

海岸堤防におけるアスファルト系被覆工 に対する波力の影響について

尾 崎 晃*・菅 原 照 雄*・荊 谷 広 見**

海岸堤防、干拓締切堤などのり面被覆工としてアスファルト系材料が多く用いられるようになった。本研究はこのような被覆工の斜面上における砕波による波圧と、アスファルト系被覆工の強度との関係を解明しようと試みたものである。斜面上における砕波波圧のように載荷時間が非常に短い（瞬間的）場合にはふつう粘弾性体と考えられているアスファルト合材がほとんど弾性体に近い性質を示すことを実験的に確かめ、波による荷重条件とアスファルト合材の特性とに基づいて、波による破壊荷重（すなわち設計波高）を求める方法を考究しようとしたものである。

1. 設計に対する基本的考え方

前記のような構造物の堤体は多くの場合、海底のしゅんせつ土砂または山土などを盛土して作られる。このように築堤したのり面の斜面上に被覆工としてアスファルトマットを敷設し、またはアスファルト舗装を行なった場合に、斜面上に砕ける砕波の波圧は被覆層にどのような応力を生ずるかが設計上の問題となる。荷重が長時間にわたって徐々に増減したり温度が高いような場合にはアスファルト合材は粘弾性体として本領を発揮し容易に破壊には至らないが、荷重が瞬間的であり、かつ低温時においてはアスファルトは弾性体に非常に近くなり、引張り、曲げなどによって破壊する可能性が生ずる。この場合を考慮に入れるならば波力を正確に算定し、弾性体の場合と同様に部材の断面、厚さ等を求めなくてはならない。盛土部分について弾性係数 E_2 を与えることはすでに許容されている考え方であるが、アスファルトの部分に弾性係数 E_1 を与えることができるであろうか。もしこれが許されるならば E_1 , E_2 のそれぞれ異なった弾性係数を有する二層構造の問題として外力による応力を求めることができる。したがってこの研究の主要部分はアスファルトの E_1 (stiffness) に関する問題および斜面上の砕波の波力に関する問題より成っている。

2. 問題点の解明（その実験的手法について）

（1）アスファルト被覆層を弾性体として取扱い得る限界に関する考察

* 正会員 工博 北海道大学工学部

** 日本海上工事（株）

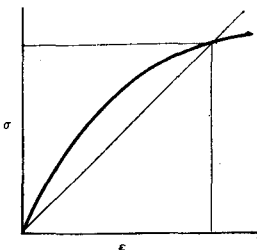
アスファルトおよびアスファルト混合物は明らかに粘弾性体であって長時間載荷によって大きなクリープを生じる。しかし粘弾性体のクリープは a) 載荷時間, b) 温度の関数であって近似的につぎの式で表わされる。

$$\epsilon = \sigma/E_1 + \sigma/Q_1 t + \sigma/E_2 (1 - e^{-t/\lambda r}) \dots\dots\dots (1)$$

式中, σ : 応力, t : 載荷時間, E_1 : マックスウェルモデルの弾性係数, Q_1 および Q_2 : 粘性係数, λr : Q_2/E_2 (遅延時間)

また一方, Q_1 , Q_2 に関しては $\log Q \propto \text{temp.}$ の関係がほぼ直線となる。また E_1 , E_2 と温度との関係も $\log \text{ temp} \propto \log E$ の関係が実用温度の範囲ではほぼ直線に近いと考えて差し支えない。したがって最近では個々の E_1 , E_2 , Q_1 , Q_2 を与えるよりむしろ $\sigma/\epsilon = \text{stiffness}$ として表わす概念がよく用いられる。式(1)からごく短時間の載荷に対してはそれによる変位の大部分は E_1 によって生ずるものであり Q_2 部分が生ずるためにはかなりの長時間（たとえばマットの場合には分単位）を必要とする。したがって 0.1~0.01 秒の単位でかかる荷重については、ほぼ弾性体と考えて弾性係数を与えても差し支えないであろう。また粘性係数の部分が存在する時間で載荷しても図-1 のように $\sigma/\epsilon = E$ (stiffness) と取ることによって理論解における定数を与えることができる。以上述べた考え方はつぎのような実験によって順次裏付けをされて行く。

