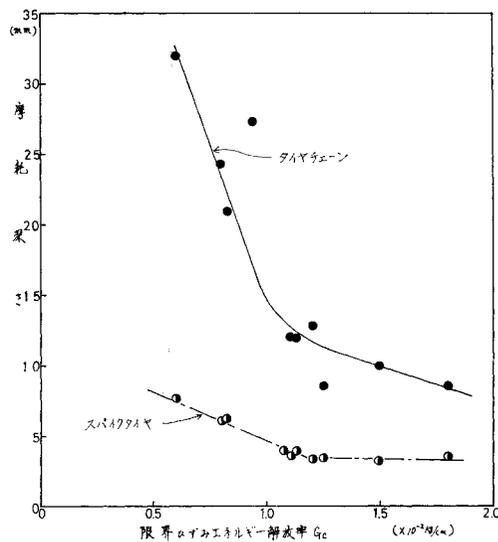


図-14 タイヤチェーン、あるいはスパイクタイヤによる摩耗深さと G_c との関係

い配合はギャップグレード骨材を用いたコンクリート、ギャップグレード骨材にペーストを加えた配合、あるいは高性能減水剤を用いたコンクリートである。これらの結果については、本実験方法とは異なるが摩耗抵抗の大きい配合ということで同様の結果が ACI 報告¹¹⁾に示されている。また、使用骨材が堅硬であればコンクリートの方がモルタルより摩耗されにくく、この傾向は中村ら¹⁰⁾の報告にも述べられている。これらの耐摩耗抵抗の大きいコンクリートは表-5にみられるように G_c 値も大きいことがわかるが、図-14に示されているように実験だけについていえば G_c 値が 1.1 より増加しても摩耗抵抗はあまり増加しなくなる。

このことは、限界ひずみエネルギー解放率 G_c ならびに摩耗抵抗は、マトリックスとしてのペーストの性質とインクルージョンとしての骨材の性質および量、あるいはマトリックスとインクルージョンの界面の性質等に関係してくるものと考えられるが、本実験の場合のように G_c 値が 1.1 以下のものについては、ペーストの性質を一定とした場合にインクルージョンの性質および量によって G_c ならびに摩耗特性は影響されると考えられ、インクルージョンが堅硬であるほど、また、量がある程度まで多いほど、 G_c も摩耗抵抗も増大し、両者の関係は比例することが示されたわけである。しかし、 G_c 値が 1.1 以上のものについては、ギャップグレードコンクリートと連続粒度コンクリート (No. 1 供試体) とを比べて、前者は後者より骨材が密でかみ合せが大きいと考えられると、 G_c は大きくなると考えるが、摩耗抵抗は G_c ほど骨材のかみ合せ程度に影響されなく、また、骨材量は両コンクリートとでほとんど差がないので、摩耗抵抗は両コンクリート間で差が生じなかつたとみている。また、高性能減水剤を用いたコンクリートは No. 1 供試体と比較して、前者はペーストの強度は大きいと考えられ、その結果、 G_c 値は大きくなっているが、両コンクリートともにペースト量よりも骨材量が多いため、この場合摩耗抵抗は骨材の量によって強く影響されるために、両者のペーストの強度の差は摩耗抵抗にはさほど影響しなかつたとみている。すなわち、 G_c は摩耗抵抗よりも、使用材料の性質、配合割合の変化に対してより敏感に対応する性質を有していると考えられる。

摩耗試験時に供試体面に散水すると、水を含んだ供試体の表面エネルギーは減少することになり¹²⁾、摩耗抵抗は小さくなることが予想されるが、表-5にみられるように、散水した供試体 (No. 2) は気乾状態の供試体 (No. 1) と比べて摩耗抵抗は小さくなっている。外力としての衝撃力あるいは押込み力の違いは当然摩耗量に影響してくると考えられる。表-5に示す No. 3 の供試体はタイヤにかける荷重を No. 1 の供試体の半分にして試

験したものである。タイヤにかける荷重が大きいと摩耗深さも大きくなることがほぼ明らかにされたことになるが、供試体が同一でも、外力の大きさあるいは種類が異なれば摩耗性状が異なってくることになり、モルタル、コンクリートの摩耗特性は衝撃体の種類、衝撃力の大きさ等に対応しながら材料固有の性質に結びついていると考えられる。

