

V-1 コンクリートの摩耗機構に関する研究(その2)

北海道工業大学 正員 堀口 敬
 “ 安保 真一
 “ 佐々木 仁

1. はじめに

コンクリートの摩耗現象は、寒冷地地方におけるスパイクタイヤによる、スタッドピン・チェーン等の金属部分による路面の摩耗¹⁾や、砂れき等によるガムのエプロン部の摩耗²⁾が考えられ、現在深刻な問題となっている。本報告では、コンクリートの摩耗機構を解明する目的で、摩耗機構のうち疲労摩耗機構^{3), 4)}に主点を置き、マトリックスとしてのモルタルの摩耗性状及び、インクルージョンである骨材との関係等について検討を行った。モルタル及びコンクリートの配合因子が、摩耗に影響する度合(寄与率)を統計的に把握するために、さらには摩耗シュミレータの試験誤差がどの程度であるかを、調べるため実験計画法⁵⁾を用いて統計的な解析を行い、複合材料としてのコンクリートの摩耗機構を解明するための基礎的な資料を得ることが本報告の目的である。

2. 実験概要

(1) 因子の割り付け

本報告は、実験計画法に基づいてモルタルとコンクリートについてそれぞれ、L-16の直交表を用いて各因子の割り付けを行った。モルタルに関しては、水セメント比(w/c)、シリカフューム(SF)の混入率、アラミド繊維(Vf)の混入率、セメントと細骨材の重量比($C:S$)の、4因子を設定し表-1、及び表-2に示すような、2水準3因子と4水準1因子の組み合わせにより行った。コンクリートに関しては、水セメント比(w/c)、シリカフューム(SF)の混入率、アラミド繊維(Vf)の混入率、セメントと細

骨材の重量比($C:S$)、粗骨材の最大粒形(G_{max})、粗骨材の全体容積率(G)の、6因子を設定し、表-1、及び表-2に示すような2水準5因子と4水準1因子の組み合わせにより行った。さらに、摩耗シュミレータの試験誤差を調べるためモルタル及びコンクリートの各シリーズで、3回の繰り返し実験をランダムに実施し、繰り返し回数(K)としてその有意性を検討した。ペーストについては、水セメント比(w/c)を25%, 30%, 35%, 40%, 45%に変化させて行った。

表-1 モルタル、及びコンクリートの因子と水準

因 子	水 準			
	1	2	3	4
水セメント比 w/c (%)	35	45	—	—
シリカフューム 混入率SF (%)	0	20	—	—
アラミド繊維 混入率Vf (%)	0	2	—	—
セメント：細骨 材比 $C:S$	2:1	1:1	1:2	1:3
粗骨材の最大粒形 G_{max} (mm)	15	25	—	—
粗骨材の全体容 積率 G (%)	30	40	50	60

表-2 モルタル、及びコンクリートの配合表

モ ル タ ル					コンクリート		
No	w/c	SF	Vf	$C:S$	$C:S$	G_{max}	G
1	1	1	1	1	2	1	1
2	1	1	1	4	3	2	4
3	1	1	2	2	2	2	2
4	1	1	2	3	3	1	3
5	1	2	1	2	3	1	2
6	1	2	1	3	2	2	3
7	1	2	2	1	3	2	1
8	1	2	2	4	2	1	4
9	2	1	1	2	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	3
11	2	1	2	1	2	2	1
12	2	1	2	4	3	1	4
13	2	2	1	1	3	1	1
14	2	2	1	4	2	2	4
15	2	2	2	2	3	2	2
16	2	2	2	3	2	1	3

(2) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを、アラミド繊維は（HM-50, $12\mu\phi\times6\text{mm}$ ）カットファイバーを、また混和材として国産シリカフューム（比表面積： $18\text{--}20\text{m}^2/\text{g}$, SiO_2 含有量：90%以上）を、減水剤は、ナフタリンスルホン酸塩が主成分のものを、それぞれ用いた。

