

V-6 コンクリートの表面疲労摩耗に関する研究

北海道工業大学・工学部 正員 堀口 敬

1. まえがき

セメントコンクリート（以下コンクリートと呼ぶ）表面に発生する摩耗現象は非常に複雑であるが、トライボシステム的に整理してみると表面疲労摩耗(Surface fatigue wear)と切削摩耗(Abrasive wear)とがそれぞれ主となって作用する2種類の摩耗機構に大別されることを既に報告した¹⁾。また脆性材料の表面に作用する外力の方向について考えてみると、等応力レベルでは鉛直外力が主となって発生する摩耗（表面疲労摩耗）は、水平外力による摩耗（切削摩耗）に比較して大きなダメージを受けることがBitter²⁾により既に報告されている。しかしながら、コンクリートの表面疲労摩耗についての研究は非常に少なく、コンクリートの耐久性が大きな問題となっている今日、解明すべき重要な課題の一つであると思われる。

本報告は、コンクリートの表面疲労摩耗機構を解明するため、Hertzの接触理論を基盤としたガラス系脆性材料に関する表面破壊理論をコンクリート材料へ適用しその妥当性を検討したものである。

2. 表面疲労摩耗機構に関する理論的考察

図-1に示すように、半無限体の表面上に剛性の高い球体が接触しているとき、接触円の半径(a)はHertzの理論により

$$a = [3/4 \cdot P \cdot r \cdot k]^{1/3} \quad (1)$$

で示され、Pは鉛直外力、rは球体の半径である。ここでkは球体と半無限体のヤング率(E_1, E_2)およびポアソン比(ν_1, ν_2)とからなり、

$$k = [(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2] \quad (2)$$

である。この接触円を境界面として半無限体の内部には図-1に示すような3種類の応力場が生じる。図中のA領域には引張応力(σ_t)、B領域には圧縮応力(σ_c)がそれぞれ生じ、

$$\sigma_t = \frac{1-2\nu_2}{2\pi x^2} \cdot P, \quad x \geq a \quad (3)$$

$$\sigma_c = \frac{3}{2\pi a^2} \cdot P [1-x^2/a^2]^{1/2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (4)$$

となる。従って(3)(4)式より、 σ_{tmax} と σ_{cmax} との関係は半無限体材料のポアソン比のみの関数で表され、コンクリート($\nu_2=1/6$)では

$$\sigma_{tmax} = 0.22 \cdot \sigma_{cmax} \quad (5)$$

となる。また、領域Cにも引張応力(σ_t')が生じるが、領域Aのそれに比較すると小さい値をとり、その最大値でも0.01~0.015 σ_{cmax} 程度である。

従って、一般的なコンクリートの引張強度が、圧縮強度の約1/10程度であることから判断すると、コンクリートの表面疲労摩耗は、引張応力(σ_t)の超過によるコーンひび割れの発生に起因することが(5)式からわかる。

いま、このひび割れが発生する限界荷重を P_c とすれば、コーンひび割れの半径(a.)はほぼ接

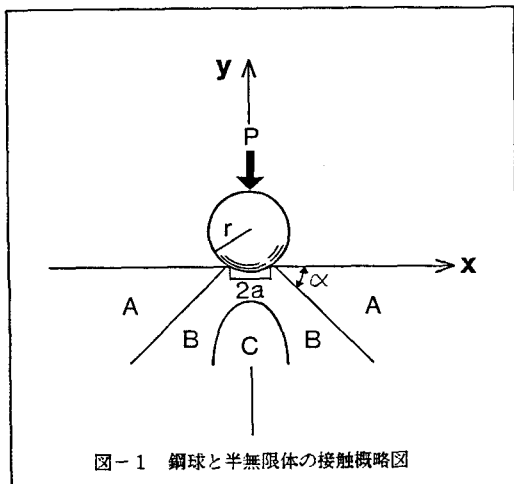


図-1 鋼球と半無限体の接触概略図

触円の半径と等しいから(1)(3)式より

$$\frac{P_c}{r^2} = \frac{9}{16} \cdot k^2 \cdot \left[\frac{2\pi \sigma_{tc}}{1-2\nu_2} \right]^3 \quad (6)$$

となり、材料が決まれば

$$\frac{P_c}{r^2} = \text{const.} \quad (7)$$

となる。ところが、ガラスに関しては、Auerbachの法則³⁾

$$\frac{P_c}{r} = F_a (= \text{const.}) \quad (8)$$

があり、Roesler⁴⁾によりエネルギーバランス理論を用いた理論的な証明も行われている。Faは実験的に種々のガラスにおいて求められており、3~10kgf/mmの範囲にあることが知られている。

