

1、緒言 土石流対策施設の代表である土石流捕捉工の中で透過型ダムは、土石流発生まで貯砂容量を確保することから期待されている。透過型ダムは部材の量が少なくなることから靱性のある鋼管の使用が増加すると考えられる。すでに鋼製砂防施設の設計方法は一応まとめられているが¹⁾、鋼管の衝撃エネルギー吸収能については十分研究できているわけではない。著者らは鋼管に対する衝撃載荷試験とその解析を行っているが²⁾、今回は破壊限界より大きな力を加えて耐力、変形エネルギー吸収能を調べ解析モデルを提案する。

2、実験の種類 衝撃曲げ破壊実験を主体として、支持条件（単純梁、片持ち梁）、鋼管径（48.6，60.5，89.1mm）の相違および衝撃載荷速度（落下高さ）が鋼管の限界性能に及ぼす影響について検討した。また、比較のため静的載荷実験を行った。

3、静的実験と結果 静的載荷実験は衝撃実験と同じ支持条件、管径についてアムスラー型試験装置によって行った。単純梁はスパン中央に、また片持ち梁は固定部から90cmへの集中載荷とした。鋼管のスパン長は100cmで、平均載荷速度は100kgf/分とした。

表-1に試験体の諸元を示す。荷重と変位を測定した。管径が大きくなると弾性時剛性、比例限度荷重および最大荷重が増大する。鋼管梁の終局状態を降伏後最大荷重に達し、それ以降荷重が低下して最大荷重の80%になった時点と定める。鋼管径が増大するとともに終局変位は減少する。実験によって得られた荷重～変位関係において終局状態に至るまでの面積を算定し静的エネルギー吸収能とした（図-1）。管径が増すと静的エネルギー吸収能は増加する。

4、衝撃実験と結果 落下高を0.8～3.0mの間で3種類変化させ、150kgfの重錘を静的実験と同じ点に衝突させ、衝撃荷重、変位、ひずみ、加速度を計測した。図-2に荷重と変位の測定例を示す。また荷重～変位曲線の例を静的実験と比較して図-3に示す。衝撃吸収エネルギーは、本来梁の荷重と梁変形から求めるべきであるが、ここでは接触点の荷重と梁の変位から推定する。図-4、5がその結果である。片持ち梁では管径が大きくなると

表-1 試験体の諸元

品名：一般構造用炭素鋼管
規格：JIS G3444 STK41
管径：φ48.6mm, φ60.5mm, φ89.1mm

	φ48.6	φ60.5	φ89.1
鋼管の厚さ (mm)	3.2	3.2	3.2
降伏点 (kgf/cm ²)	4000	3800	3900
引張強さ (kgf/cm ²)	4800	4700	4600
伸び (%)	46	51	28
断面積 A (cm ²)	4.56	5.76	8.64
断面二次モーメント I (cm ⁴)	11.8	23.7	79.8
慣性断面係数 Z (cm ³)	6.6	10.6	23.7
単位重量 (kg/cm ³)	3.58	4.52	6.77

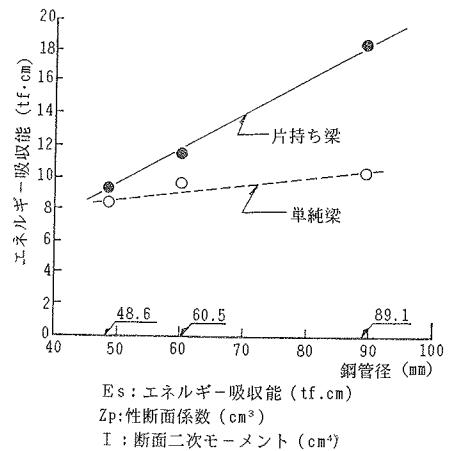


図-1 管径と静的エネルギー吸収能

衝撃吸収エネルギーは増加し、ほぼ静的実験に近い値となっているが、単純梁ではφ89.1mmの値が極端に小さくなっている。この実験結果だけでは断言できないが、単純梁では局部変形と全体変形の発生場所が一致しており、局部変形による断面減少の結果衝撃吸収エネルギーが小さくなったことも考えられる。

