

鋼管片持ちばりのせん断衝撃応答に関する一考察

A STUDY ON THE SHEAR IMPACT RESPONSE OF STEEL PIPE CANTILEVER

石川 信隆^{*}, 香月 智^{**}, 星川 辰雄^{***}, 水山 高久^{****}

Nobutaka ISHIKAWA, Satoshi KATSUKI, Tatsuo HOSHIKAWA, Takahisa Mizuyama

This paper presents an experimental and analytical approach for the shear impact response of steel pipe cantilever. The purpose of this study is to give the fundamental data in order to develop the impact resistant design method of the A-type slit Sabo dam. At first, the shear impact tests have been performed by striking the weight at near the fixed end of the steel pipe cantilever. Then, the impact elastic-plastic response analysis of steel pipe cantilever is developed by considering the local deformation and shear deformation of beams. It is found that the numerical results are relatively in good agreements with the experimental ones in the impact absorbed energy. It has also been confirmed that the impact limit absorbed energy exists in the velocity $V=6\sim 8$ m/s within the scope of this experimental condition.

1. 緒言

近年、土石流対策の砂防構造物の中に、写真-1に示すような鋼製スリットダムと呼ばれる砂防ダムが数多く設置されてきた。この砂防ダム設置の目的は、通常時に土砂を流下させ、土石流発生時に巨礫を受け止めることであるが、過去に土石流中に含まれる巨礫の衝突によって鋼製スリットダムの一部が局部的にせん断破壊した例があった。従来、著者ら^{***}は、この鋼製スリットダムの耐衝撃性能を調べるため、衝撃吸収エネルギーによって評価することを提案し、その基礎的段階として鋼管片持ちばりの衝撃曲げ吸収エネルギーについての研究を行ってきた。

本研究は、さらにこの鋼製スリットダムの破壊原因を実験的かつ理論的に究明するため、まず鋼管片持ちばりに対するせん断衝撃実験を行うことにより、せん断衝撃破壊をも現出させて、そのせん断衝撃応答および衝撃吸収エネルギーについて考察した。次に、局部変形とはりのせん断変形を同時に考慮した鋼管片持ちばりの衝撃弾塑性応答解析

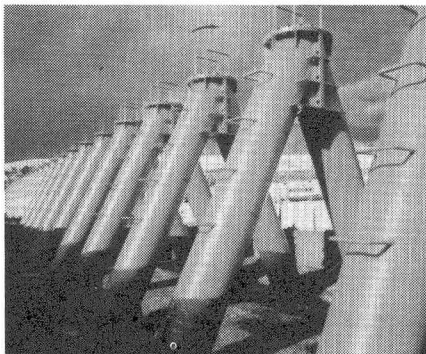


写真-1 鋼製スリット砂防ダムの一例

* 工博 防衛大学校 教授 土木工学科 (〒239 横須賀市走水1-10-20)

** 防衛大学校 助手 土木工学科 (同上)

*** 防衛大学校 理工学研究科学生 (同上)

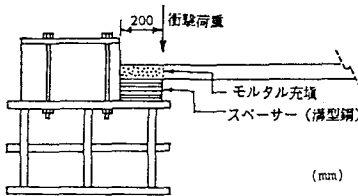
**** 農博 建設省土木研究所砂防部砂防研究室長 (〒305 茨城県つくば市大字旭一番地)

法の確立を試み、数値計算によってせん断衝撃応答および衝撃吸収エネルギーを算定し、実験結果との比較検討を行ったものである。

2. 実験の概要

(1) 実験装置

実験装置は、図－1に示すように自由落下によって衝突速度 $V_0=4.0\text{ m/s}\sim10.0\text{ m/s}$ をもつ重錘（重量 150 kgf ）を、直径 $\phi=48.6\text{ mm}$ の鋼管片持ばりの固定端近くに衝突させ、衝突間の荷重および変位を計測するものである。なお、実験装置上の制約から衝突点は固定端から 20 cm 離れた点に設け、この点までを固定条件と等価するために、図－2に示すように鋼管下部に溝型鋼のスペーサーを入れて支持した。また、打撃点に大きな局所変形が発生しても押し込み部の形状変化の影響をあまり発生しないようにするために、図－3に示す鋼管打撃用具（ロードセルを含め 13 kgf ）を作成し、これを予め打撃点にあてがったうえで、重錘を衝突させるものとした。



