

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

FUNDAMENTAL STUDY ON WEAR CHARACTERISTIC OF MORTAR AND CONCRETE BY TIRE CHAIN

戸川 一夫*・小柳 洽**

By Kazuo TOGAWA and Wataru KOYANAGI

1. ま え が き

近年、わが国ではコンクリート舗装はアスファルト舗装に比べてきわめて少なかったが、再び交通量の激増ならびに重車両交通の頻出に対して耐久性あるいは信頼性の高いコンクリート舗装が再評価される機運にある¹⁾。コンクリート舗装の品質向上などに関する研究はいろいろな角度からなされているが、今なお究明改善すべき点が多くみられる。特に交通荷重の苛酷な繰り返しに対してのコンクリート表面の摩耗とその修繕の問題が舗装版自体の強度増強よりも、さらに重大な問題になる場合も考えられる。特に寒冷地などでのタイヤチェーンによるコンクリート舗装の摩耗損傷は解明すべき重要な課題のひとつとなっている。

現時点ではコンクリートの摩耗特性に関する研究は少なく、数人の研究者^{2)~5)}によりコンクリートの摩耗特性を支配する配合要因として、細粗骨材のすりへり特性、粒度、粒径、形状および使用量、水セメント比あるいは粗骨材とモルタルとの界面性状などが報告されている。

本研究はタイヤチェーンを用いてモルタル、コンクリートの摩耗特性を実験的に求めるとともに、タイヤチェーンによる摩耗作用を衝撃ならびにひっかき作用と想定して、摩耗粉の生成を繰り返し疲労によるひびわれ進展の結果と結びつけて機構的な解明を試み、さらにモルタル、コンクリートの耐摩耗性の向上をひびわれ進展性状すなわち破壊過程におけるフラクチャタフネス（破壊靱性）の面から考察しようとするものである。

2. モルタル、コンクリートの摩耗機構に関する仮説

摩耗現象を分類する場合、J.T. Burwell⁶⁾は凝着摩耗、研削摩耗、腐蝕摩耗および疲労摩耗の4つのいずれかで説明できるとしている。

金属材料の凝着摩耗機構に関して、E. Rabinowicz⁷⁾は摩耗をうけた凝着部の破壊の発生を Griffith の破壊条件と同じように凝着部に蓄積されている弾性エネルギーの解放による表面の生成として考えている。これによると、図-1のように接触点1点につき1個の摩耗粉の発生を考えて、球（半球）に貯えられている弾性エネルギー E_e は初期みかけ応力 σ が材料の降伏応力 σ_y であると仮定すれば、

$$E_e = \left(\frac{\nu^2 \sigma_y^2}{2E} \right) \left(\frac{\pi a^3}{12} \right)$$

ここに、

ν : ポアソン比

σ_y : みかけの降伏応力あるいは最大応力

E : 弾性係数

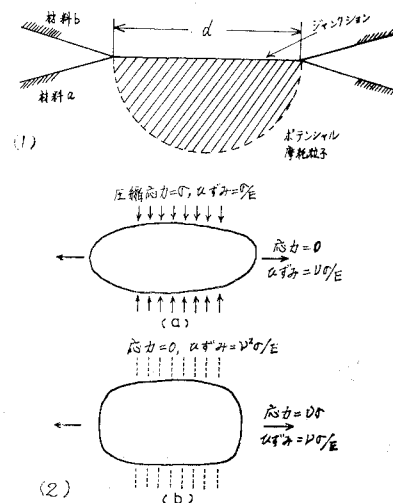


図-1 (1) 摩耗粉のモデル、(2) 摩耗粉の応力とひずみとの仮定、(a) 摩耗粉形成時、(b) 応力解放後

* 正会員 工修 和歌山工業高等専門学校助教授 土木工学科

** 正会員 工修 京都大学助教授 工学部土木工学科

a : 摩耗粉の粒径

界面に作用する付着エネルギー E_a は

$$E_a = W_{ab} \left(\frac{\pi a^2}{4} \right)$$

ここに,

W_{ab} : 引合う材料間の結合力 (表面エネルギー)

一つの摩耗粉の発生は $E_e \geq E_a$ のときに生成されるとすると、摩耗粉の平均粒径は

$$a \geq \frac{6EW_{ab}}{v^2\sigma_y^2}$$

さらに上式を単純化するために、 v^2 はほとんどの材料に対して一定とし (0.1 としている), E/σ_y はほとんどの材料について大略一定と考え、 σ_y は硬さに比例するとすれば、摩耗粉の大きさは表面エネルギーの硬さに対する比に比例することとなる。