5、考察

(1) 衝撃応答計算モデル 第1波のシャープな波形を説明するために先のモデル²⁾を以下のように改良する。

$$Y_2 - Y_1 \geq 0 \text{ のとき } Y_2 = -\frac{K_2}{M_2}(Y_2 - Y_1) - \frac{D_2}{M_2}(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) + \frac{K_1}{M_1}(Y_2 - Y_1) + \frac{D_1}{M_1}(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) \dots (1)$$

$$Y_2 - Y_1 < 0 \text{ のとき } Y_1 = -\frac{K_1}{M_1}Y_1 - \frac{D_1}{M_1}\dot{Y}_1, Y = 9.8 \text{ m/s}^2 \dots (2)$$

$$\rho < \sigma_y \text{ なら } K_1 = \frac{48EI}{L^3} \dots (3)$$

$$\sigma \geq \sigma_y \text{ では } K_1, Y_1 = \frac{4Z}{L}\sigma_y \dots (4) \quad K_2 = \frac{1}{4}\alpha\sigma_y t^2 D^{-1/2}(Y_2 - Y_1)^{-1/2} \dots (5)$$

このモデルによる T~F₂, F₁ を図-6 に示す。また荷重速度による T~F₂ 曲線を図-7 に示す。これらの結果は実験結果の傾向とよく一致している。(表-2)

(2) 衝撃曲げエネルギー-吸収能 E_D E_D は梁が曲げ変形を起こし破壊するまでの仕事量で定義される

$$E_D = \sum F_1 \delta_1 \dots (6)$$

ここで、F₁: 梁のバネ力、δ: 梁のたわみである。本実験で測定しているのは、δ₁ と接触点の力 F₂ であるがシミュレーション結果(図-8)では ΣF₁ δ₁ と ΣF₂ δ₁ の差は2~8%程度であるので図-4 5は梁の衝撃エネルギー-吸収能と考えてよい。

(3) 衝撃曲げ破壊クライテリア E_{DC} 破壊クライテリアとして衝撃曲げエネルギー-吸収能 E_{DC} と用いる。単純梁のφ89.1mmを除けば E_{DC} はほぼ静的エネルギー-吸収能に等しいとして求める事ができる便利さがある。E_D ≒ E_S とすると、

$$\text{単純梁では、} E_{DE} = 0.57 \frac{Z_p^2}{I} + 6.30$$

$$\text{片持ち梁では、} E_{DC} = 2.75 \frac{Z_p^2}{I} - 1.00 \text{ となる。}$$

ここで、E_{DC}: 衝撃吸収エネルギー (tf·cm), Z_p: 塑性断面係数 (cm³), I: 断面2次モーメント (cm⁴)

(4) 鋼管梁の耐衝撃曲げ設計法 鋼管梁に土石流中の巨礫が衝突する場合、巨礫の持つ運動エネルギー

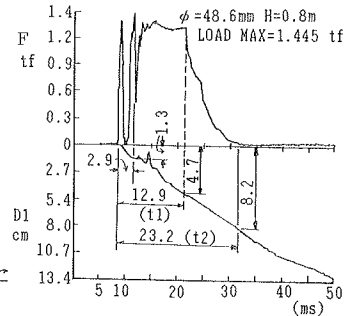


図-2 T~F, T~δの例

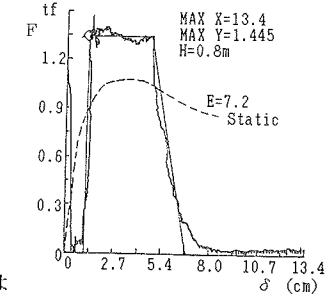


図-3 F~δの例 (φ48.6mm)

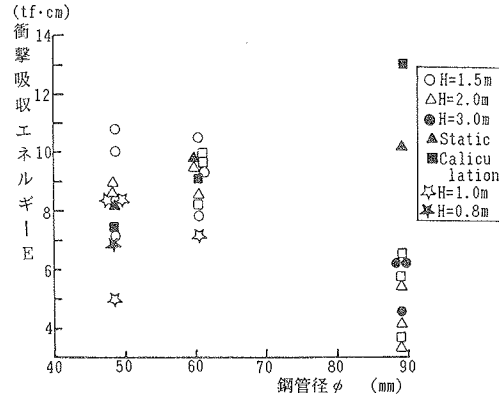


図-4 衝撃吸収エネルギー (単純梁)