図－2 衝突点の支持状態

(2) 計測システム

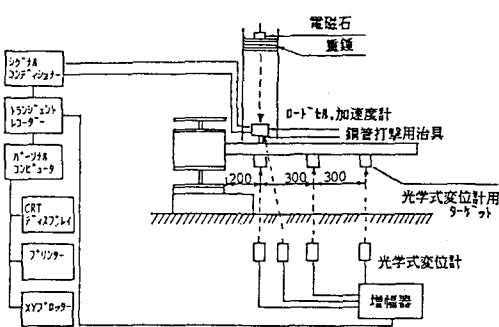
計測事項としては、①鋼管打撃用具と重錘との間に発生する荷重をロードセルによって、②鋼管打撃用具の変位（ロードセル変位と呼ぶ）および固定端から 20 cm （打撃点）、 50 cm 、 80 cm 離れた点における鋼管下部の変位を光学式変位計によってそれぞれ測定した。また、これらから得られたデータは図－1に示すようにトランジェントレコーダを経て、コンピュータへデジタルデータとして保存するものとした。

(3) 供試体

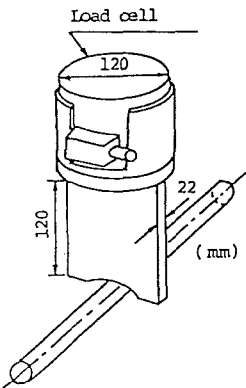
実験に用いた供試体の鋼管は、一般構造用炭素鋼管でJIS-G3444STK41の $\phi 48.6\text{ mm}$ のものであり、固定端から自由端までの長さは 110 cm である。供試体に用いた鋼管の諸元を表－1に示す。また、供試体の固定端側は図－4に示すようにコンクリートブロックで固定しており、この部分には抜け出し防止のため、鋼管の周りに鉄筋を溶接している。さらに、打撃部分までの剛性を高めるため打撃部直近までモルタルを充填した。

(4) 実験ケース

実験のケース区分は、供試体、重錘重量および打撃点位置は同一条件にし、衝突速度をパラメトリックに変化させることにより、表－2に示す8ケースとした。



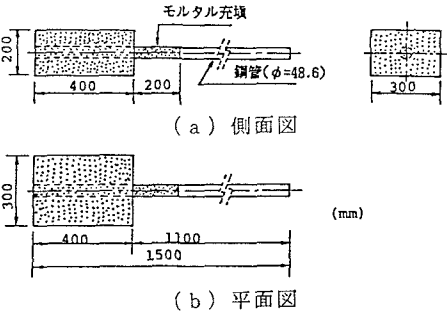
図－1 実験装置・計測システムの概要



図－3 鋼管打撃用具

表－1 鋼管の諸元

直径	(mm)	48.6
鋼管の肉厚	(mm)	3.2
降伏点応力	(kgf/cm ²)	2400
引張強さ	(kgf/cm ²)	4800
伸び	(%)	46
断面積	(cm ²)	4.56
断面2次モーメント	(cm ²)	11.8
塑性断面係数	(cm ³)	6.6
単位重量	(kgf/m)	3.58

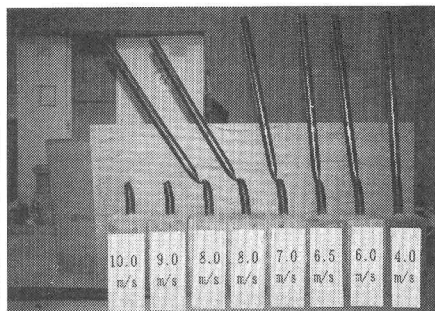


(b) 平面図

図－4 試験体の概要

表－２ 実験ケース

Case No	鋼管径 ϕ (mm)	衝突速度 V_0 (m/s)	重錘重量 W (kgf)	衝突位置 g (cm)	測定項目
1	48.6	4.0	150	20	1.衝突点荷重～時間
2		6.0			2.衝突点変位～時間
3		6.5			(固定端から20cm点)
4		7.0			3.変位～時間
5		8.0			(固定端から50cm点)
6		8.0			4.変位～時間
7		9.0			(固定端から80cm点)
8		10.0			5.0～t秒変位～時間

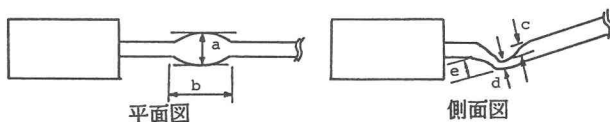


写真－２ 破壊状況

3. 実験結果と考察

(1) 衝突速度と残留変形

全ての実験条件において衝突後の残留変形は、図－５および写真－２に示すように、打撃点に非常に大きな局部的変形、すなわち鋼管断面が押しつぶされるまたは切れるような変形が発生した。表－３に実験ケースごとの残留変形を示す。表中 a～e は、図－５に示した変形量に対応するものであるが、特に d は打撃部の断面が残留変形状態において保持している断面高に相当するもので、衝突速度が速くなるにつれて d は小さくなっている。特に $V_0 = 8.0$ m/s では d は約 1.3 cm となっているが、 $V_0 = 9.0$ m/s 以上では全断面が切断された。これらのことから、本実験条件では衝突速度 $V_0 = 8.0$ m/s が、この鋼管断面の耐え得る限界の状態であるものと考えられる。



