

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

AN EXPERIMENTAL APPROACH ON IMPACT ENERGY ABSORPTION CAPACITY OF CANTILEVER STEEL PIPES CONSIDERING LOCAL DEFORMATION

齋藤英明* 大野友則** 石川信隆*** 水山高久****

By Hideaki SAITOH, Tomonori OHNO, Nobutaka ISHIKAWA
and Takahisa MIZUYAMA

In recent years, many steel-made open Sabo structures such as slit dams and grating dams have been constructed with steel pipes to take a countermeasure against a debris-flow. They can be built easily in a relatively short period and have the advantage of prevention of rocks in debris-flow. However, the method of estimating the impact resistance of steel-made dams has not been made clear so far. This study is focused on the evaluation of the ultimate resistance of steel-made dams under impact loads, from the experimental point of view. Cantilever steel pipes subjected to both bending and shear force were tested by static, high-speed and impact tests in this study to evaluate the impact energy absorption capacity considering local deformation. The results obtained in this study can be provided an information for the design of steel-made Sabo dams.

1. 緒言

山岳地の多いわが国では土砂災害が発生する危険性のある場所が多く、土石流の発生する危険性のある溪流は全国で6万箇所以上に及ぶと言われている¹⁾。土石流が構造物に破壊をもたらす要因は、泥質土石流の流体圧と礫質土石流の先頭部に含まれる巨礫による衝撃力であることが知られている¹⁾。土石流の衝撃力の推定に関しては建設省土木研究所砂防研究室^{2), 3)}や大同⁴⁾らが実験的研究を行っているが、まだ確立されていない。また、土石流の発生機構に関してもいまだ研究段階^{5), 6)}にあり、砂防構造物の設計法を確立するためには検討すべき事項が多い。

鋼管製砂防ダムは、通常の土砂流に対してはこれを透過させてダム上流側への堆積を減少させることにより、土石流発生時に巨礫を捕捉する目的から考案されたものである。これまでに発生した鋼管製砂防ダム（例えばA型スリットダム）の破壊は、事故後の調査・研究から曲げモーメント、せん断力、軸力あるいはこれらの組み合わせにより引き起こされると考えられている⁷⁾が、曲げによる破壊に関しては、著者ら⁸⁾が実験および簡単な2質点系モデルを用いた衝撃応答解析法により検討し、衝撃吸収エネルギーの推定方法を提案した。

* 防衛大学校 理工学研究科学生 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

** 工博 防衛大学校講師 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

*** 工博 防衛大学校教授 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

**** 農博 建設省土木研究所砂防研究室室長 (〒305 茨城県つくば市旭1番地)

一方、鋼管製砂防構造物の一つであるA型スリットダムの事故事例⁹⁾が報告されているが、その破壊現象は、巨礫の衝突によって生じる曲げとせん断による複合作用によるものと考えられている。したがって、せん断力が卓越するような衝撃荷重を受ける場合の鋼製砂防構造物の衝撃限界性能（耐力、変形および吸収エネルギーなど）についても検討を行う必要がある。

そこで本研究では、鋼製砂防構造物にせん断力が卓越するような衝撃力が作用する場合の構造物の限界性能を明らかにするための基礎的な段階として、まず鋼製砂防構造物の構成要素である鋼管部材を対象とし、一端固定条件下にある鋼管部材の衝撃吸収エネルギーについて実験的に検討したものである。

実験は、鋼管はりの静的限界性能を求めるための静的載荷実験、衝撃限界性能を求めるための高速載荷実験および実際の衝突現象を再現するための衝突載荷実験の3種類である。実験にあたっては、せん断力が卓越するようにはりの固定端から20cmの位置に載荷を行った。鋼管片持ばりの衝撃限界性能に関する考察は、以下の3点に着目して行っている。

- 1) 鋼管径（径厚比）の相異が衝撃吸収エネルギーに及ぼす影響
- 2) 載荷速度の相異が衝撃吸収エネルギーに及ぼす影響
- 3) 局部変形が衝撃吸収エネルギーに及ぼす影響

2. 実験の概要

本研究では、鋼管片持ばりに衝撃力が作用する場合の衝撃吸収エネルギーを求める目的から、静的載荷実験、高速載荷実験および衝突載荷実験の3種類の実験を行った。静的載荷実験を除くそれぞれの実験に用いた載荷装置の目的および特色を表-1に示す。本実験で用いたパラメータは、鋼管径（径厚比）および載荷速度である。実験条件を表-2に示す。なお、以下では高速載荷実験および衝突載荷実験についてのみ説明する。

表-1 高速載荷装置と衝突載荷装置の比較

	高速載荷装置	衝突載荷装置
目的	高速載荷を受ける試験体の衝撃限界性能（終局耐力、終局変位量、吸収エネルギー）を求める	衝突に対する部材の衝撃応答現象を検討する
特色	○慣性力の影響が少ない ○試験体を任意の一定速度で変形させる ○変形速度が材料の応力・ひずみに及ぼす影響を調べることができる	○慣性力の影響や応力波によって応答が複雑 ○衝突時の速度を与えるが、変形時の速度は不明 ○実際の現象に近い

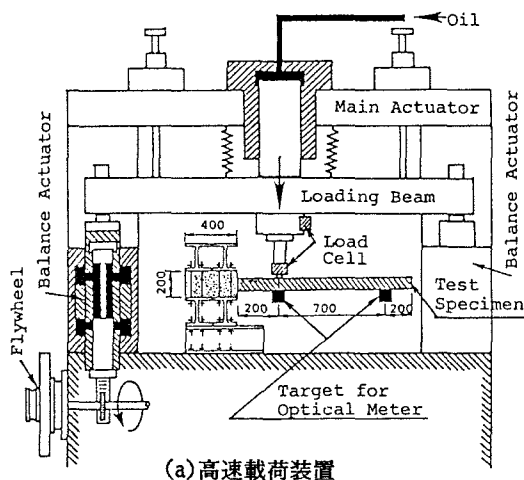
（1）載荷装置

a. 高速載荷装置

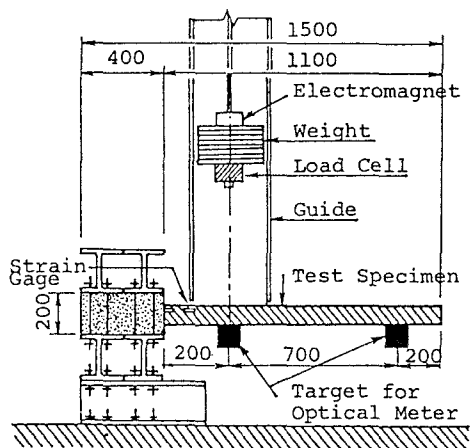
高速載荷装置の概要を図-1(a)に示す。この載荷装置は、最大載荷速度4.0 m/sおよび最大荷重50tonfの能力を有する高速変形負荷装置である。この装置は、油圧ポンプにより一定の圧力に保たれた主アクチュエータの荷重を2基のバランス・アクチュエータで保持し、次にバランス・アクチュエータに内蔵された制御