(3) 練り混ぜ及び供試体の作製

練り混ぜは、JIS A 1132に準じて行った。練り混ぜたモルタル、及びコンクリートは、型枠に各々突き棒で突きながら2層に分けて打設し、テーブルバイブレータで外側から締め固め表面仕上げはコテで人念に行った。この時、繊維と水が分離しないように、また繊維が一部に固まらないように、十分注意しながら仕上げを行った。打設後のモルタル及びコンクリート供試体は、材令1日で脱型し、その後、気乾養生し、実験日の前日に水中に入れ、材令28日で実験を行った。水中養生は、脱型後 $20^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ の水層に入れ気乾養生は、室温 20°C 湿度 60 %以上の恒温室で行った。又、摩耗試験に用いる供試体は直径15cm厚さ5cmの円柱供体を用い同一供試体を3本用意して実験を行った。

(4) 実験方法

摩耗試験機⁶⁾は、写真-1に示すものである。試験機に水を入れ、水中で供試体を3本のアームにより試験機の中央に取付け、試験機を上下運動させることにより中にある8個の金属球（ $\phi 14\text{mm}$ ）で供試体を損傷させるものである。振動数は8Hz、振幅は25mmである。試験は1本の試体につき90分間行い、途中30分ごとに摩耗損失量を測定し90分で表面骨材率を求めた。摩耗損失量の測定はレベルを用いて供試体を水平にし、ピベットを用いて人念に水を注入して行い、その体積をコンクリートの摩耗損失量とした。また、表面骨材率は供試体の摩耗表面の骨材をトレースし、その表面積より表面骨材率（骨材表面積÷摩耗表面積×100）を求めた。又、平均摩耗深さは摩耗損失量を摩耗表面積で除したものである。

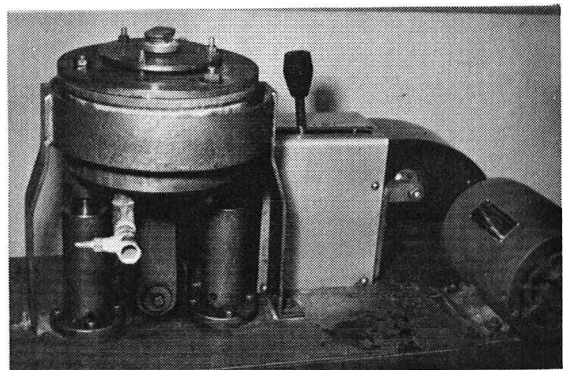


写真-1 摩耗試験機

表-3 パーストの実験結果

W/C (%)	平均摩耗深さ (mm)		
	30min	60min	90min
25	1.48	2.76	4.05
30	1.75	3.41	4.63
35	2.05	3.71	5.32
40	2.26	4.21	5.96
45	2.95	4.93	6.51

3. 実験結果及び考察

(1) セメントパーストの実験結果及び考察

水セメント比を25%, 30%, 35%, 40%, 45%に変化したセメントパーストの摩耗試験結果が、表-3である。この結果を用いて各試験時間毎の平均摩耗深さと水セメント比との関係を示すと、図-1になる。

各試験時間において、水セメント比の増加と共に平均摩耗深さが直線的に増加する明確な直線関係を示した。従って、セメントパーストは、水セメント比と一次関係を示し、水セメント比が10%減少すると約20%程度の耐摩耗性の効果が得られた。

(2) モルタル実験結果及び考察

モルタルの実験結果を平均摩耗深さでまとめると表-4になる。その結果を用いて、分散分析した結果が表-6～表-8である。モルタルの平均摩耗深さに影響する有意な因子は W/C, SF, Vf, C:S（但し、試験時間 60 分の C:S は有意とはならなかった）であった。