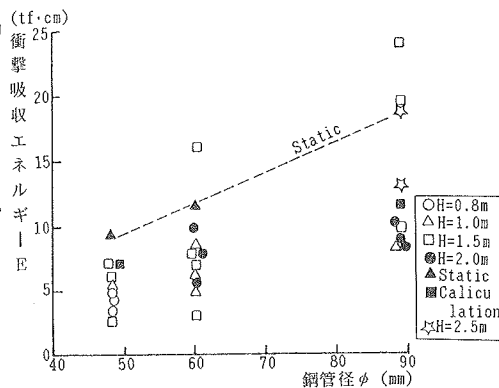


図-5 衝撃吸収エネルギー (片持ち梁)

ギ-は図-9に示すように、梁の衝撃曲げ吸収エネルギー E_D (本実験で検討したもの)、梁の局部吸収エネルギー E_{DL} およびその他のエネルギー吸収 E_0 に変換される。 E_{DL} をシミュレーション結果(図-10)より $E_{DL} = F_2 \cdot (Y_2 - Y_1)$ として求めると表-3のような結果となる。 E_{DL} は管径に比べて管厚が薄い場合は E_D に対して相当の割合を占めることになり無視できなくなる。 E_{DL} は実験によって求めることもできる²⁾。

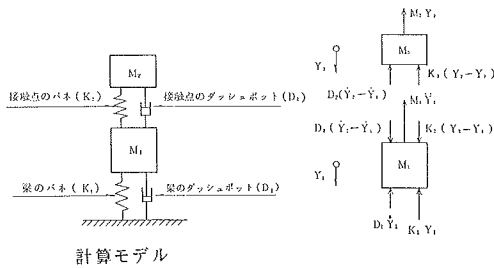


表-2 実験値と計算値の比較

別荘ID	実験結果				シミュレーション結果			
	CASE No.	落下高 H (m)	ピーク荷重 F max (tonf)	ピーク荷重までの経過時間 T0 (msec)	落下高 H (m)	ピーク荷重 F max (tonf)	ピーク荷重までの経過時間 T0 (msec)	ピーク荷重時の変位 F (cm)
48.6	2	1.0	1.75	0.6	-	-	-	-
	4	1.0	1.30	0.5	-	-	-	-
	9	1.0	1.69	0.8	-	-	-	-
	平均	-	1.60	0.6	-	-	-	-
60.5	1	1.5	2.18	0.5	-	-	-	-
	4	1.5	2.05	0.5	-	-	-	-
	7	1.5	2.07	0.6	-	-	-	-
	平均	-	2.10	0.6	-	-	-	-
80.1	1	2.0	2.85	3.7	0.9	-	-	-
	4	2.0	2.15	3.3	1.1	-	-	-
	7	2.0	2.72	3.8	2.2	2.0 (6.3)	2.75	5.2
	平均	-	2.57	3.0	1.4	-	-	-

