重力式防波堤などに適用するアスファルト マットに関する研究

A STUDY OF THE ASPHALT MAT USED FOR THE GRAVITY-TYPE BREAKWATER

加 川 道 男*
By Michio Kagawa

1. ま え が き

アスファルトマットを防波堤などの重力式構造物の基礎面上と堤体底面との間に敷設して、その滑動抵抗力を増大させる工法についてはすでに開発され発表済み¹⁾である。しかしながらアスファルトマットを適用することによってなぜ滑動抵抗力が増大するのか、またその機構はいかなるものなのかという点については十分には明らかにされていなかった。したがって本論文においては、その滑動抵抗の機構について理論的実験的に究明しようとするものである。次にこの工法は実用化されてから数年を経ていて、その効果が実証されているが、ごく限られた配合のアスファルトマットが使用されている。アスファルトマットは配合によって特性が異なり、温度によっても性質が変化する材料であって、気温、水温、施工条件などの異なる構造物に対してかならずしも最適なものでないかもしれない。また開発初期であるので、その滑動抵抗力（摩擦係数）を過小に評価し、むだな設計をしているおそれがある。したがって、現場の諸条件に適した実用上望ましいアスファルトマットの配合を見出すよう実験的に研究し、あわせて設計上必要な標準摩擦係数を求めようとするものである。

2. アスファルトマットの滑動抵抗に関する 研究

(1) アスファルトマットを適用する構造物の滑動機構

アスファルトマットを重力式構造物に適用して、その滑動抵抗を増大するには基礎上面と堤体下面の間にアスファルトマットを設置すればよい。その滑動機構を 図一

図一 滑動抵抗力増大工法のモデル

1 のようなモデルにより考えることにする。重さ W の堤体 ④ が外力（横荷重） P によって生ずる抵抗力は、1) 堤体 ④ の底面 a とマット ⑤ の上面 b との摩擦抵抗、2) アスファルトマット ⑤ の圧縮およびせん断抵抗、3) マット ⑤ の下面 c と基礎 ⑥ の上面 d との摩擦抵抗、4) 基礎 ⑥ のすべり破壊抵抗である。したがって外力 P による構造物の安定は、1)～4) のいずれかの抵抗力の最も弱いものに支配されることになる。すなわち、1)～3) がいかに強い抵抗力を有していても 4) の基礎が弱いと、構造物は滑動したような形となり、さらに大きな基礎破壊がすすむと構造物は倒壊する。したがって構造物の滑動抵抗を究明するには、基礎の強度が十分であることが前提である。次に 2) のアスファルトマットの強度についてもこれが破壊すれば堤体 ④ は移動することになるが、実用アスファルトマットのせん断強度は $10 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ （温度 $30^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ ）のオーダーであり、一方外力は普通の構造物で $2 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$ ($20 \sim 30 \text{ t/m}^2$) のオーダーであるので、破壊を生ずることがない。圧縮強度はさらに強く同一温度条件でせん断強度の 2 倍以上である。また、ずれせん断力による変位が若干あるけれどもあと (2. (3)) で述べるようにその量は少なく、接触面の摩擦抵抗力よりも大きく、ずれせん断により破壊することはない。したがって堤体 ④ の滑動は ab 面および cd 面の滑動抵抗力の大小によって決まるが、 ab 面を何らかの方法により補強すれば別であるが、マットとコンクリートの面の方が捨石面よりも抵抗力が小さい¹⁾から ab 面で堤体 ④ の滑動が生ずる。

* 正会員 運輸省大臣官房地域計画課長

以上のことから、アスファルトマットを用いて重力式構造物の滑動抵抗を増大する工法においては、コンクリートとの滑動抵抗力のできるだけ大きなアスファルトマットを製作し、適用することが要点であり、このマットは局部的に応力の集中する場合を考慮して荷重に対する圧縮、せん断などの強度の大きいこと、また運搬敷設時に要求される引張、曲げ、圧縮などの諸強度、たわみ性などを有していることが必要である。さらに滑動抵抗力を有効に働かせるには、基礎の強度が十分でなければならない。また基礎が捨石などの場合はその強さに限度があるので、いたずらに滑動抵抗の大きいことは必要がなく、構造、施工条件などに応じ最適なものを採用することが、この工法の要点の一つでもある。

(2) アスファルトマットの滑動抵抗の理論

a) アスファルトマットの滑動抵抗理論

前述のようにアスファルトマットを構造物に適用する場合の滑動抵抗機構を究明するためにはアスファルトマットの上面とコンクリート堤体底面との滑動を考察すれば十分である。また堤体はコンクリートでその構造重量などから底面は普通の平らなコンクリート面を考える。アスファルトマットの下面は捨石マウンド上に敷設する場合を考えて不動とする。

二つの固体の接触面の滑動については摩擦の法則が成立し、荷重、接触面の大きさに関係のない一定値の摩擦係数を有するとされている。アスファルトマットは碎石(2~5mm)砂、石粉、アスファルトよりなる混合物で、空けきがなく高温では流動性を示すこともあるが、常温では固体であって、一定温度(常温)下では、コンクリート面との接触面において摩擦の法則が成立するものとする。またマットは十分な強度を有し、他の固体と大差ない性質を有するある範囲の限定されたものを対象とする。実際のアスファルトマットの表面は平滑に仕上げても多少凹凸があり、コンクリート表面も製作上多少の凹凸はできるし、いかに平滑に仕上げても微視的には凹凸がある。

アスファルトマットにコンクリートブロックを載荷し、横荷重を加えてコンクリートブロックを移動させたのち、アスファルトのすべり面を観察すると、すべる前は黒く光っていたのが光沢が消えてマットの地肌の黒褐色となっている。これはコンクリートの底面とマットの表面が載荷時、あるいはすべる直前に十分接触し、緊密な結合部を形成したことを示すもので、横荷重によってその結合部が引きはがされ、弱いやわらかい部分であるマットの表面がこすられて最上面にあるごく薄い黒色の膜が破られて、地肌の黒褐色部が現われたものである。また肉眼でもわかるほどの条がついているものがある

図-2 見掛けの接触面と真実接触面

が、これはコンクリート底面の小さな凸部によりマットが掘り起こされたものである。以上のことから両面の滑動機構を金属の凝着説²⁾にのっとり 図-2 のようにモデル化して考える。

ブロックとマットの表面はいかに入念に仕上げても微視的には凹凸があるから両面の真実に接触している面は A' ではなく、両面の微小な凸部である $a_1, a_2, \dots, a_n$ で接触する。これらの面は堤体の重量 W により緊密に接触し結合して外力 P に対抗する。よって 真実の接触面の面積 A は $A = \sum_{i=1}^n a_i$ であり、結合部のせん断に要する平均接線応力を S とすれば、

$$P = A \cdot S \dots\dots\dots (1)$$

となる。金属の凝着説によれば 真実接触面積 A は荷重 W に比例し、やわらかいほう、すなわち アスファルトマットの凸部の降伏圧力 P_m に反比例して増加する。

$$A = K \cdot W / P_m \dots\dots\dots (2)$$

となる。すなわち、 真実接触面積 A は W および P_m のみによって決まるもので、見掛けの接触面積 A' の大きさに無関係である。Amontons の摩擦の第一法則「摩擦力はのみかけのすべり面積に関係なく荷重に正比例する」が成立する。また式 (1) と (2) より

$$P = K \cdot W \cdot S / P_m \dots\dots\dots (3)$$

となり、摩擦係数を μ とすれば

$$\mu = P / W = K \cdot S / P_m \dots\dots\dots (4)$$

で、「摩擦係数は荷重に関係がない」という Amontons の第二法則が導かれる。換言すれば、図-2 のように荷重があまり重くないとき (W) はコンクリートブロック底面の凸部とアスファルトマットの凸部の最も高いところで支えられているから真実接触面積は小さい。荷重が増加すると (W') いままで支えられていた面 ($a_1 \dots a_n$) は圧力が増加するからマットの降伏点を越えて流動し、面積は増加する ($a'_1 \dots a'_n$)。接触面は荷重に正比例して増加し、接触面が見掛けの面積に近づくまで荷重に関係なく摩擦係数が一定になるような緊密な接触面を形成する。緊密な接触面とは、コンクリートの分子とマットのアスファルトマトリックス (アスファルト+石粉) の分子の凝着した面と考えられるが、その間に介在する