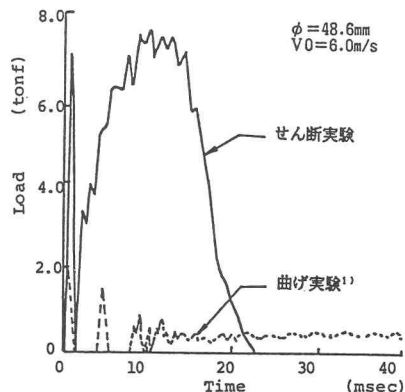
図－５ 破壊（残留）変形

表－３ 衝突速度と残留変形

Case No	鋼管径 ϕ (mm)	衝突速度 V (m/s)	重錘重量 W (kgf)	残留変形量					備考
				a (cm)	b (cm)	c (cm)	d (cm)	e (cm)	
1	48.6	4.0	150	5.5	5.5	0.6	4.2	1.2	
2		6.0		6.0	6.5	1.5	3.4	2.5	
3		6.5		6.3	6.4	0.9	3.8	1.9	
4		7.0		6.9	6.5	3.5	1.5	2.5	
5		8.0		7.2	9.0	3.5	1.3	3.4	
6		8.0		7.2	7.5	3.5	1.2	2.7	
7		9.0							切断
8		10.0							切断

(2) 荷重および変位～時間関係

図－６に衝突速度 $V_0 = 6.0$ m/s における荷重～時間関係を示す。これより、衝撃荷重は約 7 tonf の収束荷重に向かって増加し始め $t = 10 \sim 15$ msec の間は収束荷重が持続する。また、同じ供試体に固定端から 90 cm 離れた位置に衝撃荷重を与える実験を別途を行った¹⁾。衝突速度 $V_0 = 6.0$ m/s のものを図－６の曲げ実験として併記する。これより、固定端付近のせん断実験は、先端付近の曲げ実験¹⁾と比べ、収束荷重が約 1.5 倍に大きくなっていること、またその持続時間が約 1/3 に短縮されていることなどが著しく異なっており、せん断変形が卓越することの影響が大きく現われている。一方、図－７は変位～時間関係を示すが、変位は小さな振動応答が



図－６ 荷重～時間関係

なく単調に増加し、 $t = 15 \text{ msec}$ で最大値 4.5 cm に達した後減少し始める、すなわち跳ね返されている。しかし、曲げ実験の場合は、はね返りの影響がなく単調に増加しており、固定端近くに衝突する場合には極めて短時間のうちに重錘の運動エネルギーを吸収する応答を示すことが認められる。

(3) 荷重～変位関係

図-8は衝突速度 $V_0 = 4.0 \text{ m/s}$ 、 6.0 m/s 、 8.0 m/s における荷重～変位関係を示し、これより以下のことが考察される。

- ① 衝突直後の急激な荷重増加は衝突速度の増加と共に大きな最大値を表わすが、その応答変位量は 2 mm 以下と極めて小さい。
- ② 収束荷重は、衝突速度にかかわらずほぼ同じ大きさで傾向をもち、その領域の荷重～変位関係の包括線の形状は静的な硬化型の弾塑性応答と同じ応答の形を示している。
- ③ 衝突速度の増大にともない最大変位は顕著に増加しており、これが衝撃吸収エネルギーの増加に大きな影響を及ぼす。

(4) 衝撃吸収エネルギー

図-9に各実験ケースごとの衝撃吸収エネルギー～衝突速度関係を示す。ここで示した衝撃吸収エネルギーは、荷重～変位関係において重錘が跳ね返される場合にはその最大変位までの、跳ね返されず鋼管が切れた場合には荷重が 0 kgf となるまでの荷重と変位の積を求めたものである。

これより以下のことが考察される。

- ① 鋼管が切れることなく、重錘が跳ね返された衝突速度 $V_0 = 8.0 \text{ m/s}$ 以下の吸収エネルギーは、衝突前に重錘が持っていた運動エネルギーから若干小さな値となるが、ほぼ同じ値となっている。
- ② 鋼管が切れる衝突速度 $V_0 = 9.0 \text{ m/s}$ 、 10.0 m/s での吸収エネルギーは、 $V_0 = 8.0 \text{ m/s}$ のものと同等または小さな値を示し、与えた運動エネルギーを吸収しきれなくなることが分る。
- ③ これらのことから、本実験条件下においてこの鋼管は、 $V_0 = 8.0 \text{ m/s}$ 以上の衝突速度に対して運動エネルギーを吸収しきれなくなり、したがって、吸収エネルギーの値は約 $40 \text{ tonf}\cdot\text{cm}$ であると考えられる。