この理論はあくまでも金属材料の凝着摩耗機構を解明し、摩耗を定量的に把握するために展開されたものである。しかしながら、現在、金属材料の凝着摩耗機構に関してこの理論の適用はかならずしも抵抗なく受け入れられているわけではない。それに対する反論として、一般に金属材料はある程度の塑性変形を生ずるため Griffith の仮説が適用できるところの脆性材料ではないこと、また、摩耗粉の発生と成長過程に関して、金属結合は脆性材料の結合性状と違って、その結合力が強いために、摩耗粉が発生しかけてもただちに1個の摩耗粉として生成されることが少なく、瞬間的に移着現象⁹⁾を生じて、一度発生した摩耗粉が相手方母材表面に移着していくつか集まり、その集合体がある大きさに達してはじめて母材から欠落した摩耗粉となるということ、すなわち、欠落した摩耗粉の径は Rabinowicz の理論によって算定される値とは異なる場合があること、さらには金属材料は酸化摩耗の形態を取りやすいため、摩耗粉の生成がその場の雰囲気 (主として酸素の有無) や摩耗試験速度 (主として酸素吸着作用の可否) に依存⁹⁾して、摩耗現象に初期摩耗と定常摩耗とが現われることなどがあげられている。

しかしながら、上述の論議はモルタル、コンクリートなどのように粒子結合力の弱い、摩耗粉が移着生長過程をとらないがたい脆性な物質、くわえて酸化摩耗の形態をとらないと考えられる物質を取り扱う場合にはあまり考慮しなくてもよいと思われる。ここで、タイヤチェーンによるモルタル、コンクリートなどの摩耗特性が衝撃あるいはひっかき作用による繰り返し疲労の結果であると考えられるならば、Rabinowicz の理論は定量的に金属材料などの摩耗特性を説明しようとする場合よりも、むしろ脆性材料であるコンクリートなどに対して衝撃による表面部の微細なひびわれ進展とその結果から摩耗粉が発生するという繰り返し疲労摩耗の形態を説明し、発生し

た摩耗粉の粒径分布に基づいて脆性材料の摩耗性状を説明する場合に対してより有用性が認められると考えることができる。

ところで、上記の観点から Rabinowicz の理論をモルタル、コンクリートなどの脆性材料の摩耗特性の解析に適用しようとする場合、材料の定数である表面エネルギー W_{ab} の真値を明確にしうることがあるがコンクリートのような多相材料に対してはその真値を測定する方法は確立されていない。したがって、本研究では表面エネルギーに関してはこれと巨視的かつ間接的に結びつきを持ち、また破壊過程におけるフラクチャフネスを量的に表わす有効なパラメーターであると考えられている^{10),11)}限界ひずみエネルギー解放率 (フラクチャフネス) G_c ¹²⁾を採用し、さらには表面エネルギーとは比例しないが、ひびわれ先端領域の応力状態と関連づけられる応力拡大係数 K_c ¹³⁾も付加的に採用してみた。なお、 K_c 値の算定については数々の報告がなされているが¹⁴⁾、いまだ十分には確立されていないと考えられ、本研究では K_c の算定は 3.(3) で示している式を用いた。

3. 実験概要

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材は川砂 (日高川産、比重 2.49) および人工軽量砂 (大阪セメント社製、比重 1.92) を用いた。粗骨材は石灰岩碎石 (日本セメント高知県吉良ヶ峰嶺山産、比重 2.69)、安山岩碎石 (香川県仲多度郡猫山産、比重 2.57)、硬質砂岩碎石 (和歌山県日高郡由良産、比重 2.60)、川砂利 (和歌山県有田川産、比重 2.59) および人工軽量粗骨材 (大阪セメント社製、比重 1.40) を用いた。細粗骨材はあらかじめふるい分けしておいて所定の粒度に調整した。用いた細粗骨材の粒度曲線を図-2 に示す。