表-2 実験条件

Case No.	鋼管径 φ (mm)	載荷速度 V (cm/S)	載荷位置 (cm)	測定項目
SS-1	48.6	STATIC	20.0	荷重～変位
SS-2	60.5			荷重～ひずみ
SS-3	89.1			
SH-1	48.6	2.0	20.0	荷重～時間
SH-2		4.0		変位～時間
SH-3	60.5	2.0		ひずみ～時間
SH-4		4.0		
SH-5	89.1	2.0		
SH-6		4.0		
SI-1	48.6	4.0	20.0	荷重～時間
SI-2		8.0		変位～時間
SI-3	60.5	4.0		ひずみ～時間
SI-4		8.0		
SI-5	89.1	4.0		
SI-6		8.0		
合 計	15ケース（試験体15体）			



(a)高速载荷装置



(b)衝突载荷装置

図-1 実験装置の概要

バルブを機械的に一定速度で下方向に作動させて所定の速度で試験体を変形させるものである。载荷体の変位速度は、フライ・ホイールの回転数を制御することにより任意に設定できる。また、载荷体の変位量は0～150mmの範囲で任意に設定可能である。载荷にあたっては、衝突载荷実験と実験条件を等しくするため図-1(a)に示すように試験体と载荷用のパンチの間にロード・セルを挿入し、ロード・セルを介して試験体に载荷した。試験体は、厚さ20cm、幅30cm、長さ40cmのコンクリート中に鋼管を40cm埋め込んで固めたものである。試験体の設置にあたっては、コンクリートで固めた試験体の端部を十分な剛性を持つH形鋼で上下から挟み込み、これを8本のボルトで基礎部に固定した。基礎部は16本のアンカーボルトで床に固定している。

b. 衝突実験装置

衝突载荷装置を、図-1(b)に示す。この装置は、重錘の自由落下を利用した落錘式の実験装置である。試験体の設置は、高速载荷実験と同一である。本装置は、重量220kgfの重錘の中心が試験体の固定端から20cmの位置に衝突するよう、ガイドを通して自由落下させ横衝撃を加える構造とした。重錘は、巻き上げ用のウィンチに取り付けた電磁石を用いて定めた高さ（最大高さ4m）までつり上げ、電磁石のリモート・スイッチで落下させた。なお試験体に対する衝突体は、重錘下部に取り付けたロード・セルである。その先端形状は、平らな直径36mmの円形である。

(2) 計測装置

実験におけるデータの計測は、図-2に示す計測システムを用いて行った。静的载荷実験では、荷重・载荷点変位およびひずみを計測した。高速载荷実験および衝突载荷実験における計測項目は、荷重～時間関係、载荷点変位～時間関係、ひずみ～時間関係である。高速载荷実験における载荷荷重は、試験体と载荷用パンチの間に挿入したロード・セルを用いて測定した。衝突载荷実験では、重錘下部に取り付けたロード・セルが試験体との衝突によって生じる衝撃荷重を測定した。また、図-1に示すように载荷点直下部および载荷点から70cmの位置に、黒色のターゲットを取り付けて光学式

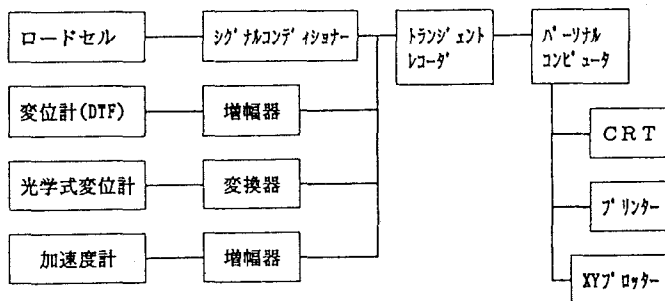


図-2 計測システム

変位計（周波数特性500kHz）を用いて変位を測定した。この光学式変位測定装置は、載荷点下部に取り付けたターゲットが試験体の変形によって移動する際、移動によって生じる測定点の光度変化を測定することにより試験体の変形量を測定するものである。また図-1に示す位置に取り付けたひずみゲージを用いて、鋼管の各部に生ずるひずみを測定した。高速載荷実験では、荷重の載荷速度を確認するためと試験体に加えた全変形量を測定する目的から、高速変形荷装置に付属している差動トランス型変位計（周波数特性1kHz）を用いて装置の加圧ビームの変位量を測定した。

衝撃荷重、ひずみおよび加速度の出力波形は高周波成分を含むため、20kHzまでの周波数特性を有する直流アンプ、トランジェント・レコーダを用いて増幅・記録した。トランジェント・レコーダのデータは、パーソナル・コンピュータを介してフロッピー・ディスクに記録し、X-Yプロッタで図化した。実験で用いたトランジェント・レコーダの最小サンプリングタイムは、1 μ sec/wordである。高速載荷実験における計測値の取り込みに際しては、高速変形荷装置の加圧ビームの変位量をデータサンプリング開始のトリガーとして用いた。

（３）試験体

試験体として用いた鋼管は、市販の一般構造用鋼管（鋼種STK-41）で管径は $\phi 48.6\text{mm}$ （径厚比15）、 $\phi 60.5\text{mm}$ （径厚比19）および $\phi 89.1\text{mm}$ （径厚比28）の３種類である。その寸法は、図-1に示すように鋼管の全長150cm（鋼管部110cm、コンクリート定着部長さ40.0cm）、コンクリート固定部は長さ40.0cm、幅30.0cm、厚さ20.0cmである。鋼管の諸元を表-3に示す。なお、現在までに施工されている鋼製砂防構造物（例えばA型スリット形式）には、径厚比40程度の鋼管が使用されている⁹⁾。衝撃力に対する抵抗力の大きさは、鋼管径と肉厚の関係にも依存することは明らかであるため、径厚比の相異が各種の限界性能に及ぼす影響を調べる必要がある。この目的から本研究では、表-3に示すように肉厚が等しく管径が異なる（径厚比が異なる）鋼管を試験体として用いた。固定部に用いたコンクリートの圧縮強度は、平均323 kgf/cm^2 であった。コンクリート固定端部は、鋼管片持ばりの破壊より先に破壊が生じないように断面の大きさを決定した。なお、あらかじめ行った予備実験で、固定端部の破壊は生じないことを確認している。