平均摩耗深さに影響を及ぼす各因子の寄与率は、各試験時間にお

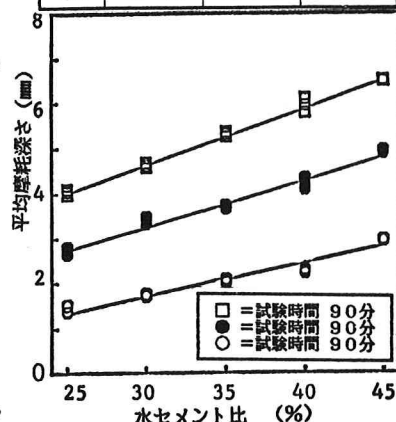


図-1 平均摩耗深さと水セメント比との関係

いて同様な傾向を示しているが、シリカフューム混入率が全体の約 40% 程度を占めていることがわかる。アラミド繊維混入率は初期の段階では、耐摩耗性に大きな影響を及ぼさないが、試験時間の増加と共に、平均摩耗深さに大きな影響を与えることがわかる。モルタルの平均摩耗深さは、普通コンクリートであれば、水セメント比と、セメント細骨材比によってほぼ推定が可能であるが、水セメント比による影響の方が大きいことが判明した。モルタルの摩耗性状に最も影響を及ぼす因子はシリカフューム混入率であった。その寄与率は試験時間30分、60分、90分においてそれぞれ、46.4% 38.1% 38.0%であった。有意となった因子の効果グラフが、図-2、図-3 である。図-2 によれば水セメント比が10%減少に対して平均摩耗深さでほぼ13%程度の耐摩耗性の効果が得られた。また図-3よりシリカフュームを20%混入することにより、無混入のモルタルに対してほぼ20.6%の耐摩耗性の効果が得られた。C:S は、細骨材の割合が増加するにつれて平均摩耗深さが増加する傾向にある。〈交互作用〉は、水セメント比とアラミド繊維混入率、シリカフューム混入率

表-5 モルタルの分散分析表 30分

因子	平方和	自由度	平均平方和	F値	寄与率(%)
w/c	3.98	1	3.98	99.50**	27.50
SF	6.69	1	6.69	167.25**	46.40
Vf	0.97	1	0.97	24.25*	6.49
W/C.Vf	0.27	1	0.27	6.75*	1.60
SF.Vf	0.17	1	0.17	4.25*	0.91
C:S	0.89	3	0.30	7.50**	5.93
K	0.00	2	0.00	0.03	—
e	1.37	37	0.04	—	11.17
T	14.34	47	—	—	100.00

表-4 モルタルの時間経過による平均摩耗深さの結果

NO	平均摩耗深さ (mm)		
	30(min)	60	90
1	2.95	5.87	7.76
2	2.65	5.11	7.67
3	9.2	17.3	24.2
4	8.0	14.8	21.3
5	7.2	13.6	19.8
6	9.6	16.5	23.5
7	7.5	14.5	20.5
8	14.0	25.0	34.5
9	11.8	20.6	30.4
10	10.0	17.6	28.0
11	9.4	17.0	25.3
12	7.5	14.4	22.4
13	9.2	17.0	26.6
14	8.5	14.8	23.5
15	15.8	28.5	40.0
16	12.8	24.8	35.7

表-6 モルタルの分散分析表 60分

因子	平方和	自由度	平均平方和	F値	寄与率(%)
W/C	7.64	1	7.64	69.45**	25.00
SF	11.57	1	11.57	105.18**	38.10
W/C.SF	0.41	1	0.41	3.73	1.00
Vf	5.18	1	5.18	47.09**	16.90
W/C.Vf	0.06	1	0.06	0.55	—
SF.Vf	0.34	1	0.34	3.09	0.77
C:S	0.81	3	0.27	2.45	1.60
K	0.00	2	0.00	0.00	—
e	4.05	36	0.11	—	16.63
T	30.06	47	—	—	100.00