図-1



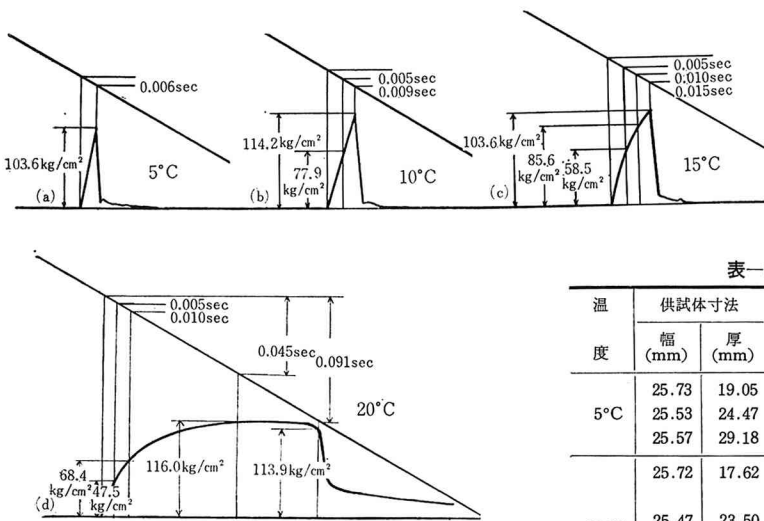
（2）曲げ強さ～時間曲線

一般の弾性体においては弾性率はふつうの載荷速度の範囲では速度にほとんど無関係に一定である。しかしアスファルト合材の場合には(1)に述べたように、載荷時間によって弾性率に相当するものの値が変化する。したがって従来のふつうの試験法を用いたのでは正しい値

表-1 合 材 配 合 表

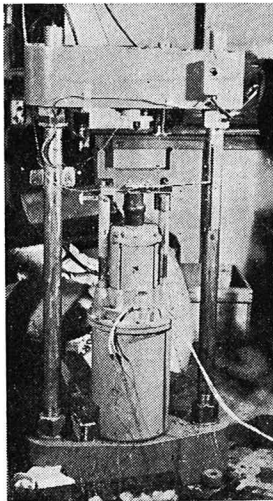
材 料 名	配 合 率
アスファルト (Pen 40, TR & B 60)	12.0%
石 粉 (200 番 Pass 83.0%)	26.0
細 骨 材 (砂+7号)	62.0

図-2 曲げ強さ-時間曲線 (18 mm マット)



を得ることができない。
本実験においては、表-1
に示す配合のアスファ
ルト合材の試験片（それ
ぞれの寸法は表-2 参照
、支間はいずれも 200mm）
に一定速度で変位を与
え、経過時間に対する応
力と変位を同時に得るこ
とができる高速曲げ試験
機（写真参照、速度は最
高 14 cm/sec まで種々に
連続的に発生できる）に
より多数の実験を行なっ
た。結果の一例を図-2
に示す。縦軸は応力、横

写真-1 高速曲げ試験機



軸は時間、斜めの実線は変位を示す。弾性体としての性質
を示す载荷時間の範囲は合材の温度によって異なるが、
10°C の場合には $t=0.009$ 秒、15°C では $t=0.005$ 秒、
までの範囲では応力と変位は一定の比例関係を保ってい
るが、20°C になると $t=0.005$ 秒でも図-2 (c) のよう
に直線比例関係がやや崩れ始める。この実験により碎波
波圧のように瞬間的に力が作用する場合にはその载荷時
間の程度によって弾性体として応力を求めることも可能
であることがわかる。この方法によって各温度における
曲げ強さ、たわみ量、 E_1 を求めた結果を表-2 に示す。

(3) 落水衝撃圧

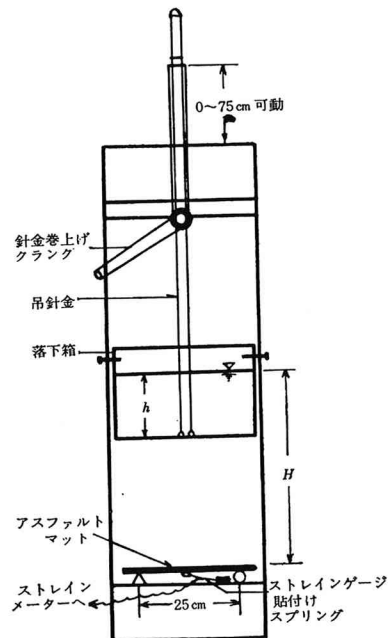
本研究の目的は冒頭に述べたように堤防のり面などの
斜面に波が砕けた場合の波力に対してアスファルト舗装
材の強度を検討することにある。そのためには現在のと
ころ実験的な研究より他には方法がないように考えられ