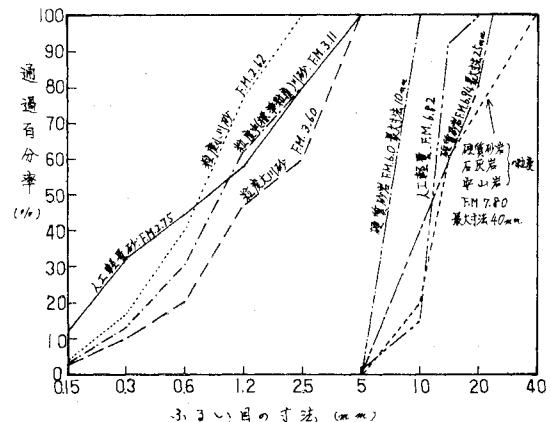
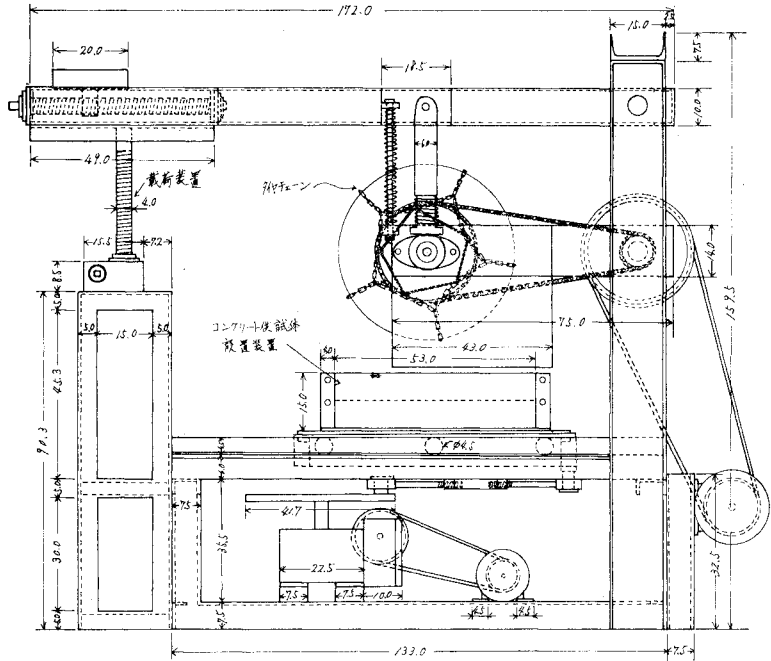


図-2 細・粗骨材の粒度分布曲線

(2) 摩耗試験方法

摩耗試験用供試体は 15×15×53 cm の角柱供試体であり、同一配合供試体は 2 本準備し、摩耗試験には供試体打込み底面部を試験に供した。摩耗試験に供試体打込み底面部を供試させたのは供試体表面仕上げ部を用いた場合に、表面仕上げ性状の差異が摩耗特性に影響することもあると考えられるので、その影響が現れないように考慮した。供試体は主として試験日まで水中養生 (20°C±2 deg.) し、試験は材令 28 日で行った。

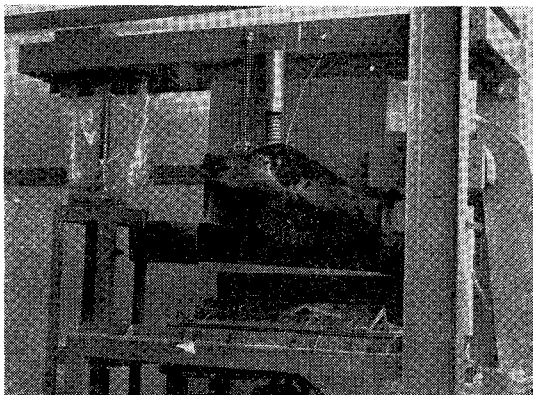
摩耗試験機はタイヤチェーンをとりつけた回転するタイヤ部と摩耗試験供試体を水平往復運動させる装置を組み合わせたものである (写真—1 および図—3 参照)。固定軸にとりつけられた回転タイヤ部は走行時速 30 km/hr で回転し、供試体の水平直線移動速度は片道距離 35 cm (供試体長さ方向中間部 35 cm, 摩耗される区間もこの間である) を 1 分間で往復するように設計されている。衝撃を加えるタイヤチェーンは円周を 5 等分した各所に 1 本ずつの横わらしチェーンを有し、そのチェーンがタイヤ回転時に供試体に衝撃を加えるようになっている。1 本のチェーン (JIS 規格, 500×10, 5×6) による衝撃仕事の概算は供試体垂直方向分力で 0.183 kg·m, 水平方向分力で 0.598 kg·m となる。衝撃回数は供試体面上において 0.41 mm ずつはなれた点を 0.036 秒に 1 回の割合となる。なお本実験ではタイヤチェーンと供試体表面とのすき間が静止した状態のとき 8 mm になるように保持し、回転時にタイヤチェーンがタイヤと供試体との間にはさまれて生ずるこすり作用を少なくし