表-7 モルタルの分散分析表 90分

因子	平方和	自由度	平均平方和	F値	寄与率(%)
W/C	5.49	1	5.49	60.26**	14.30
SF	14.39	1	14.39	157.94**	38.00
W/C.SF	0.59	1	0.59	6.48*	1.33
Vf	8.98	1	8.98	98.56**	23.60
W/C.Vf	0.13	1	0.13	1.43	0.10
SF.Vf	0.48	1	0.48	5.27*	1.03
C:S	4.31	3	1.44	15.80**	10.70
K	0.00	2	0.00	0.00	—
e	3.28	36	0.09	—	10.94
T	37.65	47	—	—	100.00

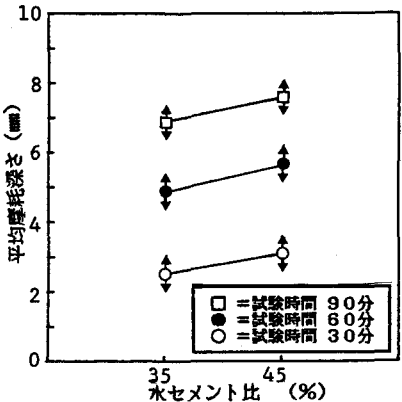


図-2 平均摩耗深さと水セメント比との関係

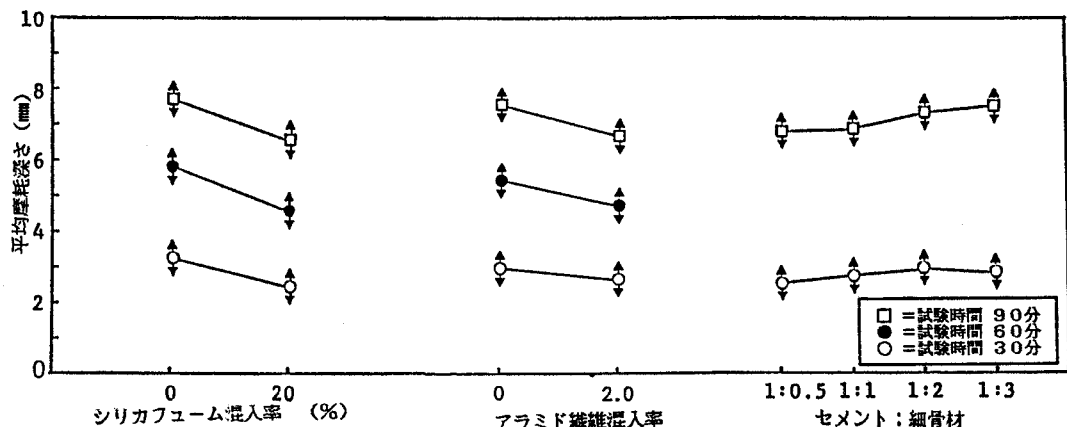


図-3 平均摩耗深さとシリカフューム混入率、アラミド繊維混入率、セメント：細骨材比との関係

とアラミド繊維混入率との交互作用が試験時間30分で有意となったが、その寄与率は、それぞれ1.6% 0.91% ,試験時間 90分では、水セメント比とシリカフューム混入率、シリカフューム混入率とアラミド繊維混入率が有意となったが、その寄与率は、それぞれ1.33% 1.03%であった。

(3) コンクリートの実験結果及び考察

コンクリートの摩耗試験結果を、平均摩耗深さでまとめると表-8 になる。表-9 ～ 表-11 は各試験時間別の平均摩耗深さを分散分析したものである。今回設定した全ての因子は、平均摩耗深さに関して有意を示したが、粗骨材の最大粒形 (G_{max}) は、ある程度の摩耗量に達した後に、耐摩耗性に効果が表れるものと推察される。平均摩耗深さに影響を及ぼす割合を示す寄与率に関しては、各試験時間において同様の傾向を示した。即ち、シリカフューム混入率と粗骨材の全体容積率が、各試験時間において最も大きな寄与率を示し、その値は共に30%程度の値を示した。