る。しかし堤防のり面の模型を
アスファルト舗装で作り、そこ
に直接計測器を取り付けて上記
のような精度の高い計測を行な
うことは非常に困難であったの
で、中間的な手段として、以下
に述べるような擬似碎波とでも
いうような方法を用いて、波圧

表-2 高速曲げ試験結果

温 度	供試体寸法		载荷初め よりの時 間 (sec)	たわみ (mm)	曲げ強さ (kg/cm ²)	ステ ィ フ ネ ス (kg/cm ²)
	幅 (mm)	厚 (mm)				
5°C	25.73	19.05	0.006	0.76	103.6	4.77×10^4
	25.53	24.47	0.005	0.65	104.7	4.38×10^4
	25.57	29.18	0.005	0.56	104.8	4.28×10^4
10°C	25.72	17.62	0.005	0.90	77.9	3.27×10^4
			0.009	1.30	114.2	3.32×10^4
	25.47	23.50	0.005	0.36	45.3	3.57×10^4
			0.0095	1.24	87.2	2.47×10^4
	25.52	27.68	0.005	0.67	81.6	2.93×10^4
15°C			0.007	1.15	96.9	2.04×10^4
	25.50	18.43	0.005	0.63	58.5	3.35×10^4
			0.015	2.02	103.6	1.85×10^4
	25.22	24.85	0.005	0.67	77.5	3.10×10^4
			0.018	2.16	116.2	1.45×10^4
20°C	25.55	28.88	0.005	0.76	76.4	2.45×10^4
			0.015	1.84	111.0	1.39×10^4
	25.70	16.65	0.005	0.67	47.5	2.82×10^4
			0.045	5.95	116.0	7.80×10^4
	25.47	23.45	0.005	0.72	44.6	1.76×10^4
			0.061	6.40	115.9	5.15×10^4
	25.42	28.75	0.005	0.90	72.0	1.86×10^4
			0.076	6.18	109.0	4.09×10^3

図-3



によるアスファルト部材のたわみ測定を行なった。この装置の概略は図-3に示すように任意の高さから底開箱内の水を一時に落下させ、その下に2支点によって単純ばり状に置かれているアスファルトの試験体に擬似碎波として作用させる。試験体は幅 150 mm, 支間長 250 mm, 厚さは表-3に示すように 18 mm, 23 mm, 28 mm の各種であった。試験体の裏面中央部にはストレーンゲージを用いたたわみ量測定用のスプリングが下の支台から突出して接触しており、ひずみ計を経てオシログラフに接続されている。底開箱からの落水時の水塊の形状、試験体に作用する波圧の時間的変化、およびその分布状況は別途に高速度カメラと波圧計を用いて観測した。結果の一例を図-4 および図-5 に示す。これらよりわかるように、落下水塊の中央部先端が衝突する中央波圧計

図-4 落水衝撃圧-時間曲線

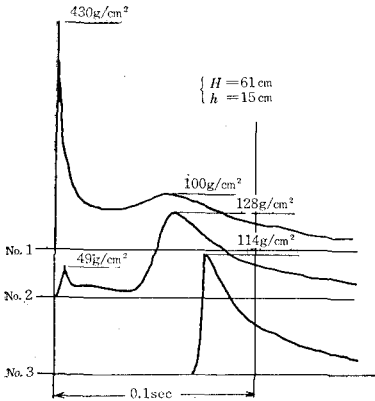
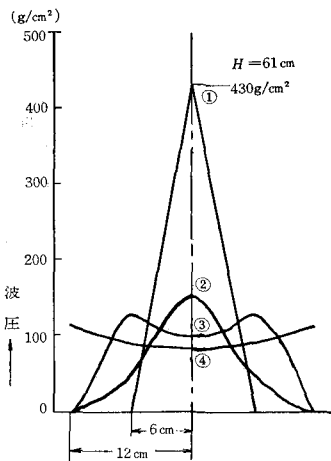


