

北海道大学工学部 正員 工博 尾崎 晃
 企 正員 工博 菅原 照雄
 昭和化工株式会社 荻谷 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碎波による波圧と、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。斜面上における碎波波圧のように載荷時間が非常に短い(瞬時的)場合にはふつ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、海底の浚渫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、斜面上に碎ける碎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、荷重が瞬時的であり、且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 を与えることは既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、及び斜面上の碎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; 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) 温度の函数であって近似的に次の式で表わされる。

$$\varepsilon = \sigma/E_{1s} + \sigma Q_1 t + \sigma/E_{2s} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \dots \dots (1)$$

式中、 σ : 応力、 t : 載荷時間、 E_{1s} : マクスウェルモデルの弾性係数、 E_{2s} : フォットモデルの弾性係数

Q_1 および Q_2 : 粘性係数、 λ : Q_2/E_{2s} (遅延時間)

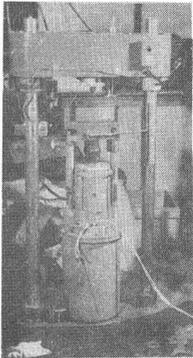
また一方、 Q_1 、 Q_2 に関しては $\log Q \propto \text{temp.}$ の関係がほぼ直線となる。また E_{1s} 、 E_{2s} と温度との関係も $\log \text{temp.} \propto \log E$ の関係が実用温度の範囲ではほぼ直線に近いと考えて差支えない。したがって最近では個々の E_{1s} 、 E_{2s} 、 Q_1 、 Q_2 を与えるよりもむしろ $\sigma/E = \text{Stiffness}$ として表わす概念がよく用いられる。(1)式から、ごく短時間の載荷に対してはそれによる変位の大部分は E_{1s} によって生ずるものであり 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Eを与えても差支えないであろう。また粘性係数の部分が存在する時間で載荷しても右の図のように $\sigma/\epsilon = E(\text{Stiffness}) \dots (2)$ と取ることによって理論解における常数を与えることができる。以上に述べた考え方は次のような実験によって順次裏付けをされて行く。

(2) 曲げ強さ～時間曲線(表-1)に示す配合のアスファルト合材の試験片に一定

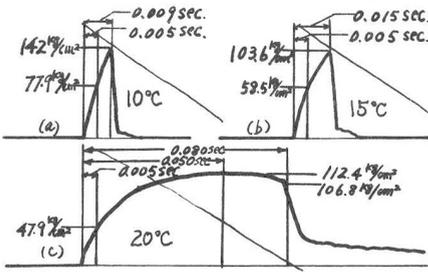
表-1. 合材配合表

材料名	配合率
アスファルト {Pen 40 Res 60}	12.0%
石粉 (200 Mesh Pass)	26.0%
細骨材 (砂+7号)	62.0%



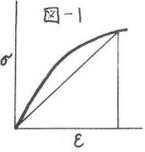
高速曲げ試験機

図-2. 曲げ強さ～時間曲線 (18mmマット)



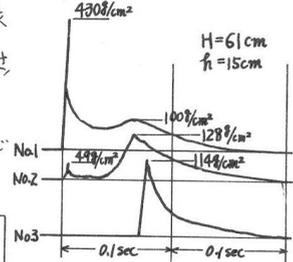
速度で変位を与

え、経過時間に対する応力と変位を同時に得ることが出来る高速曲げ試験機により(速度は最高14cm/secまで種々に発生できる)多数の実験を行った。結果の一例を図-2に示す。弾性体としての性質を示す載荷時間の範囲は



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ち、20°Cになると、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

図-4 落水衝撃圧-時間曲線



れる争も可能である争がわかる。この方法によって各温度における曲げ強さ、Eを求めた結果を表-2に示す。

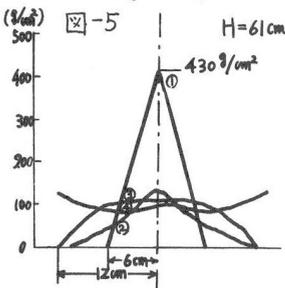
(3) 落水衝撃圧; 本研究の目標は冒頭に述べたように堤防のり面など

の斜面に碎波したときの波力に対する舗装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によって調べるのが最も適当な方法である。しかし堤防のり面の模型をアスファルト舗装で作し、其処に直接計器を取付けて上記のような