水セメント比に関しては、モルタルの結果に比べ、寄与率の値は、半分以下の値をとった。

有意となった各因子の平均摩耗深さに関する効果グラフが、図-4, 5である。図-4では、水セメント比の10%減少により、約9%の耐摩耗性の向上が得られた。シリカフュームの20%の混入により、及びアラミド繊維の2.0%の混入により、それぞれ20%、及び11%の耐

表-8 コンクリートの時間経過による平均摩耗深さ及び表面骨材率の結果

No	平均摩耗深さ (mm)			表面骨材率 (%)		
	30min	60min	90min	1	2	3
1	2.73	5.43	7.34	3.80	3.10	2.34
2	2.22	4.06	5.37	44.57	51.57	45.76
3	2.52	4.33	5.97	37.18	24.95	38.55
4	2.38	4.19	6.06	37.34	40.05	29.61
5	2.63	4.26	5.19	35.54	39.50	40.93
6	2.05	3.86	5.02	43.21	39.95	27.57
7	2.20	3.37	5.09	21.74	14.28	16.89
8	1.34	2.58	3.47	43.91	48.06	44.78
9	3.22	5.46	6.85	2.95	3.80	4.34
10	2.93	4.81	6.46	44.12	30.10	53.11
11	2.69	5.26	6.68	22.98	33.43	13.99
12	2.57	4.36	6.26	21.18	28.24	27.87
13	2.72	5.42	6.98	13.65	20.96	19.22
14	2.35	3.66	4.86	47.99	49.29	35.27
15	2.32	4.23	5.55	32.48	50.43	36.20
16	1.50	2.79	3.88	56.02	48.65	39.73

表-9 コンクリートの分散分析表 30分

因子	平方和	自由度	平均平方和	F値	寄与率 (%)
W/C	1.01	1	1.01	50.50**	9.38
SF	3.39	1	3.39	169.50**	31.91
W/C.SF	0.11	1	0.11	5.50*	0.85
Vf	1.95	1	1.95	97.50**	18.28
W/C.Vf	0.21	1	0.21	10.50**	1.80
SF.Vf	0.33	1	0.33	16.50**	2.94
G	2.50	3	0.83	41.50**	23.11
C:S	0.40	1	0.40	20.00**	3.60
K	0.00	2	0.00	0.00	—
e	0.66	35	0.02	—	8.13
T	10.56	47	—	—	100.00

摩耗性の効果が示された。又、図-5においては、細骨材量の増加にともない、平均摩耗深さが増加すること、粗骨材の全体容積率の増加にともない、平均摩耗深さが減少することがわかる。

図-5の右端の図は、平均摩耗深さと試験時間90分における各供試体の表面骨材率との関係を示したものである。シリカフュームの混入の有無により、その関係は異なる。表面骨材率の増加に伴う、耐摩耗性の効果は、シリカフューム混入コンクリートの場合、さらに向上することが示されている。

各測定時間における、同一配合の3回の測定結果の誤差の有意性を示す、Kの因子については、モルタル試験、及びコンクリート試験とも有意性は全く見られなかった。この結果は、摩耗試験機の精度を考える上で、特に重要であると思われる、同様な結果が図-1にも見られ、同一配合での各測定値間の変動が非常に少ないことがわかる。

表-10 コンクリートの分散分析表 60分

因子	平方和	自由度	平均平方和	F値	寄与率(%)
W/C	2.88	1	2.88	36.00**	7.68
SF	11.23	1	11.23	140.38**	30.57
Vf	6.39	1	6.39	79.88**	17.30
SF.Vf	1.27	1	1.27	15.88**	3.26
G	11.34	3	3.78	47.25**	30.44
C:S	0.33	1	0.33	1.88*	0.69
G _{max}	0.15	1	0.15	1.88	0.19
K	0.10	2	0.05	0.63	—
e	2.85	36	0.08	—	9.87
T	36.47	47	—	—	100.00