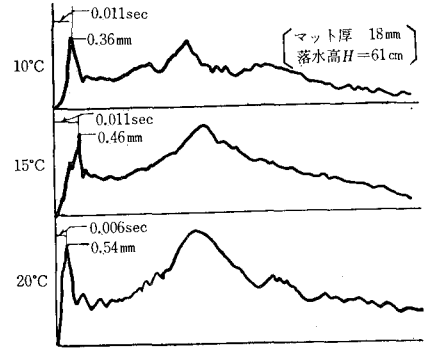
図-5 落水衝撃圧分布図



(No. 1) においては、直立壁に作用する碎波波圧ときわめてよく似た波圧-時間曲線が認められ、そのピークの作用時間は 0.005 秒程度であって、高速曲げ試験機のテストに匹敵しうる数値である。また同じものの同時波圧分布を示すのが図-5 である。波圧が作用

し始めて最初の 0.01 秒あたりまでは図-5 の①のように試験体の中央 1/3 の範囲にほとんど三角形の圧力が作用し、時間の経過とともにやがて両側へ拡大して、②、③、④のように変化する。このように図-3 の装置により発生する衝撃的水圧は実際の碎波による衝撃的波圧と非常

図-6 落水試験におけるマットのたわみ-時間曲線



に良く似た性質を有することを確かめることができた。したがってこの方法によってアスファルト試験体の波圧によるたわみ量を測定することにした。図-6 はその結果の一例である。試験体の厚さは 18 mm, 温度は 10°C, 15°C, 20°C の 3 つの場合の結果を示す。波圧が、試験体にかかり始めると急激にたわみを生じて第 1 のピークに達するが、その時間は図に記入してあるように 0.006 秒~0.01 秒であって、擬似碎波圧における中央の最初のピーク(図-4 の No. 1, 430 g/cm²)の現われている時間と一致している。図-5 の ②, ③...の波圧はその後に現われる第 2, 第 3 のピークに対応するものと考えられる。そして荷重が除かれるとたわみは回復する。すなわち初期たわみは波圧の初期ピークだけに影響されていることがわかったので、アスファルト試験体の初期たわみ量と、波圧の初期の三角荷重とから E_1 (スティフネス) を求めた。これらの測定結果を表-3 に示す。高速曲げ試験機による実験の結果より得られた表-2 の E_1 の値と比較してみると良く一致している。これらの事実より、きわめて短い時間に作用する碎波のピークの波圧を受けた場合のアスファルト舗装材に生ずる応力は弾性体として考えてもよいことがわかる。載荷時間が長くなれば、粘性項の影響が現われてきて、安全側になる。

表-3 落下試験によるマットのたわみとスティフネス

温度	マット厚 (mm)	マットのたわみ $H=61$ cm		マットのたわみ $H=71$ cm		落水-たわみよりのスティフネス	
		実験値 (mm)	計算値 (mm)	実験値 (mm)	計算値 (mm)	$H=61$ cm	$H=71$ cm
						(kg/cm²)	(kg/cm²)
10°C	18	0.39	0.37	0.47	0.51	3.44×10^4	3.94×10^4
	23	0.27	0.22	0.31	0.30	2.89×10^4	3.48×10^4
	28	0.18	0.11	0.20	0.15	1.96×10^4	2.29×10^4
15°C	18	0.41	0.46	0.55	0.63	3.16×10^4	3.19×10^4
	23	0.30	0.26	0.32	0.30	2.49×10^4	3.23×10^4
	28	0.21	0.12	0.23	0.17	1.65×10^4	2.08×10^4
20°C	18	0.51	0.49	0.66	0.67	2.60×10^4	2.85×10^4
	23	0.37	0.32	0.36	0.44	2.30×10^4	3.06×10^4
	28	0.22	0.20	0.34	0.28	1.58×10^4	1.39×10^4

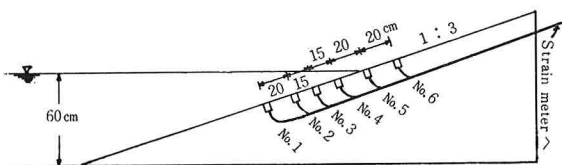
H: 図-3 参照

(4) 斜面上における碎波波圧

直立壁面に作用する碎波波圧に関してはすでに多数の

図-7 傾斜面における波圧計位置図

(a)



(b)