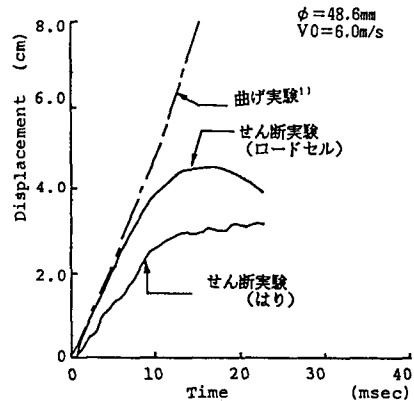


図-7 変位～時間関係

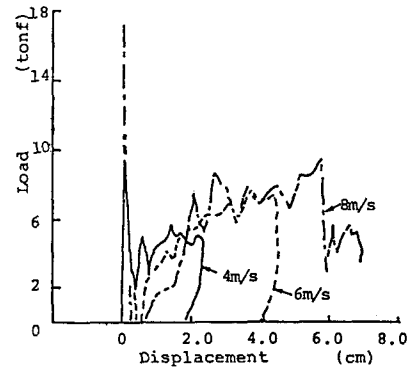


図-8 荷重～変位関係

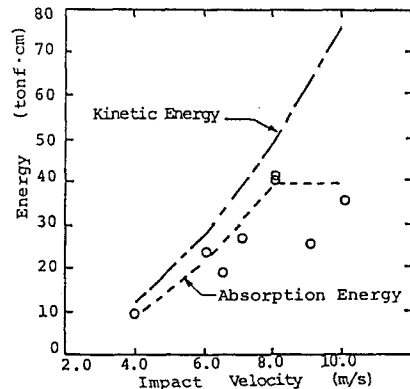


図-9 吸収エネルギー～衝突速度関係

4. 局部変形とはりのせん断変形を考慮した衝撃応答解析法

(1) 基本式の誘導

(a) 運動方程式

まず図-10 (a)に示す片持ばりを図-10 (b)のようにいくつかの要素に分割し、その要素モデルは図-10 (c)のように両端に曲げ、せん断、軸力の塑性ばねをもち、はり要素自身は曲げ、せん断、軸力の弾性変形を示すものとし、また載荷点には図-10 (b)のように局部ばねをつけ、局部変形量（めり込み量）と衝撃荷重を算定可能とした。このような要素モデルを用いた片持ばりの t 時刻から $t + \Delta t$ 時刻に至る運動方程式は次式で表わされる。

$$m \Delta \ddot{u} + C \Delta \dot{u} + K \Delta u = \Delta F \quad (1)$$

ただし、 m ：質量マトリックス； C ：減衰係数マトリックス；
 K ：構造全体の接線剛性マトリックス； F ：外力マトリックス；
 u ：節点変位ベクトル； Δ ： Δt 時間における増分を示す記号；

(3) 接線剛性マトリックス K の誘導

はりの純せん断変形を算出可能とするため図-11 (b)にはりの純せん断力とつり合う仮想外力 F_s を作用させて剛性マトリックスを誘導すると、以下ようになる。まず弾塑性解析に必要な十分な条件は次式のように表わされる。

① つり合い条件：
$$\begin{bmatrix} C_A \\ C_s \end{bmatrix}^T Q = \begin{bmatrix} F_A \\ F_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

② 変形適合条件：
$$\begin{bmatrix} C_A & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_s \end{bmatrix} = Q = Q^e + Q^p \quad (3)$$

ただし、 $Q^e = k^{-1} Q$ （弾性変形）、 $Q^p = N \lambda$ （塑性変形）

③ 降伏条件式：
$$\Phi = N^T Q - R \leq 0 \quad (4)$$

④ 塑性変形発生条件：
$$\Phi^T \lambda = 0 \quad (5)$$

ここに、 Q ：内力ベクトルで、曲げモーメント、軸力、せん断力を示す。 Q ：内変形ベクトルで、曲げ回転角、軸変形、せん断変形を示す。 F_A ：内力 Q （曲げ、せん断、軸力）とつり合う外力ベクトル； F_s ：図-11 (b)のように純せん断力のみとつり合う仮想外力ベクトル； N ：曲げ、軸力、せん断力の組合せ線形化降伏条件式に対する外向き単位法線マトリックス（表-4 参照）； λ ：塑性乗数ベクトル； C_A ：外変位 u_A と内変形 Q を適合させるマトリックス（表-4 参照）； C_s ：せん断変形による外変位 u_s と内変形 Q を適合させるマトリックス（表-4 参照）； u_A ：曲げと軸力とせん断変形による節点変位ベクトル； u_s ：純せん断変形のみによって生じる節点変位ベクトル； k^{-1} ：要素の弾性集合柔性マトリックス；以上の式(2)～(5)を用いると、構造全体の接線剛性マトリックスがそれぞれ次のように誘導される。