表-3 鋼管の諸元

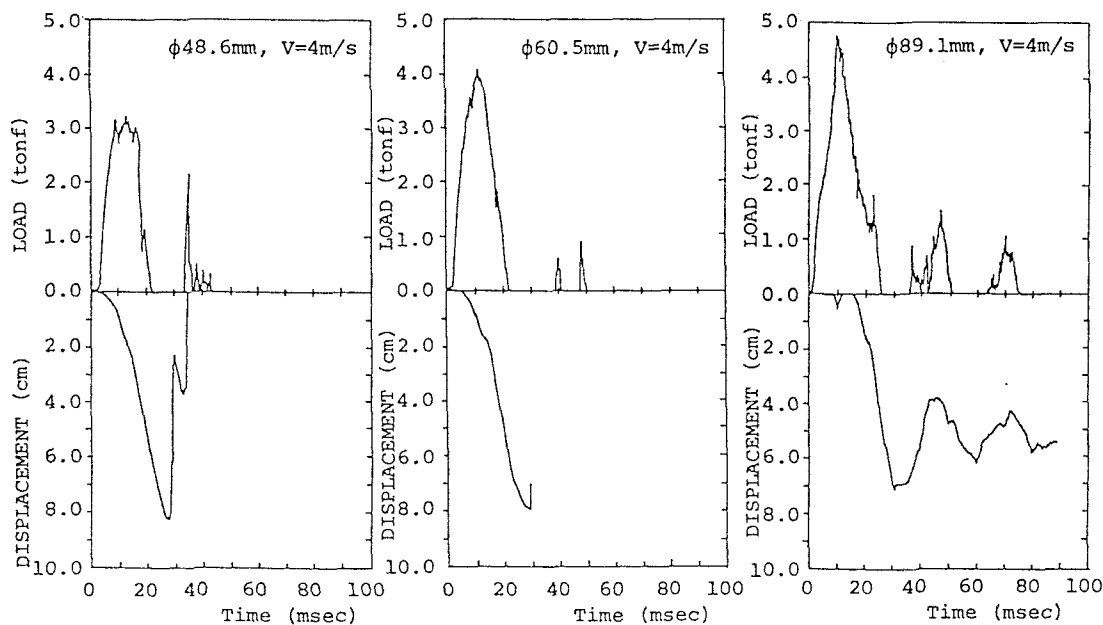
鋼管径 ϕ (mm)	48.6	60.5	89.1
径厚 t (mm)	3.2	3.2	3.2
降伏応力 σ_y (kgf/cm^2)	3600	3900	3900
引張強さ σ_u (kgf/cm^2)	4600	4700	4600
伸び (%)	44	52	28
断面積 A (cm^2)	4.56	5.76	8.64
断面2次モーメント I (cm^4)	11.8	23.7	79.8
塑性断面係数 Z_p (cm^3)	6.6	10.6	23.7
単位重量 W (kgf/m)	3.58	4.52	6.77

３．実験結果および考察

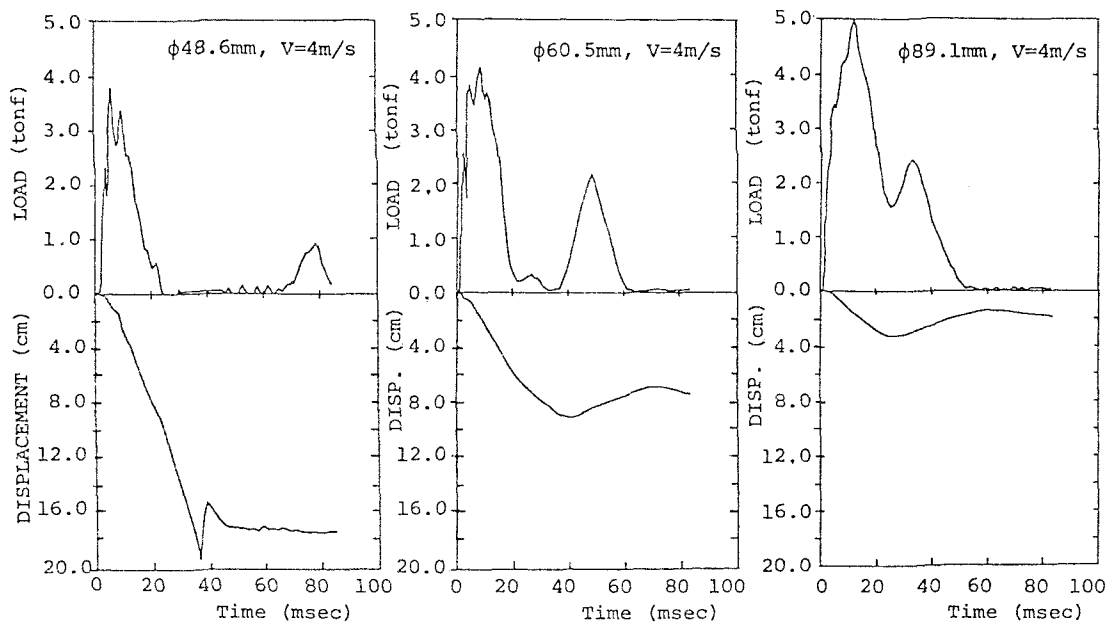
本研究では、載荷点に生じる局部変形量（局部めり込み量）を δ_L 、はりの全体応答によって生じる載荷点の変位量を δ_B 、局部変形と載荷点変位の総和を全変形量 δ_A と表わすことにする。高速載荷実験においては局部変形の大きさを直接測定することは非常に困難であるが、高速変形荷装置内の変位計で測定される変位量は、はりに与えた全変形量 δ_A に相当するので載荷点変位 δ_B との差から局部変形量 δ_L ($=\delta_A - \delta_B$) が求められる。