5. スパイクタイヤによるモルタル、コンクリートの摩耗特性

(1) 実験計画

スパイクタイヤによるモルタル、コンクリートの摩耗特性を究明する場合には図-10に示す試験機にスパイクタイヤ (規格 5.20-10, 空気圧 1.6 kg/cm²) を取り付けて実験した。スパイクタイヤは直径 2.5 mm, 突起高さ 3 mm のスパイクがタイヤの円周に 4 列で計 66 個打込まれている。試験に供した配合は 4. で述べたタイヤチェーンによる場合と同じで表-5に示されている。スパイクタイヤによる摩耗試験には供試体打込み底部を使用した。タイヤチェーンによる摩耗試験には供試体の仕上げ面を使用するので、一体の供試体の仕上げ面と底面をタイヤチェーンとスパイクタイヤによる摩耗試験に使用したわけである。スパイクタイヤは一試験ごとに 2 本とも新しいものを使用した。

(2) 実験結果の考察

スパイクタイヤによるモルタル、コンクリートの摩耗試験結果については表-5に示している。スパイクタイヤによる摩耗試験では供試体面上をスパイクが通過するところが溝型に急速に摩耗していき、スパイクがタイヤに 4 列打ち込んであるため、供試体面に 4 本の溝ができるようになる。したがって、摩耗深さは 4 本の溝につい

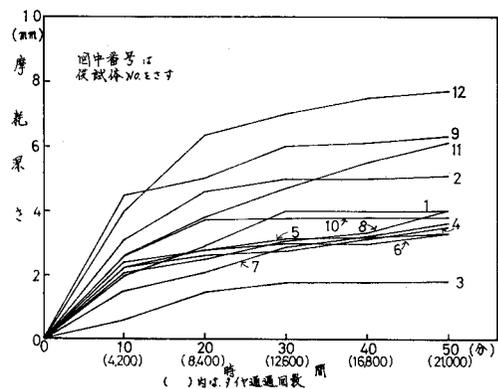


図-15 スパイクタイヤによる摩耗深さ-時間の関係

それぞれ4位置で測定した結果を平均して算出した。スパイクタイヤによる摩耗試験に関して摩耗深さと試験時間との関係を図一15に示す。スパイクタイヤによる摩耗現象の特徴は試験時間がある程度経過すると、摩耗深さはほとんど増加しなくなることがある。ほとんどの供試体について試験開始後10分ないし20分経過すると摩耗の進行は緩慢になってくる。この現象は他の報告にもみられる¹³⁾。これはスパイクの足の長さが限られており、摩耗された溝が深くなると、スパイクが溝の底までとどきにくくなり、スパイクによる衝撃力が結果的に小さくなって摩耗が進まなくなるためと考えられる。

なお、スパイクタイヤによる摩耗現象は一見すると摩耗量が一定量以上には進まなくなる定常摩耗の様相を呈しているが、この様相は一般に酸化摩耗の形態をとるような金属材料等でみられる定常摩耗特性を現わしているのではなく、むしろ上述したようにスパイクの足の長さや摩耗した溝の深さとの関係から生じた摩耗特性であり、スパイクタイヤによる摩耗現象も処女面摩耗に属するものであろう。すなわち、溝の部分が摩耗されてくると、また、スパイクの足は溝の底にとどくようになり、摩耗は時間とともに進行していくと考えられる。

図一13には限界ひずみエネルギー解放率 G_c と摩耗粉の平均粒径と硬さの積との関係を示している。両者の間には直線関係が存在しており、スパイクタイヤによるモルタル、コンクリートの摩耗粉の発生機構もエネルギーバランス理論で説明しうることを示している。図一14にはスパイクタイヤによる摩耗深さと G_c との関係を示しているが、 G_c が大きいと摩耗抵抗も大きくなること示されており、本実験についていえば G_c 値が1.1までであると摩耗抵抗と G_c との間には比例関係が存在しているが、1.1以上になると、摩耗抵抗は G_c との間に比例関係を示さなくなる。これらの理由は4.(2)で述べたものと同じであらう。

スパイクタイヤによる場合も、タイヤチェーンによる場合と同様に、ギャップグレードコンクリート、ギャップグレード骨材にペーストを加えた配合あるいは高性能減水剤を用いた高強度コンクリートの摩耗抵抗は大きいことが明らかとなった。また、供試体面に散水して試験した場合は気乾状態で試験した場合よりも摩耗量が増すことが表一5の供試体 No. 1 と No. 2 とを比べてみるとわかる。さらにはタイヤにかかる荷重が大きければ摩耗量も大きくなることが表一5に示されており、タイヤチェーンによる場合と同様の結果を得ている。

6. 結 言

本実験結果を要約すると次のようである。

ペースト、モルタルおよびコンクリートの表面ひびわれ発生機構に関しては、

(1) 鋼球を押し込むあるいは落下させたとき、材料表面に生じるコーンひびわれの発生機構については、実験方法を確立することが先決と考えられる。しかしながら、くぼみの発生をコーンひびわれにつながるものと想定すれば、表面のひびわれ進展機構はエネルギーバランス理論で説明できる性質を有していると想定される。