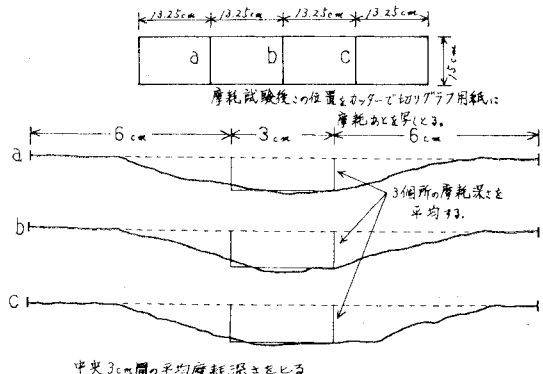
図—3 摩耗試験機の機構図

た。なお、このすき間は摩耗試験中 10 分間ごとに調整され、タイヤチェーンによって供試体に与えられる衝撃仕事量が試験中ほぼ一定になるようつとめた。

試験時の環境条件は主として室内気中乾燥状態 (試験中室内温度 28°C±3 deg.) とした。なお、摩耗特性は環境温度によって変化すると考えられるので、試験は温度変化の幅が小さくなるよう短期間を実施した。またタイヤチェーンが供試体表面を衝撃することによって、供試体表面の温度が変化すると考えられるが、この変化は全実験を通じてほぼ同一条件であるとみなした。試験は一つの供試体につき 60 分間行い、10 分間ごとに供試体の重量減少量を測定し、試験終了後供試体の摩耗深さを図—4 に示す方法で 1 個の供試体につき図に示す 3 箇所での摩耗深さを中央部 3 cm 間について測定し、平均値を



写真—1 摩耗試験機



図—4 摩耗深さの測定方法

求めて摩耗深さとした。また、タイヤチェーンは摩耗試験供試体1個ごとに新しいものを使用した。摩耗粉の採集方法は摩耗試験機をビニールシートで密封し、床上にもビニールシートを敷きつめて堆積した摩耗粉を集めた。摩耗粉の粒度分析は網ふるい方法によって行い、摩耗粉の平均粒径は重量割合で50%通過するときの粒径と定めた。

(3) G_c および K_c の算定方法

G_c さらには K_c の算定には引張側中央部に開角 30° 、深さ 1.5 cm の切欠きをもつ $10 \times 10 \times 40\text{ cm}$ の供試体を同一配合につき4本用意し、試験は切欠き部をスパン(30 cm)の引張側中央部に位置させて、3等分点載荷曲げ試験方法によった。圧縮強度、動弾性係数ならびにポアソン比は $\phi 10 \times 20\text{ cm}$ の円柱供試体を同一配合につき3本用意して求めた。 G_c ⁽¹²⁾ ならびに K_c ⁽¹³⁾ は次の式によって求めた。

$$G_c = \frac{(1-\nu^2)\sigma_n^2 \cdot h}{E} \cdot f(c/d) \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$K_c = \left(\frac{EG_c}{\pi(1-\nu^2)} \right)^{1/2} \quad (\text{kg/cm}^{3/2})$$

ここに、

$$f(c/d) = \frac{\pi c}{d} \left(1 - \frac{c}{d} \right)^3$$

ν : ポアソン比

E : 弾性係数 (kg/cm^2)

$\sigma_n = \frac{6M}{bh^2}$ 切欠き底部のみかけの応力 (kg/cm^2)

M : 単純ばり支間中央部(切欠き部)の曲げモーメント ($\text{kg}\cdot\text{cm}$)

b : 供試体の幅 (cm)

c : 切欠きの深さ (cm)

d : 供試体の高さ (cm)

$h = d - c$ (cm)

(4) 硬さ試験方法

コンクリートの硬さに関する明確な定義はいまだ確立されていないと考えられるが、本実験ではシュミットハンマーテストによる反発係数を硬さの指標とした。

(5) モルタル、コンクリートの配合計画

モルタルおよびコンクリートの配合は限界ひずみエネルギー解放率 G_c あるいは応力拡大係数 K_c に影響すると考えられる配合要因^{(10),(11)}を取り上げて基礎的な実験を計画した。したがって、実際に用いられている舗装用コンクリートの配合とは多少異なっている。モルタルの配合は水セメント比を40, 50 および 60% とした場合、細骨材の粗粒率を2.61, 3.11 および 3.60 と変化