不純分または遊離アスファルトの薄膜（黒色のもの）が存在する。この薄膜は垂直荷重と横荷重によって破壊され、それらの混合物とコンクリート分子の凝着により結合部が形成される。

次にコンクリート底面の小さな凸部による掘り起こしの滑動抵抗力であるが、コンクリートブロックまたはケーソンの底面は、その製作上全く平滑にすることは無理であるし、多少の凸部を生ずることはやむを得ない。むしろアスファルトマットがやわらかい固体であるので、小さな凸部は荷重が集中してマットにくいこみ、これがマットを掘り起こしせん断する抵抗力となるから望ましいことである。しかしながら強いて突起をつくることは製作上のコストや施工上に問題があり、マットにもそれに対応して厚さを増すとかの考慮が必要であり、また前述のようにアスファルトマットと基礎捨石との抵抗力をより大きくする必要がないのでむだである。したがって製作上生ずる凸部については無作為に生ずるものであって定量的に把握しにくく、またその数、大きさもきわめて小さいものである。その抵抗力については、凸部の大きさ（くいこみの深さ）、形状、見掛けの接触面上の凸部の数によって異なるものである。またある底版とマットとの接触面をとると、凸部の大きさ、形状、数およびマットのせん断強度により決まる抵抗力は、堤体の重さに関係なく一定であるから、荷重が重くなれば抵抗力は摩擦力に比し相対的に小さな値となる。なお、コンクリート堤体の前趾底面がアスファルトマット面にくいこんで前趾マットを掘り起こすような場合も底部の凸部と同様である。

以上の理論を実証せんとして次の実験を行なった。まずコンクリートブロックの前趾底面のくいこみによる掘り起こしの影響を除くためにアスファルトマットの面積をブロック底面より小さくした。測定装置、方法は 2. (3) と同じである。アスファルトマットの配合は、アスファルト（針入度 30/40）10.5%，ダスト 21.0%（石粉および砂のうち 200 番フルイ通過分）、砂 28.5%，

図—4 滑動抵抗値の分類

碎石 40.0%，ダスト/アスファルト=2.0 である。ブロックの底面は普通現場で打設する程度の平面とした。110 t/m² の荷重をかけて、あらかじめマットの上面の凸部を補正した。載荷重 (W) を 7～41 t/m² の範囲でその抵抗力 (P) を測定した。載荷重に対する P/W の変化は 図—3 に示すとおりである。一見 P/W は一定ではなく大きな変化がある (1.7～1.07)。特に W が小さいときが大きい。しかしながら 図—4 に明らかなごとく P/W は一定値 (=0.90) を有し、6 t/m² のほぼ一定の抵抗力がおおのに加わっていることがわかる。これはコンクリート底部の凸部がマットにくいこむ掘り起こしによる抵抗力であって横荷重の大きさによっても変わらないコンクリート面の粗度 (凸部) による抵抗力と考えられる。この程度の凸部は実験の載荷重の範囲内ではただちにマットにくいこむと考えられるので、掘り起こし力はほぼ一定の値となる。したがって 図—3 のとおり横荷重の小さいときは大きく影響して見掛けの摩擦係数 (P/W) は 5 t/m² のとき 1.2 増加し、10 t/m² でも 0.6 も増加している。20 t/m²～40 t/m² の場合は 0.3～0.15 の増加に止まる。この値は割石とコンクリートのように硬い物相互の場合 (0.75 t/m²) よりかなり大きい (別途同じ装置を用いて実験した)。したがってこの実験からアスファルトマットとコンクリートの接触面の滑動については、コンクリートの凸部 (粗度) の掘り起こし抵抗を無視すれば摩擦の法則を完全に満たす滑動抵抗力を示し、その摩擦係数もかなり大きい。また掘り起こし力は他の硬い固体同志のすべりよりはかなり大きい。荷重が 20～30 t/m² の防波堤などの実用上の範囲では摩擦係数に影響する値は小さいことがわかった。

b) 載荷時間および温度による滑動抵抗力の影響

a) にのべたように、コンクリートの掘り起こしの抵抗力を無視すると摩擦の法則が成り立つことが明らかとなったが、真実接触面積 A に関しては、アスファルト合材の特性上、硬い固体相互のすべり摩擦とは多少趣を異にする。すなわち、硬い固体相互では載荷重の大きさの

図—3 上載荷重の P/W におよぼす影響

みによって真実接触面は増減し、載荷時間温度には無関係であるが、アスファルトマットは同一荷重でも載荷時間によって変形がすすみ、温度によってその材質が変化するので、その接触面積も変化する。すなわちアスファルト合材の圧縮およびせん断力に対する変形量 ϵ は一般に荷重 W と載荷時間の関数として変化する³⁾。

$$r = Wf(t) \dots\dots\dots (5)$$

また圧縮およびせん断などの強度 P は温度 T の逆数で変化する³⁾。

$$P = f'(1/T) \dots\dots\dots (6)$$

したがって荷重が一定ならば載荷時間が長くなると真実接触面積を増加させ、摩擦抵抗力も大きくなる。また温度が上昇すればアスファルトマットの強度が低下するから真実接触面積は大きくなるが、その結合部の強度が低下することになり、抵抗力は必ずしも大きくはならない。

以上の理論を実証するために次の実験を行なった。使用した装置および供試体は 2. (3) の実験と同一のものである。実験は時間の関係上当初 100 t/m² の荷重を 5 分間載荷して、除去したのち実用荷重の最大値と思われる 40 t/m² をそれぞれ 10 分、30 分、100 分、300 分載荷して P/W を測定した。また温度の変化に対する影響を考察するため同一条件で 10°C、35°C の場合を行なった。

測定結果を図示すると 図—5 のとおりである。まず載荷時間による (P/W) の増加は 100 分 (約 2 時間) で最終の値の 90% 以上を示し、300 分 (約 5 時間) で

ほとんど最終値に近い抵抗力が得られている。これはアスファルトマットの表面状態にもよるが、2 時間程度でマットの表面の凸部 (碎石などの) が載荷重によって沈み、コンクリート面とマットのアスファルト合材としての本来の面との接触を意味する。さらに 5 時間程度となれば、マットの粘弾性特性から載荷重の時間の影響による沈下の大部分が終わること、すなわち真実接触面の増加がほぼ終わることを示している。したがって実用上のマットについては、2~5 時間の載荷を考慮すればよく、それ以後の真実接触面の増加すなわち摩擦係数の増加は、安全側としておくのが適当であろう。なお、この場合の時間は、アスファルトマットの表面の凹凸の程度によって長短を生じ、温度によって高温の場合は早く、低温の場合は遅いことに注目する必要がある。

次に同一のアスファルトマットでありながら温度によって、 P/W は変化している。この配合の場合は高温の (35°C) の方が低温 (10°C) の場合より低下している。高温により真実接触面の面積が大きくなる度合より、その結合部すなわちアスファルトマットの強度低下の方が大きなケースといえよう。このマットよりやわらかいものは、この温度ではこの傾向が強まるであろうし、これより硬い配合では、この温度による影響は少なくなるし、配合によってはこの傾向が逆転する場合もあるかもしれない。

また横荷重をかけるとブロックが移動し (2 mm 程度以上) P/W がほぼ一定値 (= 動摩擦係数) を示すのが 図—5 (b) である。動摩擦係数は静摩擦より短い時間で最終の値が得られる。これはブロックの移動により十分な接触面が得られることによるものであろう。また温度による影響は高温の場合が低温より若干小さいがその変化は僅少である。

(3) アスファルトマットの滑動抵抗に関する実験的研究

以上のアスファルトマットの滑動抵抗の機構を究明するため、図—6 のようにして横荷重 (P) とブロックの変位を同時に測定した。アスファルトマットは底面が動かないように固定し (厚さ 4 cm のうち下部 3 cm を止金で固定)、マットの温度に応じた水を張った。実験装