ガラスの表面の場合には、さらに荷重が増加すると、幾重ものコーンひび割れが発生、進展して表面破壊に至る。Cherepanov⁵⁾は、このコーンひび割れの半径(a)を破壊力学のひび割れ進展性能を表す限界応力拡大係数(K_{Ic})と ν_2 , aによる任意関数 $\phi(\nu_2, a)$ とを用いて

$$a \cdot = \phi(\nu_2, a) \cdot [P_c/K_{Ic}]^{2/3} \quad (9)$$

で表している。ここで、(1)式のaが、(9)式の極値であるとすれば、(1)(9)式より、

$$a \cdot = \xi [K_{Ic} \cdot r \cdot k]^{2/3} \\ P_c = \xi K_{Ic}^2 \cdot r \cdot k \quad (10)$$

となる。ξ, ξは定数であり、ガラスの場合では表面エネルギー($\gamma=2 \times 10^{-4}$ kg/mm)を用いるとξ=50, およびξ=1.7×10⁵となることが報告されている。

3. 実験概要および結果・考察

3.1 モルタル表面における鋼球の貫入試験

セメントコンクリート表面と鋼球との接触理論の適用性を検討するために4種類の鋼球による貫入試験を行った。その結果を表-1に示す。

ガラスの場合は、コーンひび割れの発生荷重(P_c)の測定が比較的容易であるが、セメント系材料の場合は非常に難しいため、本報告では戸川らの方法⁶⁾により鉛直外力(P)と接触面積の半径(a)との比較によって判断することとした。接触面積の測定は、圧力測定用フィルム(最小測定可能応力5kgf/cm²)を用いて測定した。

図-2は P/r^2 とaとの関係を示したものである。接触面積の増加にもかかわらず、 P/r^2 の値は、ほぼ一定の値をとることが分かる。従って(7)式

表-1 モルタルの貫入試験結果のまとめ

鋼球の半径 r (mm)	荷重 P (kg)	接触面積の 直径2a (mm)	接触面積 A (mm ²)	鉛直変位量 u (mm)
7.95	10	...	...	...
	50	2.230	3.90	0.079
	100	2.470	4.80	0.097
	200	3.850	11.60	0.237
	500	...	...	...
	1000	...	...	...
15.90	10	1.625	2.10	0.021
	50	2.670	5.60	0.056
	100	2.900	6.60	0.066
	200	3.460	9.40	0.094
	500	4.780	17.90	0.181
	1000	6.400	32.20	0.325
25.45	10	...	...	...
	50	2.980	7.00	0.044
	100	3.620	10.30	0.064
	200	4.425	15.40	0.096
	500	5.530	24.00	0.151
	1000	6.920	37.60	0.236
31.75	10	...	...	...
	50	3.540	9.80	0.049
	100	4.000	12.60	0.063
	200	4.680	17.20	0.086
	500	5.720	25.70	0.129
	1000	7.200	40.70	0.205

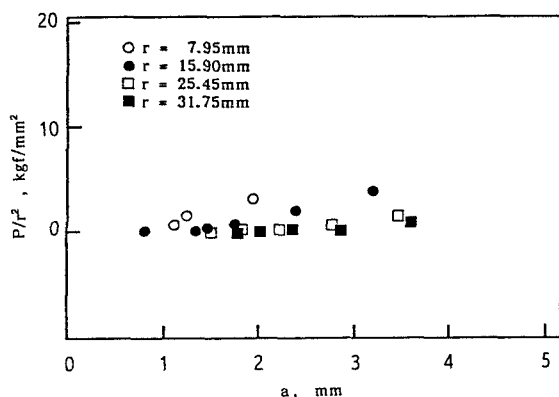


図-2 P/r^2 と接触半径との関係

を用いてコーンひび割れの発生荷重(Pc)を便宜的に接触面積から推定することは難しいものと思われる。

図-3は、P/rとaとの関係を示したものであり、P/rの値は接触面積の増加とともに増加する傾向を示している。また、その傾向は鋼球の半径により異なることがわかる。

図-4は、鉛直荷重と変位置（接近量）との関係を対数で示したものである。Hertz理論によれば、鉛直荷重(P)と変位置(u)との関係は(1)式より、

$$P = \frac{4r^{0.5}}{3k} \cdot u^{1.5} \tag{11}$$

となるが、実験的には

$$P = 6.61 \times 10^3 \cdot u^{1.43} \tag{12}$$

となりほぼ(11)式のuに等しい値をとった。ただし、r=7.95(mm)においては(11)式から計算される値よりも数倍大きな変位置をとった。

3.2 コンクリートの摩耗試験結果

表-2は、鋼繊維補強コンクリート（以下SFRCと呼ぶ）及び鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリート（以下SFRPCCと呼ぶ）の配合による各種の試験結果をまとめたものである。