させた場合、セメント砂比を1:1, 1:2 および 1:3 とした場合、細骨材に人工軽量砂を用いた場合を計画した。コンクリートの配合は水セメント比, 砂セメント比を一定にして、粗骨材量を容積割合で10, 30 および 50% とした場合、粗骨材の最大寸法を10, 25 および 40 mm とした場合、使用粗骨材種類を変化させた場合を考えた。

4. 実験結果とその考察

実験結果を表-1 に示す。

(1) モルタル、コンクリートの摩耗形態

材料の摩耗特性を究明していく過程で摩耗現象の時間的な遷移を明らかにしていくことはきわめて大切なことである。

図-5 にモルタルならびにコンクリートの摩耗損量と時間との関係についての代表的な結果の一例を示す。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は摩耗面の表面状態が一定している処女面摩耗に匹敵し、摩耗割合は時間的に一定で摩耗量は摩耗試験時間(衝撃回数)に比例して増加する傾向を示しており、定常摩耗(摩耗割合が時間とともに減少して一定の摩耗量に落ち着く状態)は認められなかった。この結果はタイヤチェーンによるモルタル、コンクリートの摩耗は試験中発生した摩耗粉の飛散がはげしいため、発生した摩耗粉の蓄積による表面の保護効果がなされないこと、また一たん取られた摩耗粉がまたもとの面に再転移する現象がないこと、さらには金属材料などのように速度依存性のある酸化摩耗の形態を取らないで、すなわち摩耗現象が摩耗試験速度にそれほど左右されないといったことを立証していると考えられ、2. で述べた仮説が成り立つと考えられる。

なお、この結果の傾向はモルタルには終始強く現われるが、コンクリートについては粗骨材の存在が摩耗特性に若干影響する。たとえば摩耗抵抗性の大きい粗骨材を用いたコンクリートでは摩耗試験開始後数十分経過する

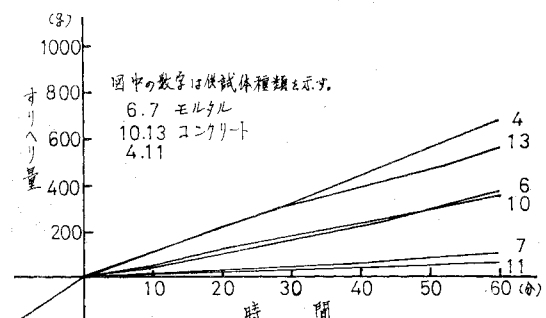


図-5 摩耗損量と試験時間との関係の一例

表一 各種配合のモルタルおよびコンクリートの強度特性と摩耗深さ

(実験条件：衝撃力、鉛直方向 0.183 kg·m, 水平方向 0.598 kg·m)

供試体種類	水セメント比 (%)	セメント砂比	砂粒度	粗骨材量 (容積%)	曲げ強度 (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	動弾性係数 (×10 ⁸) (kg/cm ²)	G _c (×10 ⁻²) (kg/cm ²)	K _c (kg/cm ^{2/3})	反発係数 (シユミット)	平均粒径 (mm)	すりへり深さ (mm)	備考	
1	モルタル	50	1:2	中	—	44	443	3.5	1.29	39.08	24	0.14	6.0	—
2	モルタル	40	1:2	中	—	56	472	3.8	1.79	49.28	26	0.24	4.9	—
3	モルタル	60	1:2	中	—	33	285	3.0	0.85	29.37	16	0.14	8.2	—
4	モルタル	50	1:2	人工軽 集砂	—	40	299	2.2	1.29	31.45	17	0.12	10.4	—
5	モルタル	50	1:1	中	—	42	372	2.8	1.34	36.43	20	0.13	7.4	—
6	モルタル	50	1:3	中	—	40	426	3.3	1.28	37.51	22	0.14	5.9	—
7	モルタル	50	1:2	大	—	46	423	3.7	1.33	40.45	22	0.14	1.0	—
8	モルタル	50	1:2	小	—	44	419	3.4	1.22	37.19	22	0.11	6.6	—
9	コンクリート	50	1:2	中	0.1	43	421	3.9	1.21	40.45	22	0.14	7.6	硬質砂岩
10	コンクリート	50	1:2	中	0.3	44	459	4.4	1.10	40.45	23	0.20	4.6	硬質砂岩
11	コンクリート	50	1:2	中	0.5	45	467	5.1	1.19	43.74	23	0.16	1.2	硬質砂岩
12	コンクリート	50	1:2	中	0.3	46	439	4.6	1.36	44.13	23	0.16	3.4	川砂利
13	コンクリート	50	1:2	中	0.3	43	435	5.3	0.94	43.03	22	0.13	7.8	石灰岩
14	コンクリート	50	1:2	中	0.3	51	533	4.6	1.41	46.35	28	0.13	5.5	安山岩
15	コンクリート	50	1:2	中	0.3	40	401	3.1	1.09	33.47	20	0.09	8.1	人工軽量