(i) 弾性時：
$$K^e = (C_A^T k C_A) - (C_A^T k C_s) (C_s^T k C_s)^{-1} (C_s^T k C_A) \quad (6)$$

(ii) 弾塑性時：

$$K_p = (C_A^T k C_A) - (C_A^T k C_s \quad C_A^T k N) G^{-1} \begin{bmatrix} C_s^T k C_A \\ N^T k C_A \end{bmatrix} \quad (7)$$

ただし、

$$G = \begin{bmatrix} C_s^T k C_s & C_s^T k N \\ N^T k C_s & N^T k N \end{bmatrix}$$

ここで、 N は、式(4)、(5)において $\Phi_i = 0$ となる降伏条件式に対応する N ベクトルだけを抽出したものである。

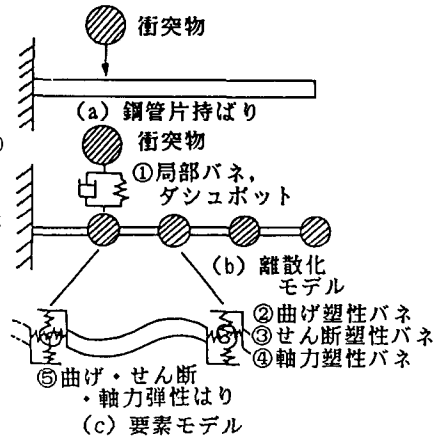


図-10 構造のモデル化

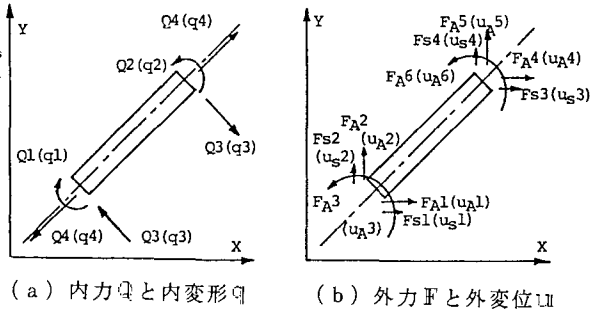


図-11 要素の断面力と変位との関係

表-4 i 要素の係数マトリックスの内容

(2) 衝撃応答解析法

衝撃応答解析は、Wilsonのθ法を用いた以下の手順によって行われる。

① 重錘の衝突速度 V_0 を与えて解析を開始する。すなわち、初期条件として

$u = 0$ 、 $\dot{u}_m = V_0$ (他の $\dot{u} = 0$)、 $\ddot{u} = 0$ とする。

② 式(1)の運動方程式を線形加速度法を拡張したWilsonのθ法を用いて次式をうる。

$$\begin{aligned} & \left(m + \frac{\Delta t}{2} C + \frac{(\Delta t)^2}{6} R \right) \ddot{u}(t + \theta \Delta t) \\ &= F(t + \theta \Delta t) - C \dot{u}(t) \\ & - C \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}(t) - R u(t) \\ & - R \left\{ \Delta t \dot{u}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{3} \ddot{u}(t) \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

ただし、 R は t 時刻における構造全体剛性マトリックス、上式で得た $\ddot{u}(t + \theta \Delta t)$ を用いて $\dot{u}(t + \Delta t)$ を次のように求める。

$$\dot{u}(t + \Delta t) = \frac{(\theta - 1)\dot{u}(t) + \dot{u}(t + \theta \Delta t)}{\theta} \quad (9)$$

ただし、本解析では $\theta = 1.4$ を用いた。

③ よって、 $\dot{u}(t + \Delta t)$ と $u(t + \Delta t)$ が次式のように得られる。

$$\begin{aligned} \dot{u}(t + \Delta t) &= \dot{u}(t) + \Delta t \frac{\ddot{u}(t) + \ddot{u}(t + \Delta t)}{2} \\ u(t + \Delta t) &= u(t) + \Delta t \dot{u}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{3} \ddot{u}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{6} \ddot{u}(t + \Delta t) \quad (10) \end{aligned}$$