表-2. 高速曲げ試験結果

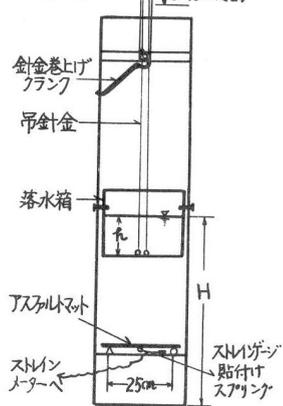
温度	供試体寸法	載荷初め	撓み	曲げ強さ	スプレッド		
(°C)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/cm²)	(kg/cm²)		
5°C	25.73	19.05	0.006	0.76	103.6	4.77×10⁴	
	25.53	24.47	0.005	0.65	104.7	4.38×10⁴	
	25.57	29.18	0.005	0.56	104.8	4.28×10⁴	
10°C	25.72	17.62	0.005	0.90	77.9	3.27×10⁴	
			0.009	1.30	114.2	3.32×10⁴	
	25.47	23.50	0.005	0.36	45.3	3.57×10⁴	
15°C	25.52	27.68	0.005	1.24	87.2	2.47×10⁴	
			0.005	0.67	81.6	2.93×10⁴	
			0.007	1.15	96.9	2.04×10⁴	
20°C	25.50	18.43	0.005	0.63	58.5	3.35×10⁴	
			0.015	2.02	103.6	1.85×10⁴	
	25.22	24.85	0.005	0.67	77.5	3.10×10⁴	
20°C	25.55	28.88	0.005	0.18	2.16	1.45×10⁴	
			0.005	0.76	76.4	2.46×10⁴	
			0.015	1.84	111.0	1.29×10⁴	
20°C	25.70	16.65	0.005	0.67	47.5	2.82×10⁴	
			0.045	5.95	116.0	7.80×10⁴	
	25.47	23.45	0.005	0.72	44.6	1.76×10⁴	
20°C	25.42	28.75	0.005	0.61	6.40	115.9	5.15×10⁴
			0.005	0.90	72.0	1.86×10⁴	
			0.076	6.18	109.0	4.09×10⁴	

落水衝撃圧分布図



精度の高い計測を行う事は非常に困難であったので、中間的な手段として以下のような

図-3



擬似砕波とでも云うべき方法を用いて、波圧によるアスファルトの撓み測定を行った。装置の概略は図-3に示すように任意の高さから底箱内の水を一時に落下させ、その下に2支点によって支持されたアスファルトの試験体に擬似砕波として作用させる。試験体の裏面中央部にはストレインゲージを用いた撓み量測定用のスプリングが接触しており、歪計を経てオシログラフに接続されている。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变化、および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、図-5に示す。これらよりわかるように落水水の中、中央部が衝突する中央波圧計(Na.1)においては直立壁に作用する砕波圧と極めてよく似た波圧~時間曲線が認められ、そのピークの作用時間は0.005秒の程度であつて、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部の範囲にはほとんど三角形の圧力が作用し、時間の経過と共にやがて両側へ拡大して②③④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圧は実際の砕波による衝撃波と非常によく似た性質を持つことを確かめることが出来た。したがつてこの方法によってアスファルト試験体の波圧による撓み量を測定した。図-6はその結果の一つであつて、マット厚は18mm、温度は10℃、15℃、20℃の3つの場合の結果を示す。波圧がマットにかかり始めると急激に撓みを生じ、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~0.011秒であつて擬似砕波圧における中央の最初のピーク(図-4のNa.1, 4308/cm²)の現われている時間と一致している。図-5の②③④の波圧はそのあとに現われる第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撓みは回復する。すなわち初期撓みは波圧の初期ピークだけに影響されている事が判つたので、マットの初期撓み量と波圧の初期の三角荷重とからE(スチーフネス)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テストの結果より得られた表-2のEの値と比較してみると良く一致している。これより極めて短い時間作用する砕波のピークの波圧を受けた場合のアスファルトマットに生ずる応力は弾性体として考えることができる。載荷時間が長くなれば粘性項の影響が現われ始めて安全側になる。

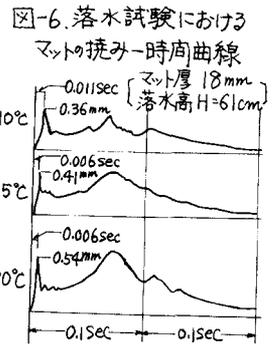


図-6. 落水試験における
マットの撓み-時間曲線

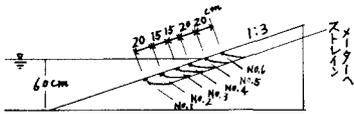
表-3. 落水試験によるマットの撓みとスチーフネス

温度	マット厚 (mm)	マットの撓み H=61		マットの撓み H=71		落水撓み H=61cm		落水撓み H=71cm	
		実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
10℃	18	0.39	0.37	0.47	0.51	3.44×10 ⁴	3.94×10 ⁴	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	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	1.96×10 ⁴	2.29×10 ⁴
15℃	18	0.41	0.46	0.55	0.63	3.16×10 ⁴	3.19×10 ⁴	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	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	1.65×10 ⁴	2.08×10 ⁴
20℃	18	0.51	0.49	0.66	0.67	2.60×10 ⁴	2.85×10 ⁴	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	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	1.58×10 ⁴	1.39×10 ⁴