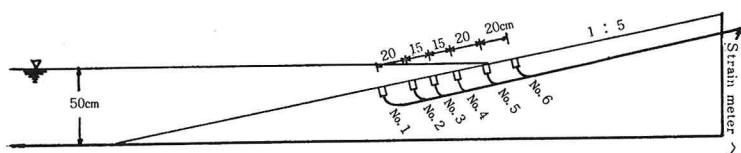


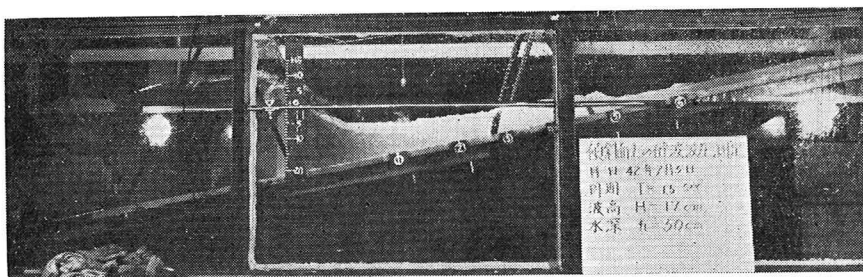
表-4 実験波の諸元

勾配	水深 h_0 (cm)	周期 T (sec)	波高 H (cm)	波長 L (cm)	波形勾配 H/L
1:3	60	1.35	18.3	256	0.073
		1.61	19.3	329	0.059
		1.89	19.4	407	0.048
1:5	50	1.20	17.3	205	0.085
		1.50	17.5	283	0.062
		1.70	17.8	332	0.054

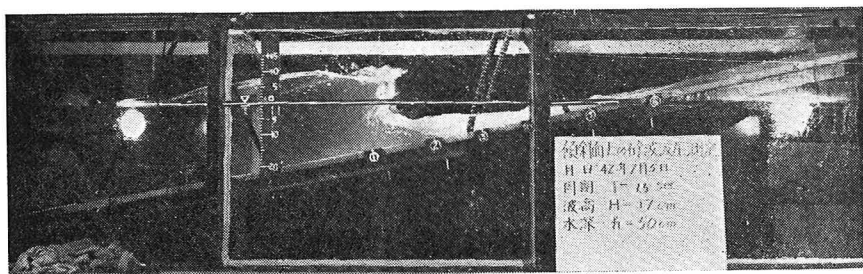
研究が発表されているが、斜面上に碎ける砕波の場合についてはまだ十分な資料が得られないので、この研究の目的上必要なためつぎのような実験を行なった。斜面勾

写真-2

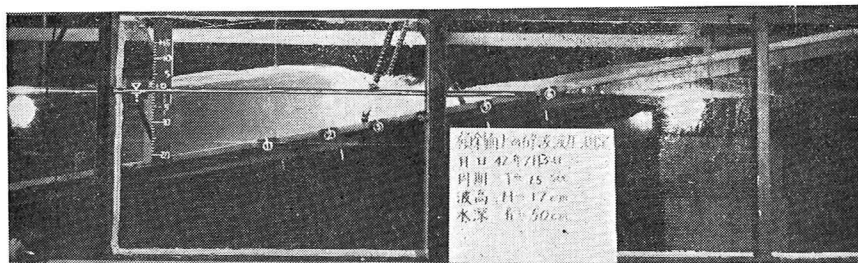
(a)



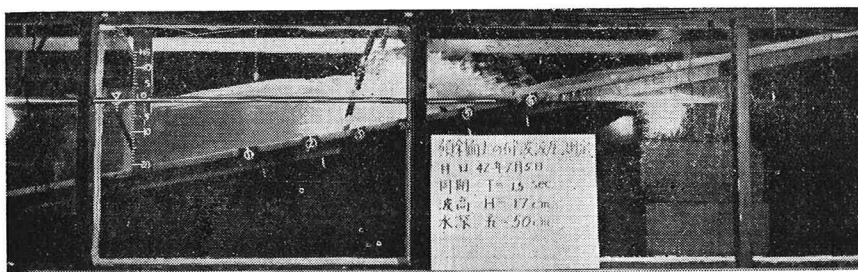
(b)



(c)



(d)



配は1:3および1:5とし、1:3勾配の方は全長22mの造波水路内に設け、斜面ののり先水深は60cmで、1/20の海底勾配に接続している。1:5勾配の斜面は全長16mの造波水路内に設け、斜面ののり先水深は50cmで、海底勾配は水平である。実験は表-4のような条件で、砕波波圧の測定を行なった。斜面は木製で作成り、図-7(a),(b)に示すように幅の中心線上に波圧計(共和電業製 PHW-1G, 2G)を6個取付けた。実験結果について以下に記す。