（１）荷重～変位関係

a. 鋼管径の大きさによる影響： 図-3(a), (b)にそれぞれ高速載荷および衝突載荷に対する荷重と載荷点変位の時刻歴の一例を示す。高速載荷および衝突載荷実験における荷重～変位関係は、計測した荷重～時間および変位～時間関係に基づいて求めた。図-4(a)は、高速載荷における鋼管径（径厚比）の相異による荷重～変位関係（以下、 $P \sim \delta_B$ 関係と呼ぶ）の一例である。鋼管径（径厚比）が大きくなるとはりの剛



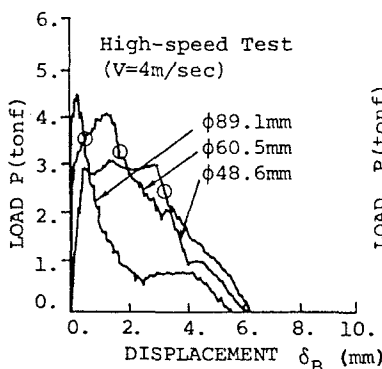
(a)高速載荷



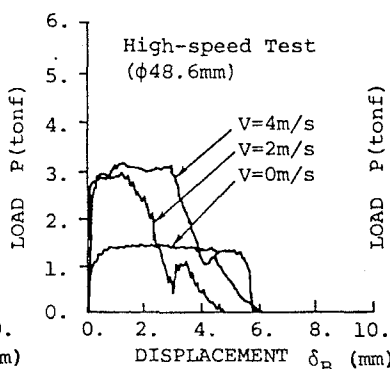
(b)衝突載荷

図-3 荷重・変位の時刻歴の一例

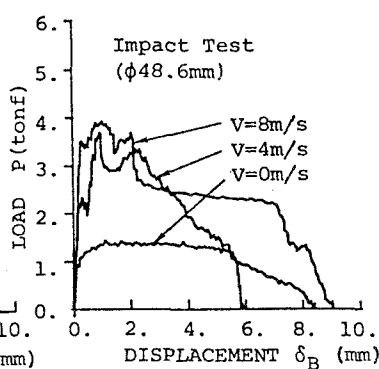
性が大きくなるため、最大荷重値は大きくなっていることが認められる。鋼管径（径厚比）が小さい場合（ $\phi 48.6\text{mm}$ ）は、最大荷重に到達した後も変形が増大しているが、径厚比が大きくなると（ $\phi 89.1\text{mm}$ の場合）最大荷重直後で急激に耐力が低下している。これは、固定端部付近の鋼管に座屈破壊が生じたことによると考えられる。本研究では、終局状態を最大荷重到達後荷重が減少し最大荷重値の約80%に低下した時点と定義し、このときの変位を終局変位と定めた。図-4(a)から、終局変位（図中、○印に対応する変位）は鋼管



(a) 鋼管径による相違

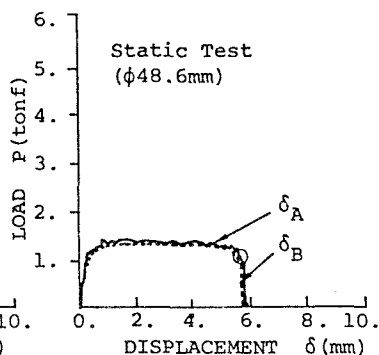
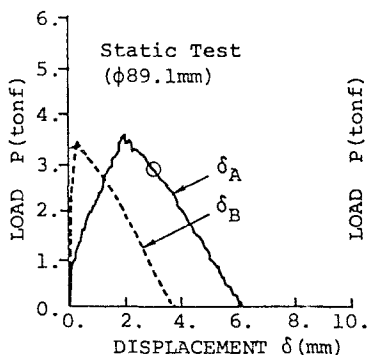


(b) 載荷速度による相違



径（径厚比）が大きくなるにつれて小さくなることが認めらる。

ｂ. 載荷速度の影響：図-4(b)に、異なる載荷速度に対する $P \sim \delta_B$ 関係の一例を示している。載荷速度が大きくなると最大荷重値はやや大きくなるが、本実験の速度範囲内では載荷速度が最大荷重の大きさに及ぼす影響は顕著でない。高速および衝突載荷の最大荷重値は静的載荷（ $V = 0\text{m/s}$ ）に比べ約2倍の値を示している。



(c) 局部変形による相違

図-4 荷重～変位関係

ｃ. 局部変形の影響：図-4(c)に、載荷点変位 δ_B および全変形量 δ_A と載荷荷重の関係を示している。図から、管径48.6mmの鋼管では局部変形（ $\delta_A - \delta_B$ ）は無視できるほど小さいが、管径89.1mmの場合の局部変形量は、はりの全体変形に比較して無視できないほど大きいことがわかる。また、終局変位（図中、○印に対応する変位）は、鋼管径（径厚比）が大きい方が小さい。これは、径厚比が大きい薄肉管では鋼管局部の剛性が小さく、局部変形が大きく生じるためと考えられる。したがって、径厚比が大きい鋼管の変形特性やエネルギー吸収特性を検討する際には、局部変形を考慮する必要がある。

(2) 最大荷重

実験で得られた荷重～時間関係における荷重の最大値を最大荷重とし、各実験における最大荷重と鋼管径の関係を図-5に示した。また、最大荷重と載荷速度の関係を図-6に示している。ただし、衝突実験に対する載荷速度は衝突時の重錘の速度であり、高速載荷実験においては載荷時から終局に至るまでの鋼管の変位速度（一定値）である。

ａ. 鋼管径（径厚比）の大きさが最大荷重に及ぼす影響：図-5より、静的載荷実験から得られた最大荷重（以下、静的最大荷重と呼ぶ）、高速載荷実験から得られた最大荷重（以下、高速最大荷重と呼ぶ）および衝撃載荷実験に対して得られた最大荷重（以下、衝撃最大荷重と呼ぶ）は、いずれも鋼管径が大きくなるにつれ増大する傾向を示している。

静的最大荷重と高速最大荷重ではその大きさが異なるが、鋼管径の大きさの相異による荷重の増加割合はほぼ同一である。しかしながら管径の増大と最大荷重との間には線形的な比例関係がみられず、管径の増大にともなって最大荷重の増加割合は小さくなる傾向が認められた。これは、管径が大きくなるにしたがって