図—5 載荷時間の経過による摩擦係数の増加

図—6 滑動抵抗機構の実験

温度	強度	曲 げ	圧 縮	せん 断	引 張	配 合		備 考
10°C		99.0 kg/cm ²	102.7 kg/cm ²	42.5 kg/cm ²	33.9 kg/cm ²	アスファルト 針入度	30/40, 120% 砂—18%	変位速度
30°C		18.0	26.1	12.5	7.1	グースト—30% 砕 石—40%	ダス / アスフ アルト = 2.5	20 mm/min

図—7 P/W , ブロックの変位の時間的变化

置は 3.(3) と同一のものである。マットの配合, 10°C および 30°C における各強度は前表のとおりである。強度の試験法は 3.(4) と同じである。

測定の結果は 表—1 のとおりである。 P/W , P およびブロックの変位の時間的变化を図示したものが 図—7 である。またブロックの変位と P との関係を示したものが 図—8 である。図—7 からわかることは荷重があ

図—8 横荷重とブロック変位との関係

る程度加わって から (10°C のときは 20 t/m², 35°C のときは 8 t/m²) ブロックは 微小の変位を始め, 最大荷重の 80~90% の荷重で 1 mm 程度の変位をし, 最大荷重では 3 mm 前後の変位をおこす。それを過ぎると急激に変位している。図—8 を考察すれば明かなように荷重が最大になるまでのブロックの変位は見掛けの移動である。ブロック底面とマットの上面は緊密な結合部を形成しているので, マットが横荷重によりせん断力を

表—1 横荷重, P/W , ブロックの変位とその時間

マットの 温 度	載荷時間 (分)	横 荷 重 (t/m ²)			横荷重/上載荷重			ブロックの変位 (mm)			変位開始から P_i までの 時間 (秒)		
		P_a	P_b	P_c	P_a/W	P_b/W	P_c/W	B_a	B_b	B_c	t_a	t_b	t_c
10°C	10	38.8	40.8	26.8	0.97	1.02	0.67	1.0	2.6	14.8	5	5.7	8
	30	41.6	44.8	27.2	1.04	1.12	0.68	1.0	2.9	16.7	6	6.7	9
	100	46.8	58.4	28.4	1.17	1.46	0.71	1.0	3.2	16.1	5	7.6	10
	300	50.4	65.2	33.6	1.26	1.63	0.84	1.0	3.4	25.7	5	7.8	10
35°C	10	18.4	24.0	21.6	0.46	0.60	0.54	1.0	2.7	11.4	8	10.8	13
	30	19.2	30.0	27.6	0.48	0.75	0.69	1.0	3.2	13.6	8	11.0	14
	100	22.8	33.6	28.0	0.57	0.84	0.70	1.0	3.6	14.8	9	12.1	14
	300	26.8	38.0	28.8	0.67	0.95	0.72	1.0	3.9	16.3	9	12.2	14

(備考) 1) 上載荷重 W は 40 t/m²
2) 載荷時間は横荷重をかける前に上載荷重を載荷した時間。ただしそれ以前に 100 t/m² の荷重を 5 分間載荷している。
3) P_a はブロックの変位 1.0 mm のときの横荷重, P_b は横荷重の最大値, P_c はブロックが滑動後はほぼ一定値となった横荷重。
4) B_a, B_b, B_c ; t_a, t_b, t_c はそれぞれ P_a, P_b, P_c に対応する変位と時間。

うけてずれ変形すると、ブロックはマットと一体になって変位する。したがってブロックはマットの上を滑動していない。この時の最大荷重がブロックとマットとの滑動抵抗力であり、 P/W が静摩擦係数である。荷重がピークを過ぎるとブロックが急激な変位をしているのは明らかにブロックの底面がマットの上を滑動していることを示す。滑動後 2～3 秒、移動量 20 mm 前後で P/W はほぼ一定値となる。これは動摩擦係数である。動摩擦係数は静摩擦係数より小さい。荷重最大時のブロックの変位がマットのみの変位であるかどうかをチェックするために、配合、温度は多少違いが別に測定したマットの粘弾性係数⁴⁾を用いてマットの変位量を計算すると表—2 のとおりである。計算は載荷時間が少ないので粘性によるフロー値を無視して行なったが、計算値は実際の変位測定値と近似しているので、この考え方が正しいことがわかる。

表—2 アスファルトマットのずれ変位

マットの温度	最大横荷重 (t/m ²)	測定値 (mm)	計算値 (mm)	弾性係数 E (dyne/cm ²)
10°C	40.8	2.6	2.0	8×10^8
	44.8	2.9	2.2	
	58.4	3.2	2.9	
	65.2	3.4	3.2	
35°C	24.0	2.7	3.2	3×10^8
	30.0	3.2	4.0	
	33.6	3.6	4.5	
	38.0	3.9	5.0	

またアスファルトマットには 10°C においては約 40 t/m²～65 t/m² (4.0 kg/cm²～6.5 kg/cm²)、35°C では約 24 t/m²～38 t/m² (2.4 kg/cm²～3.8 kg/cm²) のずれせん断力が加わっていたが、マットは破壊せず、コンクリート底面とマットの接触面で滑動した。これは、上載荷重が 20～40 t/m² (2.0 kg/cm²～4.0 kg/cm²) の実用の範囲においてはアスファルトマットの強度は十分強固であって、両接触面の滑動が先に生ずることを明らかにしている。

3. アスファルトマットの適正配合に関する実験的研究

(1) 実用上適当なアスファルトマットの選択

前節で明らかにしたように重力式構造物の滑動抵抗を増大する工法においては、アスファルトマットの特性を考慮して、コンクリートとの滑動抵抗ができるだけ大きな配合のマットを見出すことが必要である。その配合のマットは構造物としても、施工時にも必要な強度をあわせもっていなければならない。しかしながら基礎は捨石

などの場合が多く、その強度には限度があるのでアスファルトマットの摩擦係数は、いたずらに大きい必要はない (コンクリートと捨石との摩擦係数は 0.6 程度)。

アスファルトマットの滑動抵抗力は、温度、載荷時間、載荷重によって変化するが、それらはアスファルト合材の特性であって、そのマットの材質、すなわち配合によって固有のものを有する。したがってマットの材質を決定する主要な配合の因子としては、アスファルトの種類、アスファルト量、粗骨材量、ダスト/アスファルト比などが考えられる¹⁾。温度の影響については、一定の配合であっても可逆的ではあるがそれぞれの温度に応じて異なった特性値を有する別な材質に変化すると考えるべきものであろう。しかしながら実用上の温度にはある範囲がある。たとえば、海水中では 5°～25°C くらいである。したがってその適用温度内において、滑動抵抗が大きく所要強度などを有するものであればよいわけである。載荷時間については、マットの施設、堤体載荷後、どのくらいの時間で波などの設計横荷重が加わるかの条件によって、マットの発揮する滑動抵抗力に差が生ずるが、一定時間以後の抵抗力増加分は安全側として考えるのが適当であろう。また載荷重の大小によっては、普通の製作平面でも生ずるコンクリートの小さな凸部によるマットの掘り起こし抵抗力が摩擦係数に影響するが、載荷重が実用の 20～40 t/m² では、その影響度は少ないことを特定配合のマットで明らかにしたが、一般的にどうかを確かめる必要がある。

したがって以上の因子と条件のもとにおいてアスファルトマットの摩擦係数を測定し、それぞれの影響を定量的に把握する。一方、マットの所要強度を測定して参考とし、実用上望ましいアスファルトマットの配合とその期待される標準的な摩擦係数を実験的に定めようとするものである。