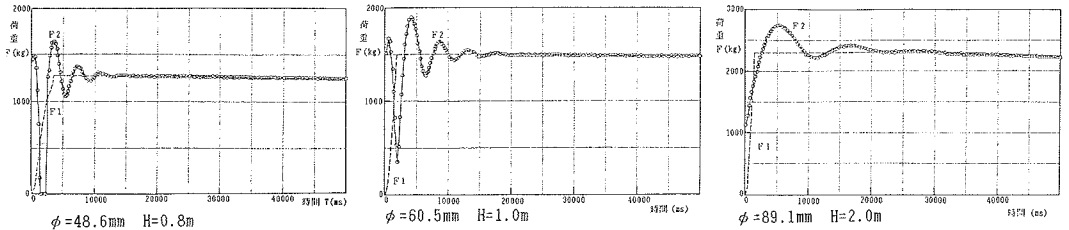


図-6 Fの時間的变化

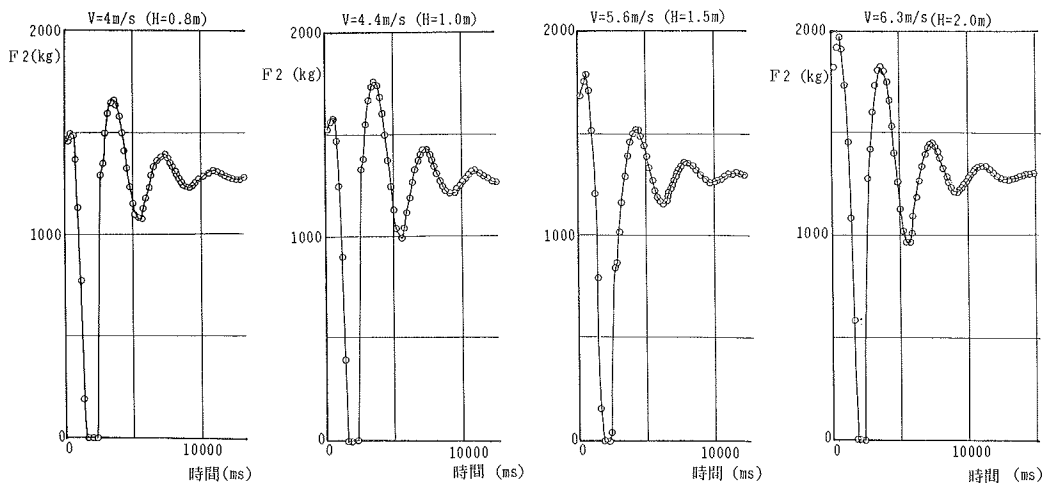


図-7 載荷速度による $T \sim F_2$ の変化 ($\phi 48.6\text{mm}$)

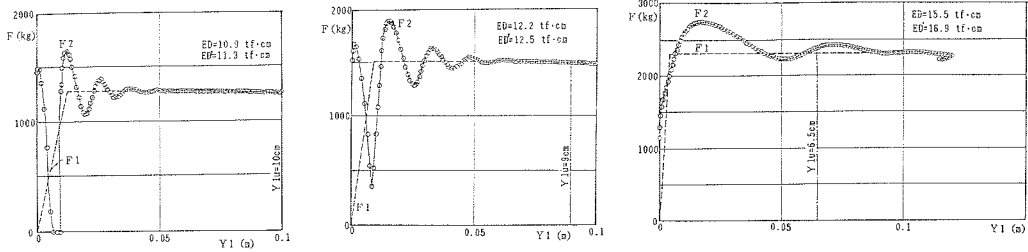


図-8 FとY₁の関係

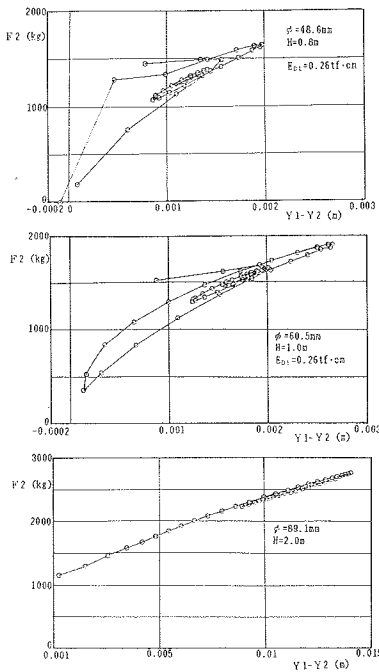


図-10 F₂と(Y₂~Y₁)の関係

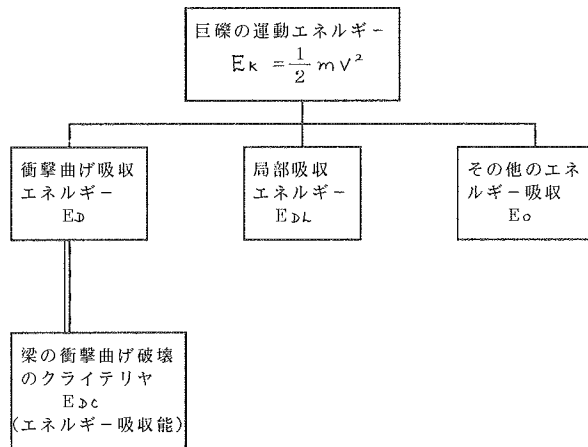


図-9 衝撃時のエネルギーの変換

表-3 局部吸収エネルギー-E_{D,L} (計算値)

管径φ (mm)	落高H (m)	速度V (m/s)	運動エネルギーE _k	曲げ吸収エネルギーE _D	局部吸収エネルギーE _{D,L}	$\frac{E_{D,L}}{E_D}(\%)$
48.6	0.8	4	12.2	10.9	0.16	1.5
60.5	1.0	4.4	14.8	12.2	0.26	2.1
69.1	2.0	6.3	30.3	15.5	2.70	17.4

参考文献

- 1) 砂防地すべり技術センター 鋼製砂防構造物研究会：鋼製砂防施設便覧（昭和60年度版）
- 2) 矢澤昭夫，水山高久，下東久巳：鋼管に対する土石流衝撃力実験報告書，土木研究資料第2276号，昭和61年3月