局所的な剛性が小さくなるため固定端近くの鋼管下面に局所的な座屈変形が生じ、この結果はりとしての耐力が低下することによって考えられる。一方、静的载荷に対して、試験体は曲げ変形の挙動を示した。そこで、ここでは曲げだけの影響を考慮するものとする。静的载荷に対する鋼管はりの降伏耐力 P_y は、一般に次式から求められる。

$$P_y = \sigma_y \cdot Z_p / l \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Z_p ：塑性断面係数 (cm^3)、 σ_y ：降伏応力 (本実験で用いた鋼管の場合、 3900kgf/cm^2)、 l ：载荷点から固定端までの距離 (本実験では $l = 20.0\text{ cm}$) である。図-5中に、式(1)によって得られる降伏荷重と管径との関係を実線で示した。図から、式(1)による値は、鋼管径が小さい場合は静的载荷に対する実験値より小さいもののほぼ近い値を示すことがわかる。しかしながら、管径が大きい $\phi 89.1\text{mm}$ に対しては実験値より大きい値を与える。こ

の理由は、径厚比が大きい場合には固定端部に局所的な圧壊が生じることによる。一方、衝撃最大荷重 (図中、●印) は、鋼管径にほぼ比例的に増大している。つまり、動的荷重を受けてはりが運動するとき、载荷点の任意要素には外力、曲げモーメント、せん断力および慣性力が働いている。したがって、はりに衝突したロード・セルが検出する衝撃荷重には、はりのせん断力、慣性力および局部応答のために生じる荷重の3つを含んでいることになる。また、重錘衝突後の現象が極めて短時間であるので固定端部の局所的な圧壊が生じる以前に最大荷重に達するためと考えられる。衝撃最大荷重と高速最大荷重 (図中、○印) を比較すると、衝撃最大荷重の方が高速最大荷重よりやや大きい値を示している。これは上述したように、衝撃最大荷重には慣性力による荷重の増加分が含まれるためである。

ｂ. 载荷速度が最大荷重に及ぼす影響

図-6から、各管径とも载荷速度が大きくなるにつれて最大荷重がやや増大していることが認められる。荷重の増大は、ひずみ速度効果による応力の上昇のためと考えられる。しかしながら、本実験の速度範囲ではその影響は小さい。また、高速最大荷重 (図中、白印) と衝撃最大荷重 (黒印) を比較すると衝撃最大荷重の方がやや大きく、慣性力による影響が認められる。

(3) 衝撃吸収エネルギー

本研究では、衝撃吸収エネルギーを、実験から得られた荷重～変位関係において鋼管はりが終局変位に至るまでに与えられる外力仕事量として定義した。

ａ. はりの衝撃吸収エネルギー

(局部変形の影響を含まない)

(a) 鋼管径が衝撃吸収エネルギーに及ぼす影響

1) 静的吸収エネルギーと鋼管径の関係

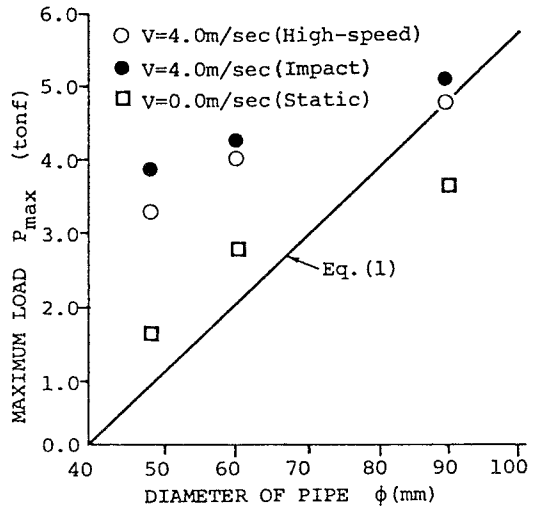


図-5 最大荷重～鋼管径関係

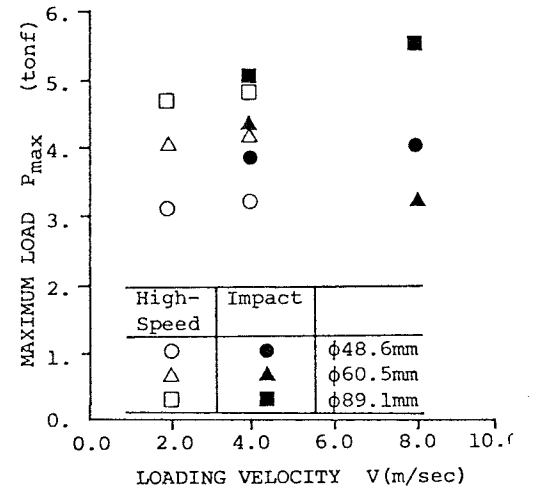


図-6 最大荷重～载荷速度関係

図-7は、鋼管径とはりの衝撃吸収エネルギーの関係を示している。図-7において、静的吸収エネルギーは鋼管径が $\phi 60.5\text{mm}$ までは増加する傾向を示すが、鋼管径が大きい $\phi 89.1\text{mm}$ の場合は逆に小さくなっている。鋼管径が小さい場合は、鋼管局部の剛性が大きく局部変形がほとんど生じないので、はりの変形がほとんど全体変形としてあらわれる。一方、径厚比が大きい $\phi 89.1\text{mm}$ の場合、管径の増大によってはりの耐力は上昇する（図-5参照）が、鋼管局部の剛性が小さくなるため局部変形量が大きくなる。

2) はりの衝撃吸収エネルギーと鋼管径（径厚比）の関係

図-7には、高速载荷に対する衝撃吸収エネルギー（○印）および衝突载荷に対する衝撃吸収エネルギー（●印）と鋼管径の関係も示している。高速载荷に対する衝撃吸収エネルギーは、鋼管径が大きくなるにつれて比例的に減少する傾向を示す。これは、静的吸収エネルギーの項でも述べたが、鋼管径が大きくなると全体変形に対する局部変形吸収エネルギーの割合が相対的に大きくなるためと考えられる。

（b）はりの静的吸収エネルギーと衝撃吸収エネルギーの比較

図-7に示したはりの静的吸収エネルギー（□印）と高速载荷の衝撃吸収エネルギー（○印）を比較すると、それぞれの吸収エネルギーの大小は鋼管径の大きさによって異なった傾向を示している。すなわち本研究における実験条件および範囲の結果、 $\phi 48.6\text{mm}$ では高速载荷の衝撃吸収エネルギーの方が大きく、 $\phi 60.5\text{mm}$ では両者はほぼ等しい。また、 $\phi 89.1\text{mm}$ では静的吸収エネルギーより衝撃吸収エネルギーの方が小さくなっている。一般的に、载荷速度が大きくなるとひずみ速度効果によって耐力は増大するので、高速载荷に対する吸収エネルギーの方が大きくなるはずである。しかしこの場合は、鋼管径（径厚比）が大きくなるにつれて局部変形を生じやすくなり、静的局部変形吸収エネルギーよりも衝撃局部変形吸収エネルギーの方が大きくなる（図-9参照）。したがって、局部変形の影響を含まない高速载荷の衝撃吸収エネルギーの方が静的吸収エネルギーよりも小さくなるものと考えられる。