(2) 実験要項

実験は実験計画法⁵⁾によって次のように行なった。材料配合および条件は三水準を目標とし、実験温度は二次要因と考えた。④ A_p (アスファルトの針入度)、⑩ A_c (アスファルトの量%)、⑪ D/A (ダスト/アスファルト)、⑫ C_A (粗骨載量%)、⑬ S (載荷重 t/m²) の 5 因子を $L_{21}(3^{13})$ 表を用いてわりつけ、27 種の配合によってマットを製作し、各配合のものから三水準の温度で実験を行ない、その摩擦係数を測定する。わりつけ表は表—3 のとおりである。三水準のとり方は、配合上の四因子については、いままでの経験と研究から、マットの製作が可能な範囲内において、それぞれの因子の影響が最も顕著だと思われる三点を選んだ ($A_p=10/20, 30/40, 40/60, A_c=9.0, 10.5, 12.0\%, D/A=1.5, 2.0,$

表一3 sL_{27} の実験条件割りつけ表

列番 因子 番号	1	2	3	5	6	8	9	13
	AS pen	AS con		D/A		C/A (%)	S (t/m ²)	Z
1	10/20	9.0	1	1.5	1	35	20	1
2	"	"	1	2.0	2	40	30	2
3	"	"	1	2.5	3	45	40	3
4	"	10.5	2	1.5	1	40	30	3
5	"	"	2	2.0	2	45	40	1
6	"	"	2	2.5	3	35	20	2
7	"	12.0	3	1.5	1	45	40	2
8	"	"	3	2.0	2	35	20	3
9	"	"	3	2.5	3	40	30	1
10	30/40	9.0	2	1.5	2	35	30	3
11	"	"	2	2.0	3	40	40	1
12	"	"	2	2.5	1	45	20	2
13	"	10.5	3	1.5	2	40	40	2
14	"	"	3	2.0	3	45	20	3
15	"	"	3	2.5	1	35	30	1
16	"	12.0	1	1.5	2	45	20	1
17	"	"	1	2.0	3	35	30	2
18	"	"	1	2.5	1	40	40	3
19	40/60	9.0	3	1.5	3	35	40	2
20	"	"	3	2.0	1	40	20	3
21	"	"	3	2.5	2	45	30	1
22	"	10.5	1	1.5	3	40	20	1
23	"	"	1	2.0	1	45	30	2
24	"	"	1	2.5	2	35	40	3
25	"	12.0	2	1.5	3	45	30	3
26	"	"	2	2.0	1	35	40	1
27	"	"	2	2.5	2	40	20	2

2.5, CA=35, 40, 45%)。載荷重についてはこの工法の主な実用範囲と思われる 20, 30, 40 t/m² をとった。温度については、10°C, 20°C, 30°C とした。

なお載荷時間については、実験計画法の要因として取り上げなかったが、載荷時間が 2~5 時間で大部分の効果が出るのが特定の配合ではあるがわかっているし、またアスファルト合材の変形量は荷重と時間の関数であるので、実験には時間の制限もあり、載荷時間を 30 分とし、載荷重を 110 t/m² と実験の載荷重 (20~40) の 3~5 倍をかけて実質上載荷時間が 2 時間程度以上になるように考慮した。

(3) 実験装置

実験装置はアスファルトマットの温度をほぼ一定にすることのできる水槽と上載荷重および横荷重を作動させる装置を 図一9 のように製作した。水槽は深さ 6 cm, 縦 110 cm, 横 65 cm の大きさのもので L 型鋼でアスファルトマットのすべりを止めることができるようになっている。

この中にほぼ目標の温度近くなった水を注入し、投込み式電気ヒーターで (温度を下げるときは水を入れる)

図一9 摩擦実験装置

写真一1 摩擦実験装置

一定の温度になるようヒーターのスイッチを手動で開閉した。上載荷重については手動ジャッキ (容量 10 t) により最大 110 t/m² まで加圧できるようにし、横荷重を加えたときコンクリートブロックによるせりもちの影響を除くように鋼板とローラーを取り付けて実験を行なった。実験に際しては手動ジャッキによる加圧力をロードセル、動ひずみ測定器、電磁オシログラフの順序で測定自記させた。横荷重はモーターにより油ポンプを作動させ連続して荷重を増すことのできるオイルジャッキ (容量 30 t) を使用した。横荷重についても上載荷重と同様の測定を行ない自記させた。コンクリートブロック (40 cm x 40 cm x 20 cm) の変位の大きさをひずみゲージ (金切鋸刃にひずみゲージをはりつけた保持台にとりつけた) により測定し、荷重と同様にオシログラフに記録させた。

(4) 実験方法および実験結果

摩擦実験は各温度ごとの乱数表によるわりつけ順序にしたがって実施した。供試体のアスファルトマット (30 cm x 30 cm x 4 cm) は実験前夜より恒温加熱槽の中、あるいは大型電気冷蔵庫の中で 16 時間以上水に浸したまま加熱、または冷却して目標の温度に保たせた。実験水槽の中は電気ヒーターまたは氷によって調節し所定の ±1°C の範囲内になるようにした。すべりの実験に先立

表—4 摩擦実験結果表

温度 区分 番号	10℃			20℃			30℃		
	試験 順位	摩擦係数		試験 順位	摩擦係数		試験 順位	摩擦係数	
		Ⅱ	Ⅲ		Ⅱ	Ⅲ		Ⅱ	Ⅲ
1	6	0.54	0.52	1	0.74	0.56	17	0.59	0.561
2	3	0.59	0.57	4	0.65	0.54	26	0.60	0.57
3	18	0.62	0.62	16	0.63	0.57	12	0.69	0.67
4	21	0.77	0.66	17	0.79	0.64	4	0.86	0.61
5	15	0.75	0.66	8	0.68	0.73	8	0.75	0.70
6	27	0.83	0.68	10	0.93	0.73	6	0.96	0.67
7	13	0.84	0.67	19	0.99	0.76	15	1.00	0.73
8	17	0.89	0.70	6	1.97	0.71	21	1.13	0.79
9	23	0.83	0.72	14	1.24	0.79	23	1.05	0.84
10	5	0.85	0.64	20	0.74	0.59	2	1.00	0.65
11	1	1.01	0.64	27	1.15	0.72	19	0.98	0.68
12	25	1.02	0.74	21	1.19	0.76	20	0.95	0.65
13	26	0.97	0.67	3	0.88	0.67	11	1.04	0.75
14	12	1.57	0.75	12	1.73	0.72	5	1.33	0.78
15	11	1.20	0.71	26	1.13	0.77	16	1.09	0.73
16	8	1.67	0.83	11	1.45	0.84	27	1.20	0.75
17	20	1.15	0.75	13	1.41	0.65	3	1.26	0.86
18	9	1.30	0.80	24	1.10	0.77	22	0.90	0.78
19	2	1.04	0.66	15	1.03	0.58	1	1.13	0.72
20	10	1.26	0.76	22	1.48	0.71	18	1.14	0.74
21	14	1.05	0.70	23	1.37	0.78	9	1.25	0.77
22	4	1.50	0.75	25	1.17	0.74	14	1.27	0.86
23	24	1.24	0.78	9	1.13	0.76	10	1.17	0.83
24	19	1.15	0.79	2	1.10	0.75	7	1.00	0.65
25	7	1.34	0.82	7	1.17	0.79	13	1.29	0.84
26	22	1.00	0.79	18	1.16	0.83	24	1.12	0.72
27	16	1.00	0.84	5	1.25	0.82	25	1.36	0.83