表面疲労摩耗シュミレータによるSFRC及びSFRPCCの相対的な摩耗量の指標として、単位時間当りの平均摩耗深さを平均摩耗速度(mm/h)で示した。平均摩耗速度は試験時間60分後の平均摩耗深さをを用い、同配合でランダムに3本の試験を実施した。

表面強度試験は、RILEMにより提案された鋼球によるコンクリート表面の接触面積測定法を適用した⁷⁾。550gの鋼球を振子式にコンクリート表面に衝撃接触させたときの接触面積をカーボン紙により測定する方法であり、9回の測定値の平均をとった。

限界応力拡大係数(K_{1c})については、人工切り欠きの深さ(c)を11mmとして3等分点載荷による曲げ試験から

$$K_{1c} = \frac{6M}{Bd} \cdot c^{0.5} \cdot f(c/d) \tag{13}$$

により計算した。ここでMおよびf(c/d)は

$$M = P l / 2$$

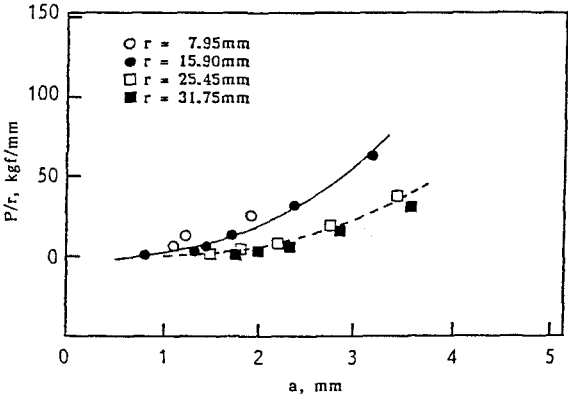


図-3 P/rと接触半径との関係

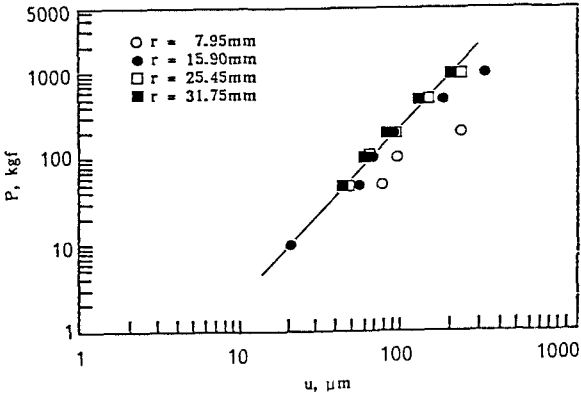


図-4 鉛直荷重と変位置との関係

表-2 SFRC及びSFRPCCの試験結果のまとめ

No.	W/C (%)	P/C (%)	V _f (%)	A. W. R. (mm/h)			RILEM d (mm)	K _{1c} (MN/m ^{1.5})
				1	2	3		
1	40.0	0	1.0	3.06	2.91	3.05	7.9	1.73
2	40.0	50	1.0	2.24	2.07	2.14	8.4	1.30
3	45.0	0	1.0	3.99	4.14	3.85	8.3	1.50
4	45.0	50	1.0	2.43	2.56	2.63	8.4	1.39
5	40.0	0	1.0	3.41	3.15	3.38	7.9	2.21
6	40.0	50	1.0	2.51	2.27	2.41	8.7	1.54
7	45.0	0	1.0	3.96	3.98	4.22	8.1	1.77
8	45.0	50	1.0	2.32	1.84	2.47	8.1	1.87
9	40.0	0	1.5	3.12	2.75	2.82	7.9	1.67
10	40.0	50	1.5	2.16	2.25	2.36	8.2	1.36
11	45.0	0	1.5	3.73	3.65	3.72	8.1	1.39
12	45.0	50	1.5	2.29	2.35	2.42	8.2	1.16
13	40.0	0	1.5	2.59	3.23	2.64	7.8	1.99
14	40.0	50	1.5	2.1	2.28	2.53	8.2	2.08
15	45.0	0	1.5	4.52	4.29	4.19	8.2	1.38
16	45.0	50	1.5	2.61	2.29	2.3	8.0	1.98

$$f(c/d) = 1.99 - 2.47(c/d) + 12.97(c/d)^2 - 23.17(c/d)^3 + 24.80(c/d)^4$$

であり、B, d, lは供試体の幅、高さ、およびセン断スパンでそれぞれ75, 75, 100 (mm)である。使用した供試体は75x75x400 (mm)のものであり同配合で3本作製した。