砂粒度、大、中、小は図-2 参照、摩耗粉の平均粒径は重量割合で 50% 通過する時の粒径

(実験条件：衝撃力、鉛直方向 0.124 kg·m, 水平方向 0.450 kg·m)

16	コンクリート	50	1:2	中	0.3	51	356	3.6	2.13	44.80	26	0.21	2.7	硬質砂岩、乾燥
17	コンクリート	50	1:2	中	0.3	50	309	2.9	2.11	44.40	25	0.23	5.3	硬質砂岩、エチレングリコール
18	コンクリート	50	1:2	中	0.3	45	272	2.8	1.61	39.75	22	0.22	6.1	硬質砂岩、クロシン
19	コンクリート	50	1:2	中	0.3	46	344	2.9	1.42	40.62	18	0.30	6.0	硬質砂岩、水
20	コンクリート	50	1:2	中	0.3	48	302	2.6	2.12	42.70	25	0.22	4.5	硬質砂岩、最大寸法 25 mm
21	コンクリート	50	1:2	中	0.3	49	292	2.6	2.23	43.70	23	0.22	5.6	硬質砂岩、最大寸法 10 mm

表面張力：クロシン 24.9、エチレングリコール 46.7、水 70.4 (dyne/cm) 25°C

供試体 No. 16, 20, 21 は水中養生 24 日間以後 2 日間 110°C 絶乾 試験日まで防湿袋に入れる。

供試体 No. 17, 18, 19 はそれぞれの液体に浸漬して養生。

とコンクリートの摩耗割合が粗骨材の表出によってややにぶる傾向がみられる。しかしその傾向は定常摩耗を意味するものではないと考えられる。

(2) 摩耗粉の性状からみたモルタル、コンクリートの摩耗特性

2. で述べた Rabinowicz の摩耗粉の平均粒径に関する理論によれば、表面エネルギーはパラメーター (硬さ×摩耗粉の平均粒径) に比例するというに基づいて、本論では表面エネルギーをこれと巨視的に結びつく G_c 値で代用して、材料定数としての G_c がモルタル、コンクリートの摩耗特性を有効に表わす指標となるかどうかを検討した。

まず使用する粗骨材自身のすりへり特性と摩耗粉径との関係について検討を加えた。

ロスアンゼルスすりへり試験によって用いた各種粗骨材のすりへり減量とすりへり粉の平均粒径との関係を図-6 に示す。各種粗骨材のすりへり減量特性はすりへり粉の平均粒径から推察できるものと考えられ、すりへり減量の大きい骨材ほどすりへり粉の平均粒径はしだいに小さくなる傾向がある。また粗骨材自身のすりへり特性 (ロスアンゼルス試験) について、表面エネルギーの見地からみた破壊特性でもって説明できるかを調べた結果が図-7 に示されている。これらの粗骨材の硬さ値はそ

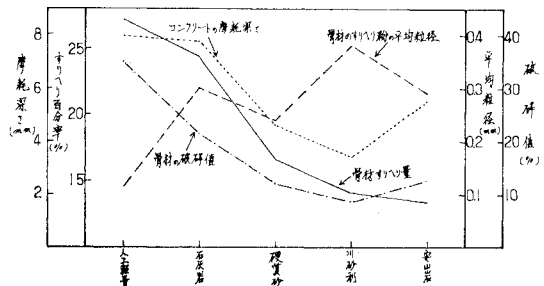


図-6 粗骨材のすりへり量破砕値およびすりへり粉の平均粒径とコンクリートの摩耗深さとの関係

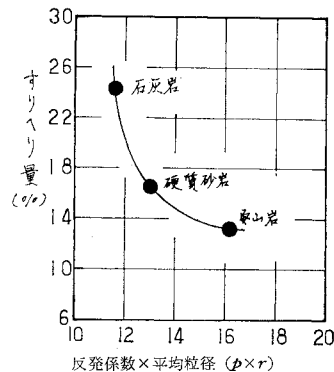


図-7 粗骨材のすりへり量とパラメーター (反発係数×摩耗粉平均粒径) との関係

それぞれの母岩について測定している。この結果より粗骨材自身のすりへり減量特性とパラメーター（硬さ×すりへり粉の平均粒径）の間には相関関係がうかがわれる。なお、人工軽量骨材および川砂利については反発係数が測定しにくいためにデータが示されていない。