表—5 強度試験結果表

区分 温度 番号	試験結果 (kg/cm ²)											
	曲げ強度			圧縮強度			せん断強度			引張強度		
	10℃	20℃	30℃	10℃	20℃	30℃	10℃	20℃	30℃	10℃	20℃	30℃
1	102.5	71.7	48.9	138.3	92.5	64.5	52.8	35.3	22.8	37.9	17.8	15.0
2	129.8	88.5	59.3	167.8	110.1	71.6	63.0	34.7	24.3	45.4	32.8	20.9
3	129.5	86.8	59.6	189.1	105.6	77.4	59.7	36.6	26.2	55.6	38.0	22.9
4	123.0	77.5	48.8	161.0	91.8	58.8	55.6	32.3	22.8	43.9	28.1	13.9
5	124.8	74.2	45.7	159.8	89.5	55.3	52.6	32.3	24.6	35.4	30.0	16.2
6	136.4	83.7	50.5	174.3	103.8	63.3	62.8	36.3	24.3	35.3	23.6	17.3
7	111.9	66.8	38.2	139.5	79.6	49.1	46.6	28.7	19.7	29.3	24.8	15.7
8	109.8	70.1	38.7	135.4	81.3	46.5	49.5	30.7	20.5	36.3	27.3	16.4
9	120.6	74.3	42.8	148.1	90.0	53.6	53.5	32.9	22.1	41.4	29.2	15.4
10	116.6	52.4	24.8	134.2	71.9	39.2	47.3	27.3	16.9	38.7	21.2	9.7
11	110.5	49.2	23.2	128.4	65.2	34.9	47.9	27.7	15.2	43.4	24.4	9.6
12	121.7	59.2	27.6	143.1	75.6	41.2	54.8	29.9	16.6	42.2	23.7	11.6
13	99.5	41.7	19.2	112.8	51.5	26.9	43.2	22.1	10.9	34.0	19.7	8.4
14	101.5	43.7	19.2	116.1	52.0	26.3	43.7	23.8	11.4	36.7	18.8	7.8
15	106.2	45.6	21.0	117.3	54.2	29.6	46.0	24.0	12.3	41.7	19.5	9.8
16	84.3	36.7	14.7	93.7	45.5	21.6	38.0	18.1	9.9	27.4	14.8	6.4
17	89.6	36.8	16.2	92.0	47.2	22.2	40.0	18.6	10.2	33.0	16.7	7.8
18	99.0	40.0	18.0	102.7	54.2	26.1	42.5	21.2	12.5	33.9	16.4	7.1
19	100.3	39.2	16.3	116.9	61.0	33.2	41.1	20.8	12.3	27.4	15.8	6.5
20	107.1	40.6	17.4	120.3	60.6	28.9	43.2	21.6	12.2	30.8	17.3	8.0
21	101.9	39.2	17.1	121.6	55.3	28.3	46.4	22.4	12.4	34.1	14.8	6.2
22	87.2	31.6	12.6	94.7	43.9	21.8	38.8	17.8	9.9	29.0	10.7	4.5
23	91.2	31.2	13.0	97.2	44.0	21.6	41.8	18.0	11.1	27.7	13.7	5.2
24	91.6	35.2	14.7	100.1	47.9	23.4	41.0	19.4	11.5	29.2	12.2	4.6
25	78.9	27.7	9.8	90.3	40.0	18.3	38.4	16.0	9.1	21.8	8.9	3.7
26	73.0	27.1	9.1	81.2	35.0	15.5	34.3	15.0	7.8	22.5	10.7	4.0
27	82.1	31.7	13.3	84.3	38.2	19.1	36.3	17.5	8.2	29.7	10.9	4.0

って供試体に 110 t/m² の圧力を 30 分間上部より加えた。この圧力をとり去ったのちに所定の上載荷重を加圧し、横荷重を作用させてコンクリートブロックを滑动させ、荷重、移動の変化量を電磁オシログラフに同時に記録させた。摩擦実験結果は 表—4 に示すとおり値である。表中の摩擦係数Ⅱは P/W の横荷重が一番大きな時の値で、静摩擦係数であり、摩擦係数Ⅲはブロックがスムーズにすべって P/W がほぼ一定値になった値で動摩擦

係数である。強度試験については、試験方法は変位速度 20 mm/min で、圧縮、引張の各強度を摩擦実験に使用した計画表によって測定した。供試体は曲げ $-4\times 4\times 16$ cm (支点間隔 10 cm)、圧縮 $-4\times 4\times 8$ cm (載荷面積 4×4 cm)、せん断 $-4\times 4\times 16$ cm (載荷板 4×4 cm の複せん断)、引張 $-1\times 4\times 6$ cm (切欠付正味断面積 1×2 cm) である。強度試験結果は 表—5 に示すとおりである。強度値は供試体 4 個の平均値をとった。

表—6 各水準の測定値の和

温度 区分 水準和	A _P ㊤			A _C ㊤			D/A㊤			C/A㊤			S㊤		
	10			10			10			10			10		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1 水準の和	6.66	7.62	7.63	7.98	8.98	8.33	9.52	8.96	9.38	8.65	9.21	9.28	10.28	10.91	9.93
2 "	10.74	10.79	9.73	9.98	9.54	9.47	9.46	10.36	9.48	9.23	9.72	9.20	9.02	9.63	9.57
3 "	10.58	10.86	10.73	10.02	10.75	10.31	9.00	9.95	9.25	10.10	9.63	9.63	8.68	8.73	8.61

温度 区分 水準和	A _P ㊤			A _C ㊤			D/A㊤			C/A㊤			S㊤		
	10			10			10			10			10		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1 水準の和	5.08	6.03	6.14	5.85	5.81	6.01	6.22	6.17	6.47	6.24	6.17	6.35	6.57	6.59	6.63
2 "	6.53	6.49	6.63	6.45	6.51	6.58	6.40	6.37	6.67	6.41	6.40	6.66	6.35	6.31	6.70
3 "	6.89	6.76	6.96	6.92	6.96	7.14	6.60	6.74	6.57	6.57	6.71	6.73	6.30	6.38	6.40

(5) 解 析

摩擦係数実験の結果を使って温度を 10°C, 20°C, 30°C と固定した場合, すなわち ${}_3L_{27}$ として解析を行なう。各水準の測定値の和は 表—6 のとおりである。

摩擦係数 II (静), 温度 10°C の場合: 全平方和 S_t は $X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + \dots$

$$+ X_{27}^2 - (X_1 + X_2 + \dots + X_{27})^2 / 27$$

(ただし $X_1 \dots X_{27}$ は各測定値)

であるから 表—4 の数値を用い,

$$S_t = 31.1626 - 27.98^2 / 27 = 2.1670$$

となる。このときの自由度は $df_t = 27 - 1 = 26$ である。

各要因の平方和 (S_A, S_B, S_C, S_D, S_F) は 表—6 の値と $(X_1 + X_2 + \dots + X_{27})^2 / 27$ の数値を用いて

$$S_A = 6.66^2 / 9 + 10.74^2 / 9 + 10.58^2 / 9 - 27.98^2 / 27 \\ = 1.1866,$$

$$S_B = 0.3023$$

$$S_C = 0.0179$$

$$S_D = 0.1183$$

$$S_F = 0.1517$$

誤差の平方和 S_e は

表—7 摩擦係数 II (静) の解析表

(a) 10°C (II)

要因	平方和 SS	自由度 df	SS/df	F_0	寄与率 (%)	要因効果			信頼 限界
						1	2	3	
全	2.1670	26			100				
S_A	1.1866	2	0.5933	24.72**	65	0.74	1.19	1.18	± 0.15
S_B	0.3023	2	0.1516	6.32**	15	0.89	1.11	1.11	
S_C	0.0179	2	0.0090	0.38	—	1.06	1.05	1.00	
S_D	0.1183	2	0.0590	2.46	5	0.96	1.03	1.12	
S_F	0.1578	2	0.0789	3.29	7	1.14	1.00	0.96	
誤差 e	0.3841	16	0.0240		8				

(b) 20°C (II)

要因	平方和 SS	自由度 df	SS/df	F_0	寄与率 (%)	要因効果			信頼 限界
						1	2	3	
全	1.9603	26			100				
S_A	0.7612	2	0.3806	10.78**	52	0.85	1.20	1.21	± 0.19
S_B	0.1819	2	0.0910	2.58	10	1.00	1.06	1.19	
S_C	0.1152	2	0.0576	1.63	5	1.00	1.15	1.11	
S_D	0.0712	2	0.0356	1.00	2	1.02	1.08	1.15	
S_F	0.2667	2	0.1334	3.78*	16	1.21	1.07	0.97	
誤差 e	0.5641	16	0.0353		15				

(c) 30°C (II)