④ 時刻 t における衝突点のはりの変位 u_i 、速度 $\dot{u}_i$ および重錘の変位 u_m 、速度 $\dot{u}_m$ から次式を用いて衝撃荷重 P_i を求める。

$$P_i = k_m(u_m - u_i) + C_m(\dot{u}_m - \dot{u}_i) \quad (11)$$

ただし、 k_m ：局部ばね定数； C_m ：局部減衰係数；

また、 $u_m - u_i < 0$ のとき $P_i = 0$

⑤ 求めた P_i を式(8)の $Q(t + \theta \Delta t)$ の中に入れ、式(8)、(9)、(10)、(11)を計算する。

⑥ 鋼管断面の曲げモーメントと軸力とせん断力の組合せ降伏条件⁴⁾を用いて降伏判定を行ったうえで、式(8)の R を式(6)の弾性時の R_e か式(7)の弾塑性時の R_p のいずれかを用い、再度②に戻り式(8)を計算する。

⑦ 以下同様に②～⑥を繰り返したうえで、荷重→変位関係を求め衝撃吸収エネルギーを算定し、指定した終了時刻 t_E に達したとき($t = t_E$)をもって計算を終了する。以上の計算手順を図-12のフローチャートに示す。

$C_m =$	$\begin{bmatrix} \frac{\sin \theta_i}{\theta_i} & -\frac{\cos \theta_i}{\theta_i} & -1 & -\frac{\sin \theta_i}{\theta_i} & \frac{\cos \theta_i}{\theta_i} & 0 \\ -\frac{\sin \theta_i}{\theta_i} & \frac{\cos \theta_i}{\theta_i} & 0 & \frac{\sin \theta_i}{\theta_i} & -\frac{\cos \theta_i}{\theta_i} & 1 \\ \frac{\sin \theta_i}{\theta_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 \end{bmatrix}$
$C_{s,i} =$	$\begin{bmatrix} -\frac{\sin \theta_i}{\theta_i} & \frac{\cos \theta_i}{\theta_i} & -\frac{\sin \theta_i}{\theta_i} & \frac{\cos \theta_i}{\theta_i} \\ \frac{\sin \theta_i}{\theta_i} & -\frac{\cos \theta_i}{\theta_i} & \frac{\sin \theta_i}{\theta_i} & -\frac{\cos \theta_i}{\theta_i} \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & \sin \theta_i & \cos \theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
$K_i =$	$\begin{bmatrix} \frac{4 E_i I_i}{\theta_i} & -\frac{2 E_i I_i}{\theta_i} & 0 & 0 \\ -\frac{2 E_i I_i}{\theta_i} & \frac{4 E_i I_i}{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_i A_i}{\theta_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{E_i A_i}{\theta_i} \end{bmatrix}$
$N_i =$	$\begin{bmatrix} \frac{0.862}{M_{s,i}} & \frac{0.577}{M_{s,i}} & -\frac{0.577}{M_{s,i}} & -\frac{0.862}{M_{s,i}} & -\frac{0.577}{M_{s,i}} & \frac{0.577}{M_{s,i}} & -\frac{0.862}{M_{s,i}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{0.505}{N_{s,i}} & \frac{0.816}{N_{s,i}} & \frac{0.816}{N_{s,i}} & -\frac{0.505}{N_{s,i}} & -\frac{0.505}{N_{s,i}} & \frac{0.816}{N_{s,i}} & -\frac{0.505}{N_{s,i}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{0.862}{M_{s,i}} & \frac{0.577}{M_{s,i}} & -\frac{0.577}{M_{s,i}} & -\frac{0.862}{M_{s,i}} & -\frac{0.577}{M_{s,i}} & \frac{0.577}{M_{s,i}} & -\frac{0.862}{M_{s,i}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{0.505}{N_{s,i}} & \frac{0.816}{N_{s,i}} & \frac{0.816}{N_{s,i}} & -\frac{0.505}{N_{s,i}} & -\frac{0.505}{N_{s,i}} & \frac{0.816}{N_{s,i}} & -\frac{0.505}{N_{s,i}} \\ 1.0 & \frac{0.414}{M_{s,i}} & -\frac{0.414}{M_{s,i}} & -1.0 & -1.0 & -\frac{0.414}{M_{s,i}} & \frac{0.414}{M_{s,i}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{0.414}{S_{s,i}} & 1.0 & 1.0 & \frac{0.414}{S_{s,i}} & -\frac{0.414}{S_{s,i}} & -1.0 & -\frac{0.414}{S_{s,i}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0 & \frac{0.414}{M_{s,i}} & -\frac{0.414}{M_{s,i}} & -1.0 & -1.0 & -\frac{0.414}{M_{s,i}} & \frac{0.414}{M_{s,i}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{0.414}{S_{s,i}} & 1.0 & 1.0 & \frac{0.414}{S_{s,i}} & -\frac{0.414}{S_{s,i}} & -1.0 & -\frac{0.414}{S_{s,i}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