(2) スパイクタイヤおよびタイヤチェーンの衝撃等によってひびわれが発生した結果としての摩耗粉の発生機構は材料の表面エネルギーに関係したエネルギーバランス理論に従うものであることが明らかとなった。また、摩耗粉の発生機構は各種の衝撃体の特性に対応しながら、供試体材料の固有の特質に結びつくものであると理解できる。

研磨材、スパイクタイヤおよびタイヤチェーンによるモルタルおよびコンクリートの衝撃摩耗特性と、耐摩耗性の指標として、限界ひずみエネルギー解放率 G_c を用いることの有用性については、

(1) 研磨材によるモルタル、コンクリートの摩耗特性に関して、摩耗抵抗は G_c の増大とともに増大する性状を有してはいるものの G_c を耐摩耗性の指標とするには若干の無理があると考えられる。すなわち、研磨材による摩耗は材料のごく表面部の性質に結びついたものであり、 G_c は供試体の平均的な材料特性を示しているため両者の関係は非常にばらつきがみられた。

(2) スパイクタイヤおよびタイヤチェーンによるモルタルおよびコンクリートの摩耗特性について、本実験の場合、ペーストの性質が一定で、骨材の性質が変化したり、あるいは量がある範囲内で変化するときには、 G_c は耐摩耗性の指標として有用であり、 G_c の増大とともに摩耗抵抗も増大する傾向を示した。しかしながら、 G_c は摩耗抵抗よりも使用材料の性質、量あるいは配合割合の変化により敏感に対応する性質を有していると考えられ、その結果、 G_c と耐摩耗性との比例関係がくずれる状況もあることがわかった。これらの点に関しては今後さらに検討を要すると考えている。

(3) タイヤチェーンあるいはスパイクタイヤによるモルタルおよびコンクリートの摩耗はそれぞれ処女面摩耗に匹敵する。また、タイヤにかかる荷重の大きさも摩耗量に影響し、タイヤにかかる荷重が大きくなると摩耗量も多くなることが認められた。

謝 辞：本研究を行うにあたり、終始ご指導下さいました岐阜大学工学部 小柳教授ならびに実験にご協力下さいました和歌山高専土木工学科コンクリート工学卒 研究生に深謝の意を表します。また、本研究の一部に昭和51年度吉田研究奨励金が授与されたことを付記し、深

謝します。

参 考 文 献

- 1) 戸川一夫・小柳 治：タイヤチェーンによるモルタル，コンクリートの摩耗特性に関する 基礎的研究，土木学会論文報告集，第 248 号，pp. 121~127，昭和 51 年。
- 2) 戸川一夫・中本純次：タイヤチェーンによるモルタル，コンクリートの摩耗特性，セメント技術年報 XXIX，pp. 292~296，昭和 50 年。
- 3) Rabinowicz, E. : Friction and Wear of Materials, John Wiley and Sons, INC, 1965.
- 4) Kaplan, M.F. : Crack Propagation and the Fracture of Concrete, Jour of ACI, Vol. 58, No. 5, pp. 591~609, 1961.
- 5) F.B. Langitan, B.R. Lawn : Hertzian Fracture Experiments on Abraded Glass Surfaces as Definitive Evidence for an Energy Balance Explanation of Auerbach's Law, Jour of Applied Physics, Vol. 40, No. 10, pp. 4009~4017, 1969.
- 6) 小柳 治・境 賢治：モルタルおよびコンクリートのクラック伝播に関する 2, 3 の考察，セメント技術年報，XXV, pp. 264~269, 昭和 46 年。
- 7) 戸川一夫・佐藤 哲・荒木謙一：モルタルならびにコンクリートのタフネスに影響する要因，セメント技術年報，XXVII, pp. 202~206, 昭和 48 年。
- 8) 橋本健次：粉粒体による摩耗，産業技術センター，昭和 49 年。
- 9) BS 812 規格：Methods for sampling and testing of mineral aggregate, sands and fillers, British Standards Institution, London, pp. 10~16, 1975.
- 10) 中村修吾・三和久勝：コンクリート舗装面のすりへりに関する試験，道路とコンクリート，No. 28, 1974.
- 11) ACI 報告：Floor and Slab Construction の付録 "Factors affecting wear and concrete Quality", Jour of ACI, Vol. 63, No. 1, 1966.
- 12) 堀 素夫：セメントおよびコンクリートの破壊現象に関する確率論的研究，東京大学博士論文，昭和 36 年。
- 13) 三和久勝・飯岡 豊・豊福俊泰：コンクリート舗装のすりへり抵抗性に関する室内試験，土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp. 64~65, 昭和 52 年。
(1977.12.22・受付)