要因	平方和 SS	自由度 df	SS/df	F_0	寄与率 (%)	要因効果			信頼 限界
						1	2	3	
全	1.1497	26			100				
S_A	0.5580	2	0.2790	17.5**	60	0.85	1.10	1.20	± 0.13
S_B	0.2195	2	0.1098	6.9**	21	0.92	1.05	1.15	
S_C	0.0030	2	0.0015	0.01	—	1.04	1.05	1.03	
S_D	0.0117	2	0.0059	0.37	—	1.03	1.02	1.07	
S_F	0.1035	2	0.0518	3.26	9	1.10	1.06	0.96	
誤差 e	0.2540	16	0.0159		10				

$$S_t - (S_A + S_B + S_C + S_D + S_F)$$

であるから $S_e = 0.3841$ となり, その自由度は

$$df_e = 26 - (2 + 2 + 2 + 2 + 2) = 16$$

である。誤差分散 σ^2 の推定値は

$$\sigma^2 = S_e / df_e = 0.0240$$

である。各要因についての F_0 は $F_0 = (SS/df) / (S_e/df)$ であるから各 SS/df を計算し, それぞれの F_0 を計算する。計算結果は, 表—7 (a) の $SS/df, F_0$ 欄のとおりである。 F -表から $f_1 = 2, f_2 = 16$ の 1% (**), 5% (*) の点を求めると $F_{16}^2(0.01) = 6.23, F_{16}^2(0.05) = 3.63$ である。したがって主効果は $A_P(24.72 > 6.23), A_C(6.32 > 6.23)$ にあることとなる。次に因子 A を A_1 から A_3 (B_1 から B_3 でも同一) にしたときの特性値の差の信頼限界を求めると

$$\pm t(0.05, 16) 2/9 \sigma^2 = 2.12 \times 2/9 \times 0.024 \\ = \pm 0.15,$$

寄与率 S は分散分析からの変動の中に 誤差分散をその自由度だけ含むから

$$S = S_i' / S_T \times 100 (\%)$$

$$\text{ただし } S_i' = \{S_i - df_i / (S_e / df)\},$$

$$S_T = S_A' + S_B' + S_C' + S_D' + S_F' + S_e',$$

表—8 摩擦係数 III (動) の解析表

(a) 10°C (III)

要因	平方和 SS	自由度 df	SS/df	F_0	寄与率 (%)	要因効果			信頼 限界
						1	2	3	
全	0.1628	26			100				
S_A	0.0685	2	0.0343	49.00**	44	0.63	0.73	0.77	± 0.03
S_B	0.0639	2	0.0320	45.71**	42	0.65	0.72	0.77	
S_C	0.0080	2	0.0040	5.71*	5	0.69	0.71	0.73	
S_D	0.0060	2	0.0030	4.29*	4	0.69	0.71	0.73	
S_F	0.0046	2	0.0023	3.29	2	0.73	0.74	0.75	
誤差 e	0.0118	16	0.0007		3				

(b) 20°C (III)

要因	平方和 SS	自由度 df	SS/df	F_0	寄与率 (%)	要因効果			信頼 限界
						1	2	3	
全	0.1913	26			100				
S_A	0.0303	2	0.0152	5.24*	18	0.67	0.72	0.75	± 0.05
S_B	0.0747	2	0.0374	12.90**	49	0.65	0.72	0.77	
S_C	0.0186	2	0.0093	3.21	11	0.69	0.71	0.75	
S_D	0.0164	2	0.0082	2.83	9	0.69	0.71	0.75	
S_F	0.0048	2	0.0024	0.83	1	0.73	0.70	0.71	
誤差 e	0.0465	16	0.0029		12				

(c) 30°C (III)

要因	平方和 SS	自由度 df	SS/df	F_0	寄与率 (%)	要因効果			信頼 限界
						1	2	3	
全	0.1880	26			100				
S_A	0.0378	2	0.0189	4.85*	26	0.68	0.74	0.77	± 0.06
S_B	0.0710	2	0.0355	9.10**	52	0.67	0.73	0.79	
S_C	0.0023	2	0.0012	0.31	—	0.72	0.74	0.73	
S_D	0.0088	2	0.0044	1.13	3	0.71	0.74	0.75	
S_F	0.0055	2	0.0028	0.72	1	0.74	0.75	0.71	
誤差 e	0.0626	16	0.0039		18				

$$S_A' = (S_A - 2 S_e / 26) = 1.1571,$$
$$S_B' = (S_B - 2 S_e / 26) = 0.2728,$$
$$S_C' = (S_C - 2 S_e / 26) = -0.0116,$$
$$S_D' = (S_D - 2 S_e / 26) = 0.0888,$$
$$S_F' = (S_F - 2 S_e / 26) = 0.1283,$$
$$S_e' = (S_e - 16 S_e / 26) = 0.1554,$$

それぞれの寄与率の値は表-7 (a) の寄与率の欄のとおりである。以上の計算の結果をまとめると表-7 (a) のとおりである。

摩擦係数Ⅱ (静), 温度 10°C の場合と同様の計算をした結果が摩擦係数Ⅱ (静), 20°C, 30°C の場合は表-7 (b), (c) であり, 摩擦係数Ⅲ (動) 10°C, 20°C, 30°C の場合は表-8 (a), (b), (c) である。

曲げ, 圧縮, せん断, 引張の各強度は表-5 で明らかなように, 圧縮強度が大きな値を示すものは他の強度も大きな値を示す。また温度が低いと強度値は大きくなる。そこで, この強度表から圧縮強度を代表させてアスファルトマットの強度におよぼす各要因について解析した。摩擦係数の場合と同様の計算をして, 表-9 を作成した。

以上の結果を総括すると, 次のとおりである。

表-9 圧縮強度の解析表
(a) 10°C (圧縮)

要因	平方和 SS	自由度 df	SS/df	F ₀	寄与率 (%)	要因効果			信頼 限界
						1	2	3	
全	22,365.33	26			100				
S _A	15,324.06	2	7,662.03	90.01**	72	157.0	115.4	100.7	±9.22
S _B	4,782.31	2	2,391.16	28.09**	22	140.0	125.9	107.5	
S _C	626.39	2	313.20	3.68*	3	120.2	122.0	131.2	
S _D	204.69	2	102.35	1.20	1	121.1	124.5	127.8	
S _F	65.84	2	32.92	0.38	—	122.2	125.5	125.6	
誤差 e	1,362.04	16	85.12		3				

(b) 20°C (圧縮)

要因	平方和 SS	自由度 df	SS/df	F ₀	寄与率 (%)	要因効果			信頼 限界
						1	2	3	
全	13,328.78	26			100				
S _A	10,751.36	2	5,375.68	210.32**	82	93.8	57.5	47.3	±5.05
S _B	1,991.65	2	995.83	38.96**	16	77.5	64.3	56.8	
S _C	143.85	2	71.93	2.81	1	64.2	65.0	69.4	
S _D	19.36	2	9.68	0.38	—	66.1	67.2	65.2	
S _F	13.57	2	6.79	0.27	—	65.9	67.2	65.5	
誤差 e	408.99	16	25.56		1				

(c) 30°C (圧縮)

要因	平方和 SS	自由度 df	SS/df	F ₀	寄与率 (%)	要因効果			信頼 限界
						1	2	3	
全	8,400.37	26			100				
S _A	6,899.66	2	3,449.83	320.02**	83	60.0	29.8	23.3	±3.29
S _B	1,229.39	2	614.70	57.02**	15	46.0	36.3	30.2	
S _C	91.37	2	45.69	4.24*	1	37.0	38.0	40.2	
S _D	1.04	2	0.52	0.05	—	37.5	38.0	37.7	
S _F	6.51	2	3.26	0.30	—	37.0	38.1	38.0	
誤差 e	172.40	16	10.78		1				

a) 静摩擦係数について

採用した因子 A_P-アスファルトの針入度, A_C-アスファルトの量, D/A-ダストとアスファルトの比, CA-粗骨材の量, S-載荷重のうち有意なものを温度別にまとめると次のとおりである。