ただし、 θ_i ：断面の長さ； E_i ：ヤング係数； I_i ：断面二次モーメント； A_i ：断面積； G_i ：せん断弾性係数； θ_i ：1要素がx軸となす角度； $N_{s,i}$ ：断面の降伏軸力； $M_{s,i}$ ：断面の全塑性曲げモーメント； $S_{s,i}$ ：断面の全塑性せん断力

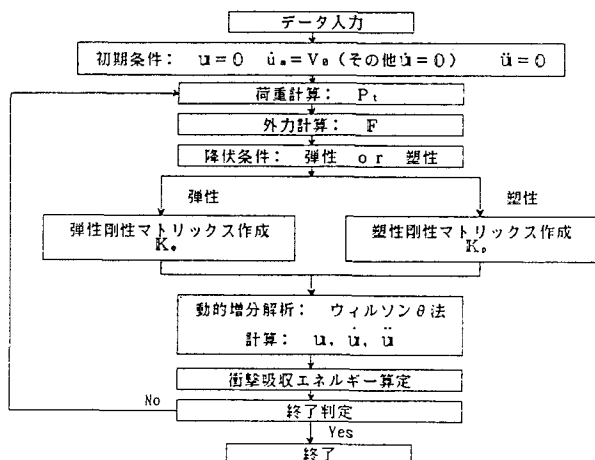


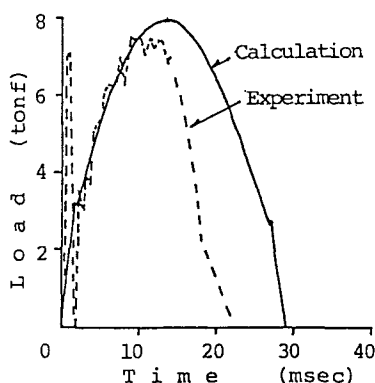
図-1 2 衝撃応答解析の計算フローチャート

5. 数値計算結果と考察

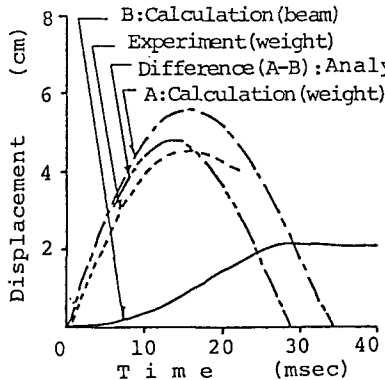
鋼管片持ばりのせん断衝撃応答実験と比較するために、図-1 3に示すような固定端付近に衝撃を受ける場合についてモデル化した解析を行った。ここで、固定端付近に衝撃を受ける場合、局所のめり込み量が大きいため、鋼管の静的めり込み実験を行うことにより、図-1 4に示すような弾塑性局部ばね定数 (Idealized1) を求め、これを採用した。また、局所のダッシュポットの減衰係数 C_m については、片持ばり先端に衝突する場合の解析に用いた値をそのまま使用した¹⁾ ($C_m = 0.405 \text{ kgf} \cdot \text{sec/cm}$)。

(1) 荷重～時間および変位～時間関係

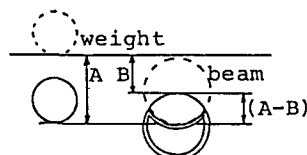
図-1 5 (a) は荷重～時間関係、図-1 5 (b) は重錘およびはりの変位～時間関係を示したものである。図-1 5 (a) より全体的に荷重の計算値は実験値をかなりよくシミュレートしているが、図-1 5 (b) の変位の計算値は実験値よりやや大きめの値を示している。また計算値によるはり自体の変位と重錘の変位の差 (A-B) が非常に大きく現われているが、これは図-1 3に示す局部変形量を示している。事実、先の衝撃実験においてこの局部変形量が極めて大きく、衝突速度が $V = 8 \text{ m/sec}$ に達するとほぼ切れる寸前までこの局部変形量が達しており、本解析が定量的にもかなりよくその現象を表わしているものと思われる。