次に各種のモルタル、コンクリートの摩耗特性がパラメーター（硬さ×摩耗粉の平均粒径）で説明できるかを図-8で考察した。同図から実験上のばらつきはあるものの両者の間には相関関係があることがほぼ判明した。また図-9から G_c はパラメーター（硬さ×摩耗粉の平均粒径）とほぼ直線関係にあることが明らかとなった。なお K_c もパラメーター（硬さ×摩耗粉の平均粒径）と直線関係にあることがわかった（図-10参照）。

ここで、ひびわれの進展性状の差異がモルタル、コンクリートの摩耗特性の差異に対応するものであるかどうかを確かめるために同配合のコンクリートについて摩耗試験前の養生条件を変化させた場合の実験を試みた。実験は摩耗試験前の4日前の養生条件を4種類つくり、すなわち、材令24日に供試体を水中から取り出して2日

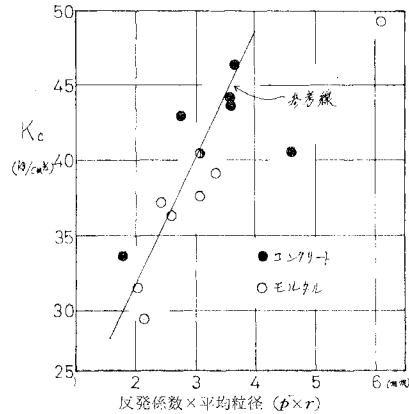


図-10 K_c とパラメーター（反発係数×摩耗粉平均粒径）との関係

間は 110°C で絶乾状態にし、後の2日間をそれぞれ、ゴム防湿袋に入れて湿気をしゃ断したもの、エチレングリコール液に浸せきしたもの、ケロシン液に浸せきしたもの、水に浸せきしたものとした。試験時にもそれぞれの液を摩耗供試体面上に少量ずつ流している。これらの液体はそれぞれ液体の表面張力が異なっているものであり、大きな表面張力をもつ液体は小さな表面張力の液体よりも、その分子が物理吸着することによって固体の表面エネルギーを低下させて、微小割れの伝播をより容易にすると結論づけられている^{15), 16)}。実験結果は図-11に示すように表面張力のより大きな液体に浸せきしたコンクリートは摩耗損量がより大きくなる傾向があり、ひびわれの伝播がより容易になされた結果ではないかと推測される。

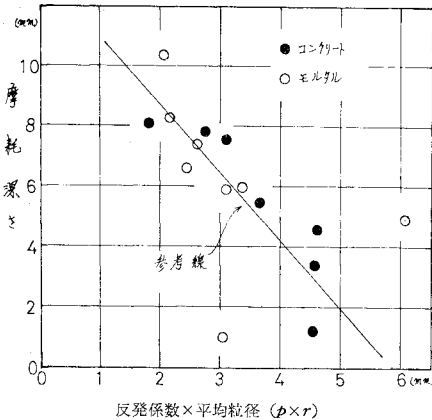


図-8 モルタル・コンクリートの摩耗深さとパラメーター（反発係数×摩耗粉平均粒径）との関係

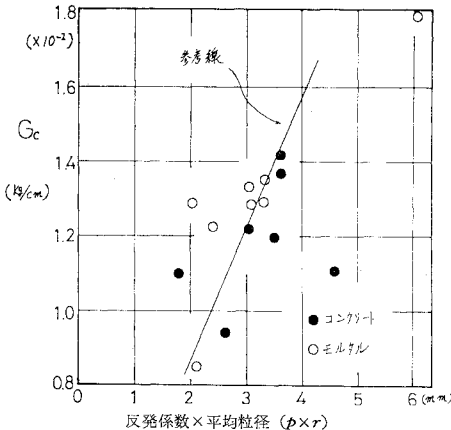


図-9 G_c とパラメーター（反発係数×摩耗粉平均粒径）との関係

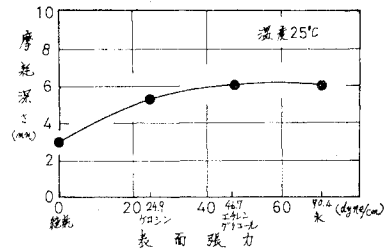


図-11 摩耗深さと液体の表面張力との関係

したがって、上記結果を考え合わせると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は 2. の仮説を裏付ける結果であると考えられ、コンクリートなどの摩耗特性に対して、材料のひびわれ進展性状すなわち破壊過程におけるフラクチャタフネスに基づいた繰り返し疲労摩耗の立場からの研究は有効な方法であろう。