温度	99% の確率で有意	95% の確率で有意
10°C	A _P , A _C	—
20°C	A _P ,	S
30°C	A _P , A _C	—

A_P がいずれの場合も 99% の確率で有意で寄与率も大きい (52~65%)。次に A_C が 99% の確率で有意で寄与率は 15%, 21% で A_P に次いでいる。20°C の場合有志にならなかったが寄与率 10% でかなり大きい。載荷重は 20°C の場合 95% の確率で有意で 16% の寄与率があり, 有意でない 10°C, 30°C の場合も寄与率 7%, 9% で A_C に次いでいる。

D/A, CA は実験の範囲ではほとんど関係がない。最も影響の大きい A_P, A_C について摩擦係数の大きさを表-7 より見ると, A_P は 10/20 では非常に小さな値を示し, 30/40, 40/60 では大きい。A_C は 9% では小さく, 10.5%, 12% では大きい。また温度差による影響は, 各配合によって増減がそれぞれ異なって, 一定の傾向は見られないが, その差はあまり大きくない。載荷重 S の影響は, コンクリート底面の凸部がマットを掘り起こしてゆくときに生ずる一定の抵抗値があるため表-7 に明らかなように各温度とも載荷重の小さいときその影響が大きく, 摩擦係数が大きく現われている。20°C 前後ではコンクリート底面の凸部のマットのくいこみ量およびその強度から最も大きな抵抗値をとるのではないかと考えられる。しかしながらこの抵抗力が摩擦係数に影響する値は 20 t/m²~40 t/m² 載荷の差で最も影響のある 20°C で 0.14, 10°C で 0.08, 30°C で 0.04 であって, 絶対値としてはそれほど大きなものではなく, 前述の実験値 (2. (1)) を裏付けている。

b) 動摩擦係数について

静摩擦係数と同様に, 諸因子の有意なものをあげれば次のとおりである。

温度	99% の確率で有意	95% の確率で有意
10°C	A _P , A _C	D/A, CA
20°C	— A _C	A _P — —
30°C	— A _C	A _P — —

静摩擦の場合と違って, 動摩擦係数のばらつきは少ないが, 上記の有意差が出ている。A_C が最も寄与率が大きく, A_P がこれに次いでいる。しかしながら 10°C の場合は A_P が A_C より寄与率が高く, D/A や CA も影響している。

動摩擦は、真実接触面の結合強度よりもむしろ真実接触面の大きさの影響が大きいと考えられるのでやわらかい配合のものの係数が大きくなっている。したがって、10℃の低温になれば、合材の硬さに関係する配合の諸因子全部が影響を与えることになる。載荷重の影響はこの場合有意差はない。また温度による影響は静摩擦より小さい。

c) マットの強度について

圧縮強度について有意なものは次のとおりである。

温 度	99% の確率で有意	95% の確率で有意
10℃	A_P, A_C	D/A
20℃	A_P, A_C	—
30℃	A_P, A_C	D/A

A_P が最も寄与率が大きく (72~83%) て A_C がこれに次いでいる。 D/A は 1~3% の寄与率で、95% の有意である。 A_P のかたいもの、 A_C の少ないもの (D/A が大きいもの) が、強度が強くなっているが、アスファルト合材の性質上当然な結果である。

(6) 適正配合と標準摩擦係数

以上によって、摩擦係数および強度に影響する諸因子とその有意差がわかったけれども、次にいかなる配合のマットが期待する摩擦係数を持ち、強度があるのかを検討し、実用上適当なマットの配合とその摩擦係数および強度を選定する。前述の解析結果から、すべての場合において 99% の確率で有意な因子は A_P と A_C である。実用上の摩擦係数の値は安全側を考える必要があるので、最も有意な A_P, A_C の因子を重視し、 $D/A, CA, S$ 等を誤差と見なして測定値を考察し、適当な A_P, A_C による配合と、その時の測定値の誤差を考慮した下限値を採用することとする。

a) 静摩擦係数

10℃ : m 平均値 = 1.037, $n_e = 27/1 + 2 + 2 = 5.4$ 回,

$$S_e/\phi_e = 0.678/22 = 0.0309,$$

$$\sqrt{(S_e/\phi_e)/n_e} = \sqrt{0.0309/5.4} = 0.0756,$$

$$F_{22}'(0.01) = 7.94, \sqrt{7.94} = 2.82,$$

$$0.01 \text{ の確率の誤差} = \pm 2.82 \times 0.0756 = \pm 0.215$$

配 合	静 摩 擦 係 数 (10℃)					
	m	A	B	計	0.01の誤差	下限値
A_1B_1	1.037	-0.297	-0.147	=0.593	± 0.215	0.378
A_1B_2	1.037	-0.297	+0.073	=0.813	± 0.215	0.598
A_1B_3	1.037	-0.297	+0.073	=0.813	± 0.215	0.598
A_2B_1	1.037	+0.153	-0.147	=1.043	± 0.215	0.828
A_2B_2	1.037	+0.153	+0.073	=1.263	± 0.215	1.048
A_2B_3	1.037	+0.153	+0.073	=1.263	± 0.215	1.048
A_3B_1	1.037	+0.143	-0.147	=1.033	± 0.215	0.818
A_3B_2	1.037	+0.143	+0.073	=1.253	± 0.215	1.038
A_3B_3	1.037	+0.143	+0.073	=1.253	± 0.215	1.038

$$20^\circ\text{C} : m = 1.086, n_e = 5.4, S_e/\phi_e = 1.017/22 = 0.0462,$$

$$\sqrt{(S_e/\phi_e)/n_e} = \sqrt{0.0462/5.4} = 0.0938,$$

$$\sqrt{F_{22}'(0.01)} = \sqrt{7.98} = 2.82,$$

$$0.01 \text{ の誤差} = \pm 2.82 \times 0.0938 = \pm 0.264$$

配 合	静 摩 擦 係 数 (20℃)					
	m	A	B	計	0.01の誤差	下限界
A_1B_1	1.086	-0.236	-0.086	=0.764	± 0.264	0.500
A_1B_2	1.086	-0.236	-0.026	=0.824	± 0.264	0.560
A_1B_3	1.086	-0.236	+0.114	=0.964	± 0.264	0.700
A_2B_1	1.086	+0.114	-0.086	=1.114	± 0.264	0.850
A_2B_2	1.086	+0.114	-0.026	=1.174	± 0.264	0.910
A_2B_3	1.086	+0.114	+0.114	=1.314	± 0.264	1.050
A_3B_1	1.086	+0.124	-0.086	=1.122	± 0.264	0.858
A_3B_2	1.086	+0.124	-0.026	=1.184	± 0.264	0.920
A_3B_3	1.086	+0.124	+0.114	=1.324	± 0.264	1.060

$$30^\circ\text{C} : m = 1.040, n_e = 5.4, S_e/\phi_e = 0.751/22 = 0.0342,$$

$$\sqrt{(S_e/\phi_e)/n_e} = \sqrt{0.0342/5.4} = 0.0796,$$

$$\sqrt{F_{22}'(0.01)} = 2.82,$$

$$0.01 \text{ の誤差} = \pm 28.2 \times 0.0796 = \pm 0.224$$

配 合	摩 擦 係 数 (30℃)					
	m	A	B	計	0.01の誤差	下限値
A_1B_1	1.040	-0.200	-0.120	=0.720	± 0.224	0.496
A_1B_2	1.040	-0.200	+0.010	=0.830	± 0.224	0.606
A_1B_3	1.040	-0.200	+0.110	=0.950	± 0.224	0.726
A_2B_1	1.040	+0.040	-0.120	=0.960	± 0.224	0.736
A_2B_2	1.040	+0.040	+0.010	=1.090	± 0.224	0.866
A_2B_3	1.040	+0.040	+0.110	=1.190	± 0.224	0.966
A_3B_1	1.040	+0.160	-0.120	=1.080	± 0.224	0.856
A_3B_2	1.040	+0.160	+0.010	=1.210	± 0.224	0.986
A_3B_3	1.040	+0.160	+0.110	=1.310	± 0.224	1.086