一方、はりの静的吸収エネルギーと衝突载荷の衝撃吸収エネルギー（図-7中、●印）を比較すると衝撃吸収エネルギーの方がいずれの鋼管径においても大きい。これは、衝突载荷の方が高速载荷に比べ局部変形があまり現れず、全体変形が高速载荷に比べやや大きくなっているためである。

b. 局部変形吸収エネルギー

高速载荷実験では、载荷体の変位量をはりに与えた全変形量とみなしてその大きさを測定した。衝突载荷実験の場合には、測定装置の制約から局部変形量を直接測定することができなかったので、载荷点下部の変位だけを測定した。径厚比が大きくなるにしたがって局部変形による吸収エネルギーが大きくなることから、径厚比が大きい鋼管に対しては局部変形の効果を考慮する必要があると考える。ここでは、局部変形によって吸収するエネルギーに着目し、局部変形吸収エネルギーと鋼管径（径厚比）および载荷速度の関係について検討する。

高速载荷実験による局部変形吸収エネルギー E_{DL} は、荷重～全変形量関係から算定した吸収エネルギーと荷重～载荷点変位関係による吸収エネルギーの差として求めている。衝突载荷実験では、局部変形量を測定できなかったため、実験終了後鋼管に生じた残留局部変形量の値を用いて検討を行なった。

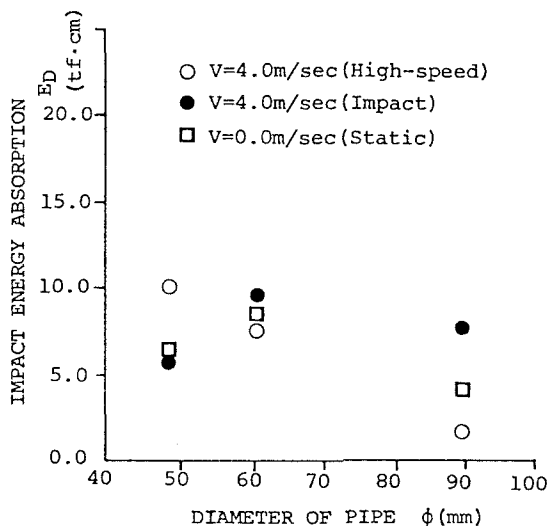


図-7 衝撃吸収エネルギー
～鋼管径関係

図-8に、静的めり込み実験で得られた荷重～めり込み量関係を示す。荷重と局部めり込み量の関係は、次式で与えられる¹⁰⁾。

$$P = \frac{1}{4} \alpha \sigma_y t^2 \left(\frac{1}{\phi} \right)^{0.5} \delta_L^{0.5} \dots\dots (2)$$

ここに、P：局部めり込み荷重 (kgf)、 δ_L ：局部めり込み量 (mm)、 α ：載荷体の形状に関する係数、t：鋼管の肉厚 (mm)、 ϕ ：鋼管径 (mm)、 σ_y ：鋼管の降伏応力 (kgf/mm²) である。

ところで、既往の研究で報告されている係数 α の値 ($\alpha=150$) は、先端形状がナイフエッジの載荷体に対して得られたものである。本実験では、ロードセルを直接に載荷体として用いているので、 α の値が異なることは明らかである。そこで、式(2)の関係を実験結果と比較することによって α を定めると、 $\alpha=68$ が得られた。この α の値を式(2)

に用いて算定した結果を、図-8中に実線で示している。式(2)による値はほぼ実験値に等しいことが認められる。

局部変形吸収エネルギーは、推定式(2)で得られる荷重～めり込み曲線において、最終残留めり込み量までの外力仕事量として算定し、図-9に鋼管径と局部変形吸収エネルギーの関係を、図-10に載荷速度と局部変形吸収エネルギーの関係を示した。

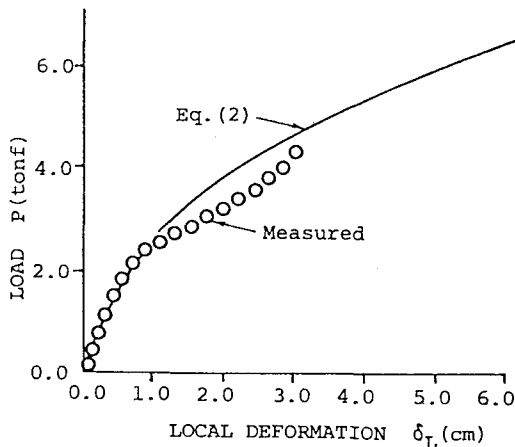


図-8 荷重～局部めり込み量関係

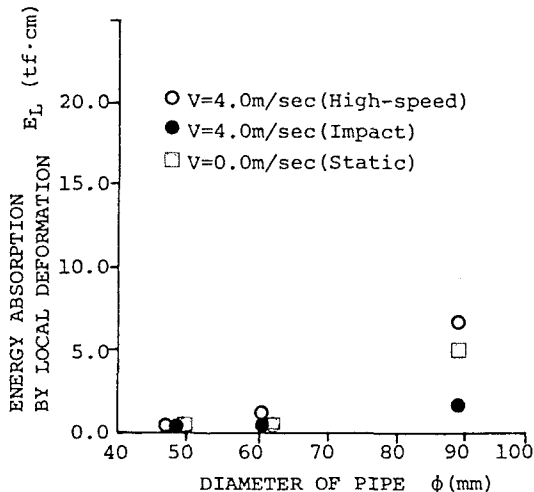


図-9 局部変形吸収エネルギー～鋼管径関係

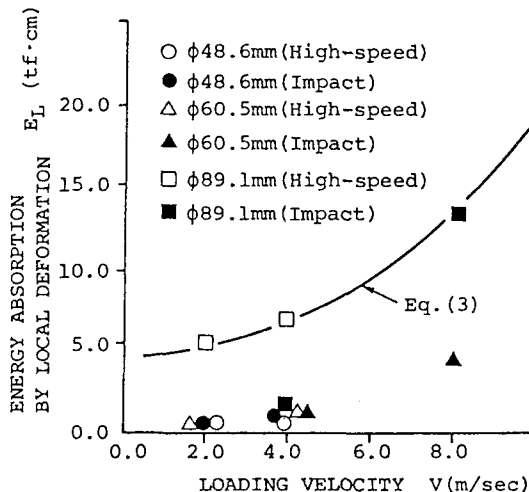


図-10 局部変形吸収エネルギー～載荷速度関係

(a) 鋼管径が局部変形吸収エネルギーに及ぼす影響

図-9から明らかなように、鋼管径が $\phi 60.5\text{mm}$ までは局部変形吸収エネルギーは極めて小さい。一方、鋼管径が大きい $\phi 89.1\text{mm}$ の場合は、全吸収エネルギーに対する局部変形吸収エネルギーの割合がかなり大きくなることが認められる。これは、鋼管径(径厚比)が大きくなるにつれて局部変形が増大するためである。