図-5は、平均摩耗速度と表面強度のパラメータである接触面積の直径との関係を示したものである。SFRCの場合は、明らかに接触面積の増加と共に平均摩耗速度が増加する傾向が示されているが、SFRPCCの場合はその傾向はなく、ほぼ一定値をとっている。このことから、SFRCの場合はガラス等の脆性材料に関する表面破壊理論の適用が可能であるが、SFRPCCの場合は、ポリマーディスパージョンの混入により高分子系材料に近い性状をとるものと推察される。

図-6は、平均摩耗速度と限界応力拡大係数との関係を示したものである。SFRCの場合は、限界応力拡大係数の増加にともない平均摩耗速度が減少することを顕著に示しており、(10)式によりコンクリート系材料の表面破壊特性が説明できることの可能性が推察される。SFRPCCの場合は、平均摩耗速度と限界応力拡大係数との直接的な関係はないようである。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) コンクリート表面にコーンひび割れが発生するときの臨界荷重を接触面積から推定する場合、Hertz理論よりもAuerbach法則により実施するほうが妥当であり、コンクリートの場合もガラス系材料に関する表面破壊理論が適用できるものと考えられる。
- (2) 鋼球によるコンクリート表面の接触状態は、ある程度の荷重状態まではHertz理論によって表せるが、鋼球の半径が小さくなると（本研究では8mmのとき）実測値よりも理論値は非常に小さい値をとる。
- (3) 鋼繊維補強コンクリートの摩耗量は、接触面積の増加にともない増加するが、ポリマーディスパージョンを混入すると接触面積の差異による摩耗量の変化は非常に少ない。
- (4) 鋼繊維補強コンクリートの限界応力拡大係数が増加により摩耗量は減少する傾向にあり、Cherpanovの表面破壊理論に関する妥当性が推察されるが、このことについては今後更に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 堀口:土木学会北海道支部論文報告集, 第39号(1983).
- 2) Bitter, J. G. A.: Wear, Vol. 6(1963).
- 3) Auerbach, F.: Ann. Phys. Chem., 43(1891).
- 4) Roesler, F. C.: Proc. Phys. Soc., B 69(1956).
- 5) Cherpanov, G. P.: Mechanics of Brittle Fracture, MacGraw-Hill(1979).
- 6) 戸川ら:土木学会論文報告集, No. 282(1979).
- 7) RILEM Recommendations, Vol. 15, No. 89(1982).

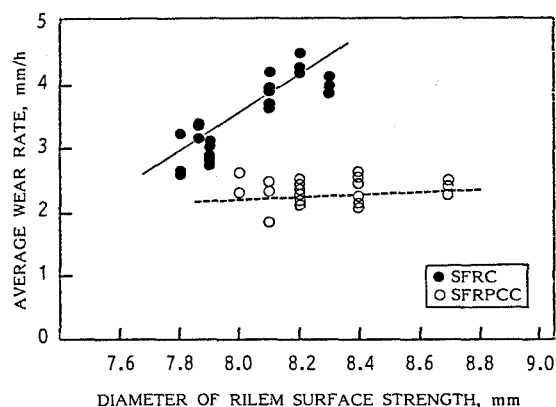


図-5 平均摩耗速度と表面強度との関係

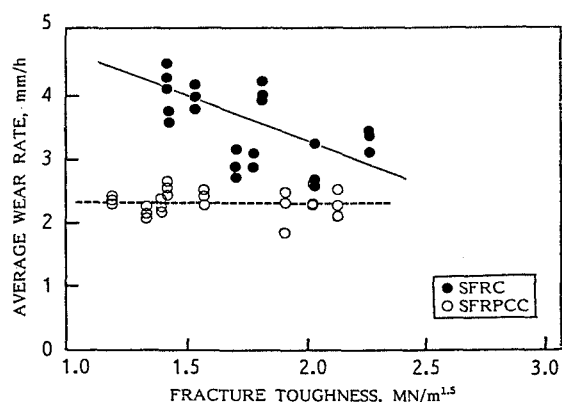


図-6 平均摩耗速度と限界応力拡大係数との関係