以上の計算結果、静摩擦係数が各温度を通じて 0.85 以上である配合とその値をとりだすと次のとおりである。

配 合	静 摩 擦 係 数			
	10℃	20℃	30℃	順 位
$A_2(30/40) B_2(10.5)$	1.048	0.910	0.866	4
$A_2(30/40) B_3(12.0)$	1.048	1.050	0.966	2
$A_3(40/60) B_2(10.5)$	1.048	0.920	0.986	3
$A_3(40/60) B_3(12.0)$	1.048	1.060	1.086	1

A_3B_3, A_2B_3, A_2B_2 の順で静摩擦係数は大きい。

b) 動摩擦係数

静摩擦係数の場合と同様に 1% の確率の誤差の範囲での A_P, A_C の因子による動摩擦係数のうち、静摩擦で 0.85 以上あった配合に対応する動摩擦係数値をとりだすと次のとおりである。

配 合	動 摩 擦 係 数			
	10℃	20℃	30℃	順 位
A_2B_2	0.700	0.651	0.668	4
A_2B_3	0.740	0.701	0.728	2
A_3B_2	0.740	0.681	0.698	3
A_3B_3	0.780	0.731	0.758	1

静摩擦係数の場合と同様に A_3B_3 , A_2B_3 , A_3B_2 , A_2B_2 , の順で動摩擦係数は大きい。

c) 強度 ↗

配 合	曲 げ (kg/cm ²)			圧 縮 (kg/cm ²)			せん断 (kg/cm ²)			引 張 (kg/cm ²)			順 位
	10°C	20°C	30°C	10°C	20°C	30°C	10°C	20°C	30°C	10°C	20°C	30°C	
A_2B_2	102.4	43.6	19.8	115.4	52.6	27.6	44.3	23.3	11.5	37.5	19.3	8.6	1
A_2B_3	90.9	37.8	16.3	96.1	48.9	23.3	40.2	19.3	10.9	31.4	15.9	7.1	2
A_3B_2	90.0	32.6	13.4	97.3	45.3	22.3	40.5	18.4	10.8	28.6	12.2	4.8	3
A_3B_3	78.0	28.8	10.7	85.3	37.7	17.6	36.3	16.0	8.4	24.6	10.2	3.9	4

上記の強度のうち、摩擦に関係するものはせん断強度であるが、10 kg/cm² 前後あれば十分であって、海水温度が 25°C 以下 であるのでいずれの配合でも十分である。ただし強度の弱いものはずれひずみが大きくなる。運搬据付作業上では、引張りあるいは曲げ強度が必要であり、施工条件によって必要強度は変わるが、施工温度が 30°C 以上に上昇することを考慮して、強度は高い方が望ましい。また圧縮強度はマットをコンクリート底部にあらかじめ貼り付ける工法においては作業台その他の関係から強い方が望ましいが、この配合の範囲ではいずれも十分であろう。諸強度は全体を通じて、 A_2B_2 , A_2B_3 , A_3B_2 , A_3B_3 の順で大きい。

以上のごとく好ましい配合の摩擦係数の定量的な把握と、その強度について考察した。最も適当な配合のマットは、摩擦係数の値も大きく、強度も強いことであるが、考察の結果は摩擦係数の大きなものは強度が弱いという矛盾した点がある。しかしながら、 $A_2(30/40)B_3(12\%)$ と $A_3(40/60)B_3(12\%)$ の摩擦係数は若干の差はあるが、ほとんど同じ値である。 $A_3(40/60)B_2(10.5\%)$ は A_2B_3 よりも摩擦係数は小さい。そして強度については、すべてについて A_3B_3 , A_3B_2 は A_2B_3 より弱く、特に引張強度については差があって施工上に難点があるので、 A_3B_2 , A_3B_3 の配合のマットは A_2B_3 よりも劣るものである。また A_2B_2 の配合マットは、摩擦係数は他の配合より少し小さいが、実用上十分な値であって、強度は最も大きい。したがって実用上適当なアスファルトマットの配合はアスファルトの針入度—30/40、アスファルトの量—10.5%，および 12.0% である。

以上でアスファルトマットの適当な配合が判明したが、設計に用いる標準的な摩擦係数および諸強度として、測定値は十分に信頼すべきものであるが、製作上または材質上の若干の低下を考慮して、表—10 のように定めることが適当であると考える。

アスファルトマットを構造物に適用する場合、外力に対し滑動しないように設計するから、静摩擦係数を用いればよく、動摩擦係数を考慮する必要はないが、もし外力が設計外力および安全率を越えて加わり、堤体が滑動することがあった場合にも、相当の動摩擦係数があれば

摩擦係数の値から好ましい配合についてのマットの諸強度の測定値の平均値を各強度ごとにまとめると次のとおりである。

表—10 アスファルトマットの適正配合と標準摩擦係数

配 合		静摩擦係 数	動摩擦係 数
A	アスファルトの針入度 30/40 アスファルトの含有量 10.5% {ダスト/アスファルト (D/A)=1.5~2.5 粗骨材含有量 =35~45%}	0.80	0.65
B	アスファルトの針入度 30/40 アスファルトの含有量 12.0% {ダスト/アスファルト (D/A)=1.5~2.5 粗骨材含有量 =34~45%}	0.90	0.70
{ 参考： 30℃ 強度 (kg/cm ²) 曲げ 圧縮 せん断 引張 配合A 18. 25. 10. 7. 配合B 15. 20. 9. 6. }			

滑動量の大きさを制限して被害を最小限に止め得ることを知るために参考までに併記した。また、強度は施工条件によっては、30°C の強度のみわかればよいものではないが、標準値として付記した。また測定値に用いた資料は相当に注意して製作しているので、若干の安全を考慮したが、実際製作のマットの数値は低下するかもしれないので、施工管理を十分行なう必要がある。しかしながら実際のマットは、100 m² 程度の広いものであるもので、局部的に弱いところがあっても全体としての強度（摩擦抵抗力）が発揮されればよいわけで、上表の値は適当な値であると判定される。また載荷時間による抵抗力の増大は対象としていないので、これを考慮すれば上表はきわめて安全側の値である。30°C を標準としているので、温度が 30°C より低い場合は摩擦係数は大きくなる。

4. あとがき

以上の研究によってアスファルトマットを適用した構造物の滑動機構はほとんど明らかにされたと考えられる。アスファルトマットと堤体コンクリート底面の滑動抵抗力について、構造物の対象を上げるためには、さらに広い荷重、温度範囲などについて今後研究をすすめねばならないが、防波堤などの港湾構造物を対象とする限り 2. において究明され、3. で定量的に把握されたもので十分であろう。また、アスファルトの配合について

は、必要な配合因子の分析把握により、適当な配合と標準摩擦係数を選択できたので、この工法の発展が望まれる。しかしながら今後とも研究を重ね条件の異なる構造物に最適のものをきめ細かく究明してゆくことが必要であらう。

このようにアスファルトマットの滑動抵抗力が大きいことが確認され、またこの工法の効果を高めるためには基礎の強度が重要であることから、今後は単に従来形式の構造物の滑動抵抗を増すだけでなく、構造全体の効率を考えた新しいタイプの構造設計が開発される可能性がある。今後の研究に期待したい。

参 考 文 献

- 1) 加川道男：重力式構造物の摩擦抵抗について，海岸工学講演会講演集，土木学会，昭 39.11.
Michio Kagawa : Increase of Sliding Resistance of Gravity-type Breakwaters, by means of an Asphalt mat, Coastal Engineering in Japan, Vol. 8, 1965.
- 2) 曾田範宗 (訳) パウンデン・テイパー：「固体の摩擦と潤滑」，pp. 17~19, pp. 88~93, 丸善，1961.
- 3) Department of Scientific and Industrial Research, Road Research Laboratory : Bituminous Materials in Road Construction, Her Majesty's Stationery Office, London, pp. 89~121, pp. 125~173, 1962.
- 4) 加川・中丸・松尾：アスファルトマットの粘弾性，土木学会年次学術講演会講演概要，IV-99-1，昭和 40 年 5 月.
- 5) 田口玄一：実験計画法（上・下），丸善，1961.

(1971.9.7・受付)