図-8はこのような装置による実験の一例で、オシログラフの記録をそのまま示したものである。図-9から図-16までは各実験ごとの同様なデータから砕波の波

図-8 傾斜面上における波圧-時間曲線

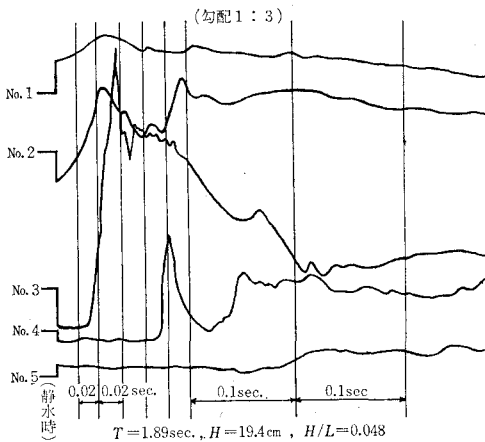


図-9 傾斜面上における最大同時波圧分布

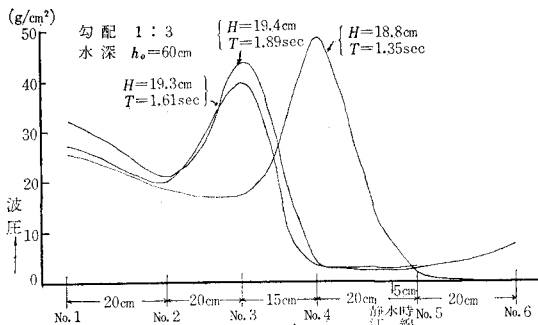
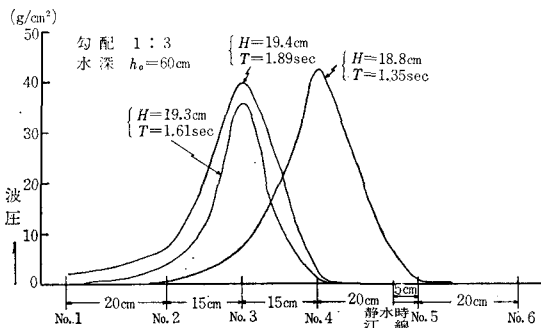


図-10 傾斜面上における衝撃波圧分布



圧分布を求めたものであるが、図-9、図-11、図-13、図-15の表わし方は砕波波圧がかかる前の静水圧も含めて考えた場合であって、ここでは仮りに最大同時波圧分布と呼ぶことにする。図-10、図-12、図-14、図-