但し、H=61は落水高 (cm)

(4) 斜面上における砕波波圧; 直立壁面に作用する砕波に関しては多数の研究が発表されているが、斜面上に砕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次のような実験を行なった。斜面勾配は1:3の一通りだけとし1/20の海底勾配に接続させた。模型縮尺は1/10と定めた。斜面ののり先水深は $h_m = 60\text{cm}$ ($h_p = 6.0\text{m}$)とした。実験水槽は長さ22.0m、幅1.0m、深さ1.0mであった。斜面の中心線上に図-7のように6個の波圧計を取りつけた。実験に用いた波の諸元は表-4のとおりである。図-8はこのような装置による実験結果の一例であつて、

図-7 傾斜堤における波圧計位置図



波圧分布であって、 $T=1.35$ 秒、および $T=1.89$ 秒の場合を示す。これより傾斜面における碎波の最大同時波圧分布も直立壁の場合と同様に近似的には三角形分布として考えてよいことがわかった。

(5) のり面被覆工設計への応用; 実物のり面にかかる波圧を求めるには、上記の実験結果が縮尺 $1/10$ の模型により得られたものであるのでフルード相似律によって換算し、最大波圧を 450g/cm^2 の三角形分布の底辺を 500cm として下に示す計算によって二層構造として検討すると、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、波圧が矩形荷重として計算すべきであるが、円形荷重として計算してもさして大きな影響はないと思われるので等置換算法を用い一層問題にお

きかえ図-10の如く半径 a_1, a_2 の2つの円形の等分布荷重に変換し計算を行った。軸上の半径方向の応力は(2)式より、沈下量は(3)式より求めた。E₁は表-5、E₂は表-6のものを使用した。

$$\sigma_r = \sigma_{tc} = \frac{P}{z} \left\{ 2 - \frac{3z}{(a_1^2 + z^2)^{3/2}} + \frac{z^3}{(a_2^2 + z^2)^{3/2}} \right\}, \dots (2)$$

$$\Delta_i = \frac{1.5 P_i a_i}{E_2} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a_i}{z}\right)^2} \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1/3}}, \dots (3)$$

軸上の半径方向の応力 $\Sigma \sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2}$ 、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、計算より生ずる応力 σ_r によって盤(アスファルトマット)が破壊するという事柄はあり得ない事である。二層構造の場合アスファルトマットについては、波圧による応力の検討は殆んど不必要であるという結論に達した。終りに本研究遂行に当り非常に多数の実験ならびに資料の解析整理に努力を払われた学生大久保清邦、戸沼昭平および昭和ヒエキ.K.K.の松崎勝夫の諸氏に深甚なる謝意を表す。

図-7に示す各測点における波圧と時間の関係を示す。図-9は図-8から求めた最大同時

図-8. 傾斜堤における波圧-時間曲線

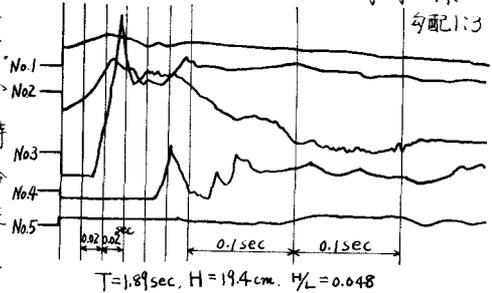


図-9 傾斜堤における波圧分布

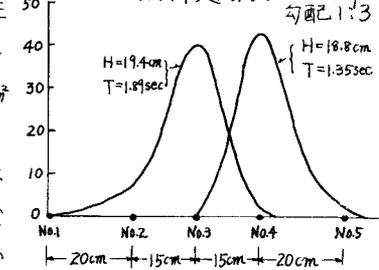


表-4. 実験波の諸元

周期 (sec)	波高 H (cm)	波長 L (cm)	H/L
1.35	18.8	256	0.073
1.61	19.3	329	0.059
1.89	19.4	407	0.048

表-6. 下盤のE₂

下盤の状態	E ₂ (kg/cm²)
入口、最奥のClay	200
弱いClay	350
強いClay (湿潤)	700
砂	2,000
路盤	5,000

図-10. 2層構造における荷重変換

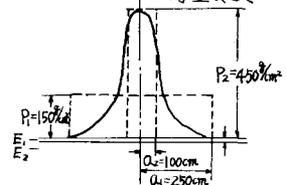


表-5. 落水試験用のE₁

径 (mm)	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

表-7. σ_r と Δ の計算値

マツ厚 (mm)	温度 (°C)	E ₂ = 700 kg/cm² のとき			E ₂ = 2000 kg/cm² のとき		
		E ₁ /E ₂	σ_r (kg/cm²)	Δ (mm)	E ₁ /E ₂	σ_r (kg/cm²)	Δ (mm)
18 mm	10°C	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 mm	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 mm	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