表-11 コンクリートの分散分析表 90分

因子	平方和	自由度	平均平方和	F値	寄与率(%)
W/C	2.03	1	2.03	29.00**	3.66
SF	19.61	1	19.61	280.14**	36.46
Vf	6.38	1	6.38	91.14**	11.77
SF.Vf	2.61	1	2.61	37.29**	4.74
G	17.15	3	5.72	81.71**	31.61
C:S	2.47	1	2.47	35.29**	4.48
G _{max}	0.58	1	0.58	8.29**	0.95
K	0.06	2	0.03	4.71	—
e	2.69	36	0.07	—	6.33
T	53.59	47	—	—	100.00

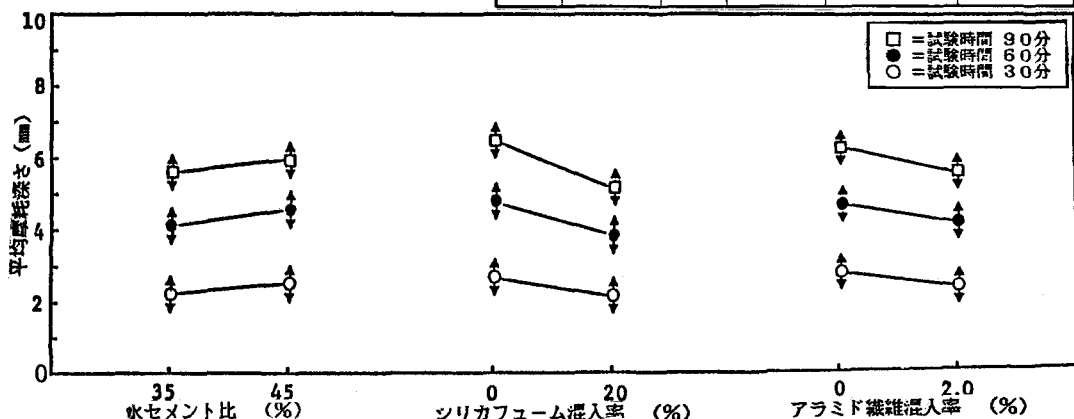


図-4 平均摩耗深さと水セメント比、シリカフューム混入率、アラミド繊維混入率との関係

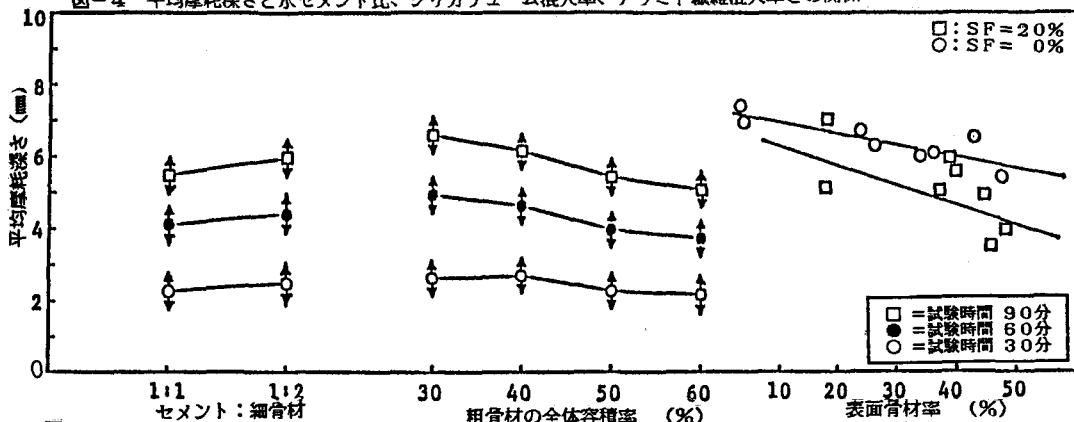


図-5 平均摩耗深さとセメント：細骨材比、粗骨材の全体容積率、表面骨材率との関係

4. まとめ

本報告は、コンクリートの摩耗機構を解明するため、コンクリート複合材料の構成要素を、セメントペースト、モルタル、粗骨材に分け、各々について検討を行った。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) セメントペーストの摩耗性状は、水セメント比の一次関数として、明確な定量化が可能である。
- (2) モルタルの摩耗性状は、水セメント比とセメント細骨材比の因子に依存する。通常の使用範囲の配合では、前者の摩耗性状に与える寄与の方が、後者よりも大きい。
- (3) マトリックスの耐摩耗性を、向上する目的で混入する各種の混和材に関して、シリカフェュームの適用は特に効果がある。混入率が20%で、耐摩耗性の20%程度の向上が得られる。