図-11 傾斜面上における最大同時波圧分布

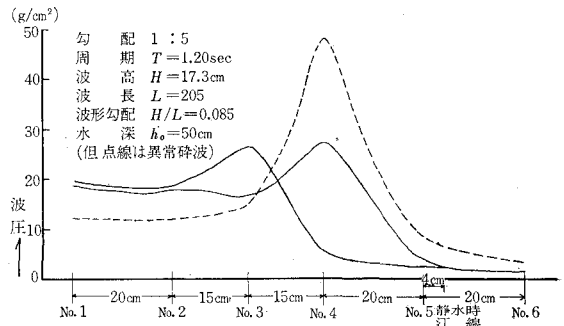


図-12 傾斜面上における衝撃波圧分布

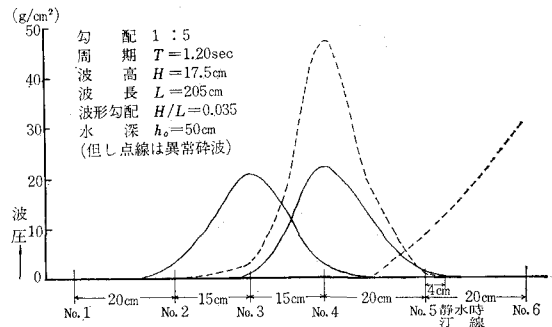


図-13 傾斜面上における最大同時波圧分布

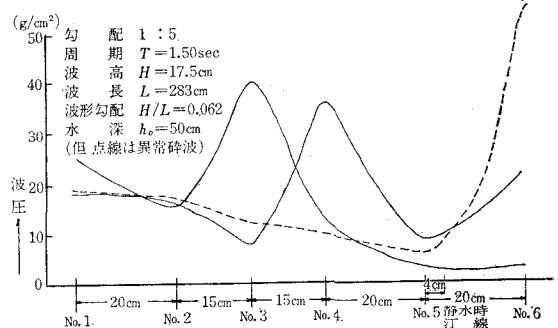


図-14 傾斜面上における衝撃波圧分布

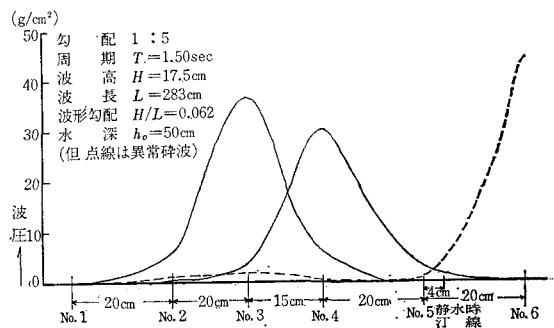


図-15 斜面上における最大同時波圧分布

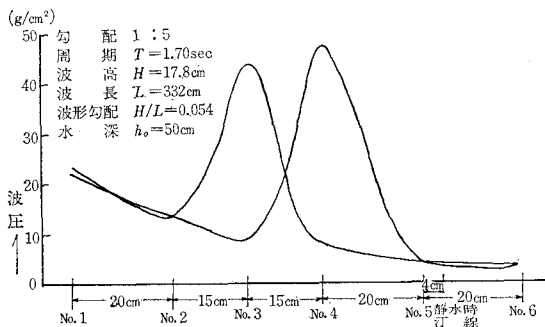
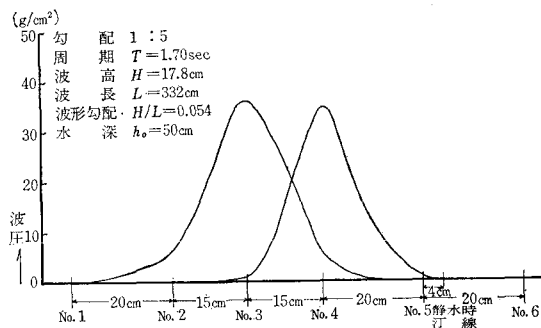


図-16 斜面上における衝撃波圧分布



16の表わし方は斜面上における最大波圧 $p_{\max}$ (たとえば波圧計 No. 3 または No. 4 に多く現われる) が出現したときの、 $p_{\max}$ の波圧曲線が立上り始める瞬間の各ゲージにおける水压を基準として測った $p_{\max}$ の時点における同時波圧分布を示したものである。これをいま仮りに衝撃波圧分布と呼ぶことにする。アスファルト合材による舗装の弾性率 (ここではスティフネス) が問題になるような場合はこの後者を用いるのが妥当であると考えられる。直立面上における砕波の場合には波圧がかかる前は壁面上の圧力分布は至る所大気圧であるが、斜面の場合はその勾配に応じて、各測点にはすでに静水压が作用しているため、純粋に衝撃的波圧だけを分離して考える必要が生じた。衝撃的波圧分布は近似的にはいわゆる最大同時波圧分布から静水時の各測点における静水压を減じたものにほぼ等しい。図からわかるようにこれらの分布形は直立壁における砕波の波圧分布ときわめてよく似た形状を示している。

実験はまだ数が少なく、斜面勾配もわずかに2通りだけであるので、これらのデータだけでは傾向も十分にはわからない。しかしここに見られる限りにおいては斜面勾配の緩な場合の方が砕波が不規則になりやすく、したがってその波圧も平均的な値のほかに、まれにはあるが異常に大きな値を示すものが現われる。またその位置も一定していないようである。これらの点については今後くわしい実験を重ねる必要があるが、現在の目的はアスファルト被覆に生ずる応力の検討にあるので、

一応以上の結果を取入れて、つぎの節に述べるような計算を行なってみた。

(5) のり面被覆工設計への応用

以上述べたように斜面上における砕波波圧を実験的に求めることができたが、つぎにこの値を用いてアスファルト合材によるのり面舗装に生じる応力の検討を行なってみる。いま一例として勾配 1:3 の斜面の場合の図-10の波圧を用いて計算する。いま上記の実験結果を縮尺 1/10 の模型によるものと仮定すると、フルード相似法則によって換算して最大波圧 $p_{\max}=450 \text{ g/cm}^2 (4.5 \text{ t/m}^2)$ となる。分布形より考えて近似的に三角形分布とすればピークの圧力が 4.5 t/m^2 、底辺の分布幅 5 m となる。した