5. む す び

本研究は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関して摩耗粉の発生が繰り返し疲労によるひびわれ進展の結果であるとして、Rabinowiczの理論の適用性について検討し、さらにモルタル、コンクリートの耐摩耗性の向上の配合条件を破壊過程におけるタフネスの面から考察したものである。本実験結果を要約すれば次のとおりである。

(1) モルタルならびにコンクリートの摩耗形態は摩耗面の表面状態が一定している処女面摩耗に匹敵し、摩耗割合は時間的に一定で摩耗量は摩耗時間(衝撃回数)に比例して増加し、定常摩耗現象は認められない。

(2) モルタルおよびコンクリートの摩耗特性は摩耗粉の平均粒径に関する Rabinowicz の理論をもとにして、パラメーター(硬さ×摩耗粉の平均粒径)の関数で表わされると考えられ、摩耗粉の発生は繰り返し疲労によるひびわれ伝播の結果であり、摩耗特性はひびわれの伝播すなわち破壊過程におけるタフネスと関係すると推測できる。

(3) モルタルおよびコンクリートの耐摩耗性の向上をはかるには、より大きなフラクチャータフネスをもつ配合条件を見つけたことが一方法として考えられる。

謝 辞 本研究を行うにあたって、実験装置、文献などの面で多大なご指導をたまわりました建設省土木研究所 柳田 力地質化学部長、実験にご協力下さった和歌山工業高等専門学校土木工学科 中本純次助手、平野順技官ならびに卒業研究生に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高速道路調査会：コンクリート舗装の施工に関する検討報告書，昭和46年2月。
- 2) C.L. a'Court：Mix Design and Abrasion Resistance of Concrete, Proc. of a Symp. on Mix Design and

- Quality Control of Concrete, London, 5, 1954, pp. 77~91.
- 3) Fumihiko ÔHAMA：A Testing-Method for Resistance of Concrete to the Tractive Force of Water Current, Proc. of the Fifth Japan Congress on Testing Materials, Kyoto, 1962, pp. 118~122.
- 4) 柳田 力・樽沼昌明：セメントコンクリート舗装の設計施工技術の改善に関する試験調査，昭和48年，Private Communication.
- 5) 三和・堀田・金子・飯田：コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験，日本道路公団試験所報告，昭和45年，pp. 18~31.
- 6) Burwell, J.T.：Wear, 1, 2, 1957, 築添正，機械要素における摩耗の問題点，日本機械学会関西支部第49回講習会，昭和47年，pp. 1~12より。
- 7) Rabinowicz, E.：Friction and Wear of Materials, John Wiley and Sons, INC, 1965.
- 8) 笹田 直・甘道英男：移着成長による摩耗粉の生成，潤滑，Vol. 17, No. 2, 昭和47年，pp. 96~101.
- 9) 笹田 直：摩擦による固体表面の損傷，日本機械学会誌，Vol. 75, No. 641, 昭和47年，pp. 905~912.
- 10) 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, 昭和46年，pp. 264~269.
- 11) 戸川・佐藤・荒木：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, 昭和48年，pp. 202~206.
- 12) Kaplan, M.F.：Crack Propagation and the Fracture of Concrete, Jour. of ACI, Vol. 58, No. 5, 1961, pp. 591~609.
- 13) 岡田 清・小柳 治：コンクリートの破壊条件と破壊過程，材料，Vol. 20, No. 208, 昭和46年，pp. 2~12.
- 14) 小林昭一：コンクリートの破壊機構，コンクリート工学，Vol. 13, No. 2, 1975, pp. 1~11.
- 15) 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。
- 16) Vutukuri, V.S.：The Effect of Liquids on Tensile Strength of Limestone, Int. Jour. Rock, Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstract, Vol. 11, 1974, pp. 27~29.

(1974.12.23・受付)