(b) 載荷速度が局部変形吸収エネルギーに及ぼす影響

図-10には、高速載荷と衝突載荷に対する結果を併せて示している。衝突載荷における載荷速度は重錘の衝突速度であり、厳密には高速載荷の載荷速度とは異なる。しかしながら、載荷点に生じる鋼管の局部変形は衝突直後の至短時間であり、局部変形の手速は高速載荷の変形手速と同等であるとみなす。図-10から、鋼管径の大きさによらず載荷手速が大きくなるにしたがって局部変形吸収エネルギーは増大する傾向が認められる。実験結果に基づいて、局部変形吸収エネルギーの上限値と載荷手速の関係を求めると次式が得られる。この式から、動的載荷に対する局部変形吸収エネルギーは載荷手速 V の2乗に比例することが推定できる。

$$E_{DL} = E_{SL} + \beta V^2 (\phi / t) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 E_{DL} ：衝撃局部変形吸収エネルギー (tonf・cm)、 E_{SL} ：静的局部変形吸収エネルギー (tonf・cm)、 ϕ ：鋼管径 (mm)、 t ：肉厚 (mm) である。

ただし、定数 β は式(3)と実験結果とを比較することによって求めた近似値で、本実験の場合 $\beta=0.0051$ であった。また、式中の載荷手速 V はm/secの単位での数値のみを用いる。式(3)を用いて算定した局部変形吸収エネルギーを、図-10中に実線で示している。図から、式(3)による値はほぼ実験値にほぼ等しいことが認められる。

c. 衝撃全吸収エネルギー (局部変形を含む)

(a) 載荷手速が衝撃全吸収エネルギーに及ぼす影響

図-11に、衝撃全吸収エネルギー $\bar{E}_D$ と載荷手速の関係を示している。衝撃全吸収エネルギーは載荷手速が4m/sec程度以下では、各鋼管径ともほぼ一定の値となっている。載荷手速が大きくなるにしたがってはりの耐力は増大するが、一方で局部めり込み量が増加するため載荷点変位 (載荷点における鋼管下面の移動量) は小さくなる。つまり、衝突直後における重錘の運動エネルギーは、局部めり込みによる変形と鋼管はりの移動によって消費されるので、局部めり込みによる変形が大きくなれば相対的にはりの移動量は小さくなることになる。その結果、はりの衝撃吸収エネルギーは減少し、局部変形吸収エネルギーは増大する。また、終局変位の値が載荷手速の影響をあまり受けていないことも衝撃全吸収エネルギーが載荷手速の影響をほとんど受けない結果を与えることになっている。終局変位の値が載荷手速によらずほぼ等しい値を示す理由の一つとして、載荷点変位と局部変形の大きさの割合が載荷手速の大きさによって変化するだけで、両者の和であるはり全体の変位量は変わらないことによるものと考えられる。

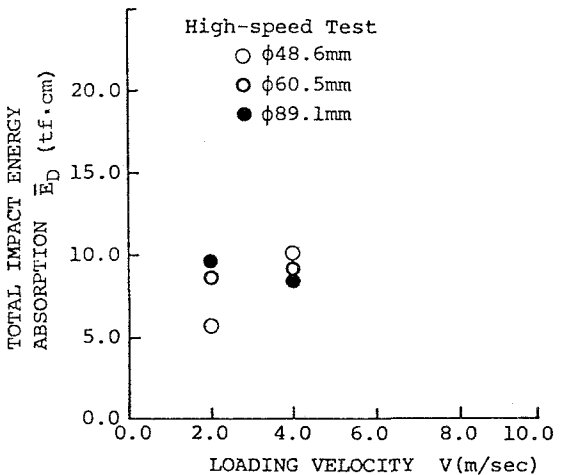


図-11 衝撃全吸収エネルギー～載荷手速関係

(b) 静的全吸収エネルギーと衝撃全吸収エネルギーの比較

図-12に、局部変形を含む静的全吸収エネルギー $\bar{E}$ (○印) と衝撃全吸収エネルギー $\bar{E}_D$ の比較を示す。図から、衝撃全吸収エネルギーの下限値と静的全吸収エネルギーはほぼ等しいことが認められる。一般に、載荷手速が大きくなるとひずみ手速効果によって耐力が上昇する。また、局部めり込みが卓越するために載荷点変位から求めた終局変位は局部めり込み量の増大によって小さくなる。このように、径厚比や載荷手速の大きさによって応答特性が変化するので、衝撃全吸収エネルギーは局部めり込みによる吸収エネルギーを含めて評価することが望ましい。局部変形による吸収エネルギーを含めた衝撃全吸収エネルギーを鋼管はりの限界性能として評価する際、静的全吸収エネルギーの大きさを衝撃全吸収エネルギーの下限値とみなして設計基準とすることにより、衝撃力を受ける場合には安全側となる。

d. 衝撃全吸収エネルギーの推定

前述のように、鋼管はりの衝撃全吸収エネルギーは、局部変形吸収エネルギーとはりの全体変形で吸収する衝撃吸収エネルギーの和である $\bar{E}_D$ で評価するのが望ましいと考えられる。そこで、衝撃全吸収エネルギー $\bar{E}_D$ を推定することを考える。

また、衝突または高速載荷の場合の衝撃全吸収エネルギー $\bar{E}_D$ の下限値は静的全吸収エネルギー $\bar{E}_S$ とほぼ等しい。したがって衝撃力を受ける場合、静的全吸収エネルギー量の大ききでその限界性能を評価することは安全側となる。