- (4) 各種の補強繊維の中、今回はアラミド繊維を用い、耐摩耗性の効果を検討した結果、初期摩耗の段階では大きな影響を及ぼさないが、摩耗の進行と共に、耐摩耗性の効果が現れてくる。
- (5) コンクリートにおけるモルタル部分の摩耗性状は、それ単体で実施した試験結果と同様の結果を示し(図-6)、交互作用の効果は顕著ではない。従って、コンクリートの摩耗性状については、マトリックスとインクルージョンの各摩耗性状を用いた、重ね合せの法則が適用できることが推察される。
- (6) コンクリートの摩耗は、良質な粗骨材を用いた場合、表面骨材率に大きく影響を受ける。表面骨材率の経時変化については、前報で詳しく述べたが、平均摩耗深さが5~7mm程度の状態での表面骨材率と配合設計から得られる粗骨材容積率との関係を示したものが図-7である。この図から、表面骨材率は、配合時の粗骨材容積率を考慮することにより推定が可能であるが、その関係は必ずしも直線関係とはならないことに注意をする必要がある。

《参考文献》

- 1) 戸川、小柳：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，No.248, 1976.
- 2) 奥田：ダムコンクリートのすりへり・洗掘損傷，コンクリート工学，Vol.17, No.11, 1979.
- 3) 堀口：コンクリートの摩耗に関するトライボメトリについて，土木学会北海道支部論文報告集，第39号，1983.
- 4) 松原：トライボロジ・摩耗・潤滑の科学技術，産業図書，1982.
- 5) 田口：実験計画法，丸善，1962.
- 6) 堀口、長野、渡辺：コンクリートの摩耗機構に関する研究(その1)，土木学会北海道支部論文報告集，第41号，1984.

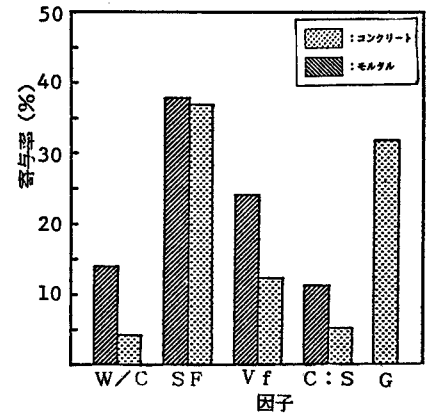


図-6 モルタル及びコンクリートの平均摩耗深さに影響を及ぼす因子の寄与率

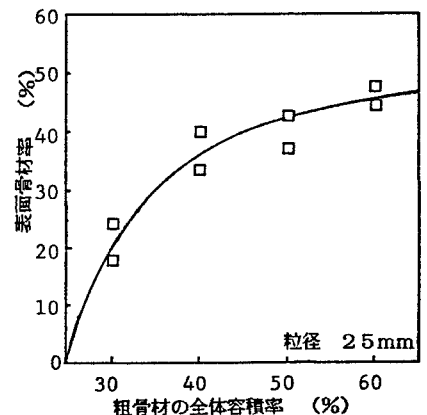


図-7 表面骨材率と粗骨材の全体容積率との関係