図-17 二層構造における荷重変換図

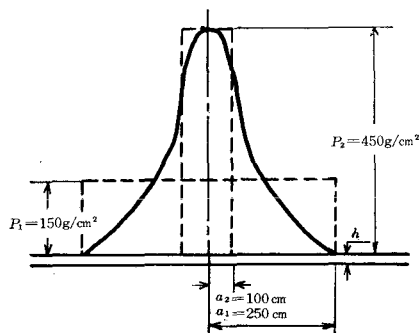


表-5 落水試験よりの E_1

マット厚 Temp	18 (mm)	23 (mm)	28 (mm)
10°C	3.69×10^4	3.21×10^4	2.13×10^4
15°C	3.18×10^4	2.86×10^4	1.87×10^4
20°C	2.68×10^4	2.68×10^4	1.49×10^4

がって以下に示す計算によって、二層構造として検討する。弾性率の異なる二層構造への波力による応力と変形についての解は、波圧が長方形荷重として計算されるべきであるが、円形荷重と考えて計算してもさほど大きな影響はないと思われるので、等置換算法を用いて一層問題におきかえ、図-10のごとく半径 a_1 、 a_2 の2つの円形等分布荷重に変換して計算を行なった。軸上の半径方向の応力は式(2)により、また沈下量は式(3)より求めた。この式における E_1 の値を決定することが、本論文の前半におけるテーマであった。したがって E_1 には表-5の数値を用い、 E_2 には従来よりふつうに用いられている表-6の値を採用した。

表-6 下盤の E_2

下盤の状態	E_2 (kg/cm ²)
ヘドロ, 最悪の Clay	200
弱い Clay	350
強い Clay, 湿った砂	700
砂	2000
路盤	5000

$$\sigma_{ri} = \sigma_{ti} = \frac{p_i}{2} \left\{ 2 - \frac{3Z}{(a_i^2 + Z^2)^{1/2}} + \frac{Z^3}{(a_i^2 + Z^2)^{3/2}} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

表-7 σ_r と Δ の計算値

マット厚 (mm)	温度 (°C)	$E_2=700 \text{ kg/cm}^2$ の と き			$E_2=2\,000 \text{ kg/cm}^2$ の と き		
		E_1/E_2	σ_r (g/cm ²)	Δ (mm)	E_1/E_2	σ_r (g/cm ²)	Δ (mm)
18	10	52.7	566.7	1.765	18.5	576.5	0.6183
	15	45.4	568.2	1.765	15.9	578.1	0.6183
	20	39.3	569.7	1.765	13.8	578.7	0.6184
23	10	45.9	561.1	1.764	16.1	572.6	0.6182
	15	40.8	562.6	1.764	14.3	573.6	0.6182
	20	38.3	563.4	1.764	13.4	574.1	0.6182
28	10	30.4	558.2	1.764	10.6	570.6	0.6181
	15	26.7	560.1	1.764	9.4	571.8	0.6182
	20	21.3	563.1	1.764	7.5	573.9	0.6182

$Z=h_i \sqrt[3]{E_1/E_2}$

$$\Delta_i = \frac{1.5 p_i a_i}{E_2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_i}{a_i}\right)^2 \cdot \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{2/3}}} \dots (3)$$

軸上の半径方向の応力 $\Sigma \sigma_r = \sigma_{r_1} + \sigma_{r_2}$ と、沈下量 $\Sigma \Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ は表-7 に示した。

以上の結果より材料の強さは計算より求められる応力 σ_r によって、舗装が破壊されることは起こり得ないことがわかる。二層構造の場合、アスファルト系被覆（たとえばアスファルトマットなども含む）については波圧（特に砕波の衝撃的波圧）による応力の検討はほとんど不必要であるという結論に達した。

最後に、以上の研究に際し多数の実験観測を行ない、また資料整理、計算を担当された土木工学科学生（当時）大久保清邦、戸沼昭平および日本海上工事（株）松崎勝夫の諸氏に深甚なる謝意を表します。