(a) 衝突点荷重～時間関係



(b) 衝突点変位～時間関係



(c) 局部変形の模式図

図-1 5 固定端付近に衝撃を受ける場合

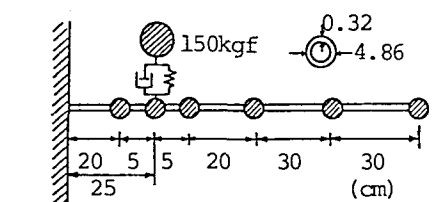


図-1 3 固定端付近に衝撃を受ける場合

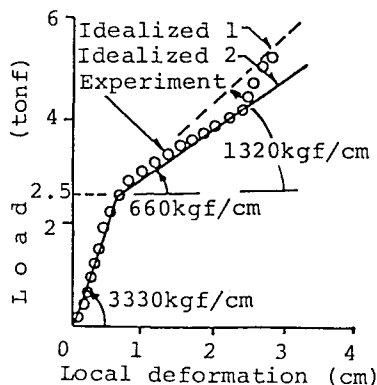


図-1 4 弾塑性局部ばね

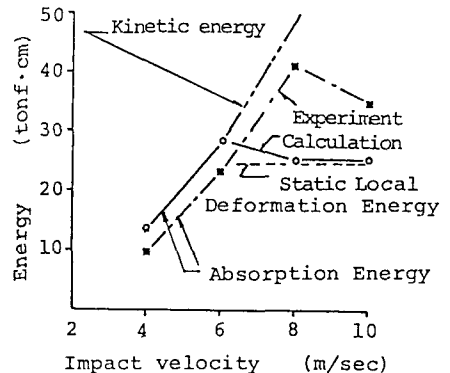
(2) 衝撃吸収エネルギー

図-16(a)は衝撃吸収エネルギーと衝突速度との関係を示したもので、実線は局部変形が管径と同じ4.8cmに達した時(図-16(b)参照)を管の応答の限界値とみなして、それまでに吸収されるエネルギーを算定したものである。 $V=6\text{ m/sec}$ までは限界値に変位が達しないため吸収エネルギーは重錘の運動エネルギー(Kinetic Energy)と完全に一致するが、 $V=8\text{ m/sec}$ ではこの限界値を越えるため、その吸収エネルギーは運動エネルギーより小さくなる。よって、 $V=6\text{ m/sec}$ と 8 m/sec との間に衝撃限界吸収エネルギーが存在することがわかる。またこの限界エネルギー線に至る全体的な傾向は実験値とほぼ一致している。さらに、本解析による衝撃限界吸収エネルギーは図-14における静的局部変形実験より得られる局部吸収エネルギー(図-16(c)で図-16(a)の点線線に相当)とほぼ一致しており、固定端付近に衝撃を受ける場合は、静的局部めり込み実験により衝撃限界吸収エネルギーをほぼ推定することができる。

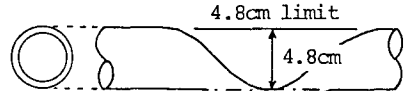
6. 結論

本研究は、固定端近くに衝突荷重を受ける鋼管片持ばりのせん断衝撃応答について、実験的かつ理論的に考察したものである。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

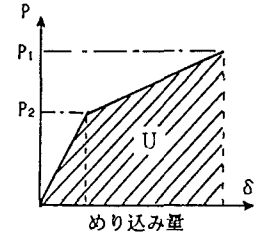
- (1) 固定端近くに衝撃荷重を受ける鋼管片持ばりは、打撃点の断面がつぶされるとともに、衝突速度が大きくなると切れる局部応答が顕著に現れた。
- (2) 本実験で用いた供試体($\phi 48$, $t 3$, $L 2$)の衝撃吸収エネルギーは、衝突速度 $V_0=8.0\text{ m/s}$ を境に限界吸収エネルギー(約 $40\text{ tonf}\cdot\text{cm}$)となるため、運動エネルギーを全て吸収できなくなり、切断されるようになった。
- (3) 局部変形とせん断変形を考慮したはりの弾塑性衝撃応答解析法を確立することができ、荷重～時間曲線、変位～時間曲線などせん断衝撃応答をほぼシュミレートできることを確認した。
- (4) 片持ばりの固定端付近に衝撃を受ける場合、はり局部を弾塑性体と仮定して静的局部吸収エネルギーを求めることにより、衝撃吸収エネルギーをほぼ推定できることが認められた。



(a) 吸収エネルギー～衝突速度関係



(b) 局部変形の模式図



(c) 静的局部吸収エネルギー
図-16 衝撃吸収エネルギー

(固定端付近に衝撃を受ける場合)

参考文献 1) 齋藤英明, 石川信隆, 大野友則, 水山高久: 鋼管片持ばりの衝撃吸収エネルギーに関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第386号/I-8, pp.321~328, 1987年10月。

2) 齋藤英明, 大野友則, 石川信隆, 水山高久: 局部変形を考慮した鋼管片持ばりの衝撃吸収エネルギーに関する実験的研究, 構造工学論文集, vol.35A, pp.1057~1068, 1989年3月。

3) 香月智, 星川辰雄, 石川信隆, 水山高久: pp.323~326, 鋼管はりのせん断衝撃実験について, 平成元年度砂防学会研究発表会概要集, 1989年5月

4) 石川信隆, 和田総一郎, 香月智, 星川辰雄: 局部変形とはりのせん断変形を考慮した鋼管片持ばりの衝撃弾塑性応答解析, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第13巻, pp.515~520, 平成元年7月

(1989年10月 2日受付)