図-12をみると、静的全吸収エネルギーは鋼管径の増大とともにやや増加する傾向を示している。ところで、最大荷重は降伏曲げ応力が一定であれば塑性断面係数 Z_p に比例する。また、終局変位は弾性係

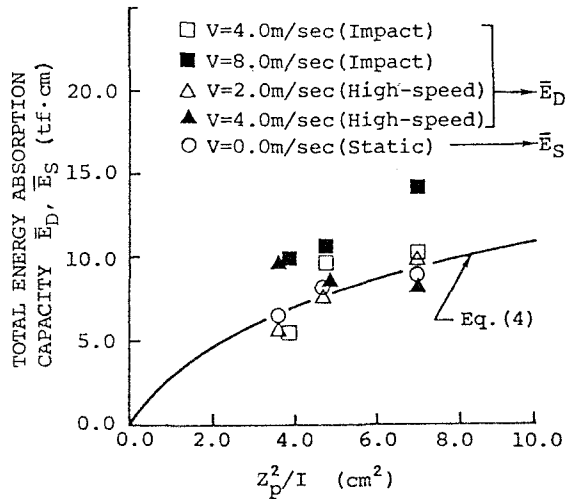


図-12 全吸収エネルギー～(Z_p^2/I)関係

数および固定端から載荷点までの距離が一定であれば断面2次モーメント I に逆比例することがわかっていて、吸収エネルギーは、この両者の積として求められるので、曲げに対する衝撃吸収エネルギー E_D は鋼管の降伏曲げ応力および弾性係数が一定であれば(Z_p^2/I)との関係で表すことができる¹⁾。図-12には、衝撃全吸収エネルギー $\bar{E}_D$ を(Z_p^2/I)との関係で示している。図から、鋼管径 $\phi 60.5\text{mm}$ ($Z_p^2/I=4.74\text{cm}^2$)まではほぼ(Z_p^2/I)に比例して大きくなる。一方、 $\phi 89.1\text{mm}$ ($Z_p^2/I=7.04\text{cm}^2$)の鋼管では、増加割合が小さくなっていることがわかる。したがって、径厚比がある大きさ以上になると、局部座屈の影響を考慮する必要がある。本実験の範囲で、静的全吸収エネルギー $\bar{E}_S$ と係数(Z_p^2/I)との関係を最小2乗法を用いて求めれば次式を得る。

$$\bar{E}_S = 3.50 \left(\frac{Z_p^2}{I} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 Z_p ：塑性断面係数(cm^3)、 I ：断面2次モーメント(cm^4)である。

式(4)の関係を、図-12中に実線で示す。式(4)で求まるエネルギーは、曲げで破壊する鋼管片持ばりの衝撃全吸収エネルギーの粗略の下限値を与える。

4. 結 言

本研究は、鋼管片持ばりの衝撃吸収エネルギーを定量的に評価する目的から、静的載荷実験、高速載荷実験および衝突載荷実験を行ったもので、鋼管径(径厚比)および載荷速度などが衝撃吸収エネルギーに及ぼす影響について考察した。本研究で得られた成果を要約すれば以下ようになる。

- (1) 衝突速度が 8m/sec 以下および載荷位置が固定端から 20cm の実験条件では、 $\phi 48.6\text{mm}$ で $V=8\text{m/sec}$ のときせん断変形が生じた以外、ほとんどの鋼管片持ばりが曲げ変形と局部変形によって破壊した。したがって、破壊に及ぼすせん断の影響を調べるためには、さらに載荷位置の検討やより載荷速度の大きい(8m/sec 以上)条件に対する実験を行う必要があることが認められた。
- (2) 荷重～変位関係において、最大荷重は静的載荷に対する場合より高速および衝突載荷の方がやや大きくなる。一方、終局変位は逆に静的載荷の方が大きくなる。
- (3) 鋼管径(径厚比)が大きくなるにしたがって、はりの全体変形で吸収する衝撃吸収エネルギー E_D は減少し、局部変形吸収エネルギー E_L は増加する傾向を示した。

(4) 局部変形吸収エネルギーとはりの全体変形で吸収するエネルギーの総和として評価した衝撃全吸収エネルギー $\bar{E}_0$ は、鋼管径（径厚比）が大きくなるにしたがって増加する傾向を示すが、その増加率は径厚比の増大とともに減少する。なお、本実験で用いた試験体の径厚比は28以下であるので、今後は実構造物の径厚比（40以上）に近い試験体を用いて検討する必要がある。

(5) 鋼管片持ばりの衝撃全吸収エネルギーの下限値は、静的全吸収エネルギーとほぼ同一である。曲げで破壊する衝撃全吸収エネルギーの大略の下限値は、式(4)を用いて推定できる。

本実験で得られた成果は、限られた試験体数に対する実験結果から得たものである。今後さらに多くの実験を行い、データの信頼性を向上させる必要があると考えている。

最後に、本研究を行うにあたり、建設省土木研究所 鈴木浩之技官、八千代エンジニアリング 松永 繁氏、渡辺岳志氏のご協力を得たことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 芦田和男、高橋 保：土石流の実態とそのメカニズム、土木学会誌、pp.2～16、1983.6
- 2) 水山高久：砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点、新砂防112、昭和54年8月
- 3) 渡辺、水山、上原、鈴木：土石流対策砂防施設に関する実験、土木技術資料22-2、1980
- 4) 大同淳之：構造物に作用する土石流の衝撃力、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第2部、昭和60年9月
- 5) 高橋 保：土石流の機構について、第19回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集、pp.250～262、1982
- 6) 高橋保、藤井由之、原田達夫：混合粒径からなる土石流の流動機構、昭和62年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集第2部、昭和62年4月
- 7) 矢澤、水山、下東：鋼管に対する土石流衝撃力実験報告書、土木研究所資料第2276号、昭和61.3
- 8) 齋藤、大野、石川、水山：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/ -8、pp.321～328、1987年10月
- 9) 新日本製鉄（株）：鋼製スリットダムの崩壊事故までの経緯と極限耐力について、新日本製鉄事故調査報告書PP.3～10、昭和57年3月
- 10) Charles P. ELLINAS & Alastair C. WALKER: Damage on Offshore Tubular Bracing Members, IABSE, Vol.42, pp.253～261, Copenhagen, Denmark, 1983
- 11) 建設省土木研究所砂防部砂防研究室：鋼製砂防施設部材の衝撃応答実験報告書、土木研究所資料第2600号、pp.26～27、昭和63年2月

(1988年10月12日受付)