

衝撃荷重を受けるメタルライナー取付構造物の耐荷力と変形能に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH AND DEFORMATION CAPACITY
OF ANCHOR SYSTEM OF METAL LINERS UNDER IMPACT LOADING

伊藤 義人* 八谷 徹** 宇佐美 勉*** 片岡 誠**** 草田 昭一*****

By Yoshito ITOH, Tohru YATAGAI, Tsutomu USAMI, Makoto KATAOKA and Sho-ichi KUSATA

In this paper, the ultimate strength and deformation capacity of anchor system of metal liners covering concrete surface subjected to impact loading are studied experimentally. Four specimens of two types are tested under impact cyclic loadings. Impulsive accelerations of weights simulating falling rocks, deformation and stress of the anchor system are measured. The experimental results under impact loading are compared with those under statically cyclic loading performed before by the authors. The energy absorption capacity of the anchor system of metal liners is discussed.

1. まえがき

衝撃問題として扱われる衝突現象は、隕石や小銃弾の高速衝突から落石などによる低速衝突まで幅広く、土木、建築に限らず理工学のいろいろな分野で研究されている。土木の分野においては、土石流や雪崩、落石などの自然災害による衝撃現象、船舶と橋脚、自動車とガードレールなどの衝突、原子力発電所などの重要建築物の耐衝撃、耐爆発の問題などが扱われている。

土石流や洪水時に発生する流木や巨礫、山岳部における落石による衝撃力³⁾⁻⁵⁾や衝撃吸収エネルギー¹⁾に関して、これまで種々の研究がなされてきた⁷⁾⁻¹²⁾。近年、土石流に含まれる粒径の大きな岩石の衝突により砂防ダム堤体の袖部や流路、排砂路、水路床及び通常のダムの排砂路などが摩耗損傷を受けたり、浸食、破壊されることが大きな問題となっている。被害の大きなものでは、砂防ダムの水たたき部のように、コンクリート表面は広い範囲にわたり1 m以上の深さの損傷を受けるといわれている。このような損傷を受けた部分に対しては、石材や鋼材、あるいは特殊コンクリートなどを用いて経験的に補修が繰り返されているが、巨礫の衝突に対する十分な防護対策が効果的になされていないのが現状である。

-
- * 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)
 - ** 工修 名古屋大学大学院生 (現 日本国土開発) (〒107 東京都港区赤坂4-9-9)
 - *** 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)
 - **** 名古屋大学大学院生 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)
 - ***** 栗本鐵工所 鋳物技術部機器設計部 (〒559 大阪市住之江区泉2-1-64)

このような巨礫の衝突に対して、コンクリート表面を衝撃と摩耗から保護する新しい方法として、コンクリートの表面を鋳鋼、鋳鉄製ライニング材（メタルライナー）で覆う構造が提案され、実際に試験的に採用されている。筆者らは、このメタルライナーの取付構造に関して、種々の形状のメタルライナーを対象にして定着構造の耐力特性と変形能、破壊性状の違いを明らかにするための静的載荷実験を行い、その結果を文献2）で報告した。そこでは、メタルライナーの形状について新しく考案した十字リブ付きライナーが耐力力や安定性の点で優れていることを実証し、静的荷重に対する一面せん断強度を求める簡易式も提案した。しかし、衝撃荷重の評価やメタルライナーの取付構造に対する動的効果については、これまでに検討されていない。

そこで、本研究ではメタルライナー取付構造物に対する静的載荷実験に引き続き、落下衝撃による動的載荷実験を取り扱う。そして、落下衝撃による荷重と消散エネルギーの検討、動的効果による局部破壊の有無の確認、落下物の種類による衝撃効果の比較をする。さらに、衝撃荷重に対するメタルライナー取付構造物の耐力力特性、変形特性及びエネルギー吸収特性を明確にし、衝撃力を考慮した設計法の基礎資料を提供する。

2. 実験計画

(1) 供試体

供試体は、一面せん断衝撃載荷実験と斜め方向衝撃載荷実験を行うため、図-1に示すように2種類の供試体を製作した。コンクリート躯体は、実際の構造を想定し三層構造になっており、第1層と第2層が普通コンクリート、第3層が高強度無収縮モルタルの層となっている。メタルライナーを固定するためのアンカーボルトは、長さが600mmで引き抜き破壊を起こさないだけの付着長さをとってある。これらの供試体は、基本的には文献2）の静的載荷実験に用いられたものと同じ形状であり実際構造をそのままモデル化している。

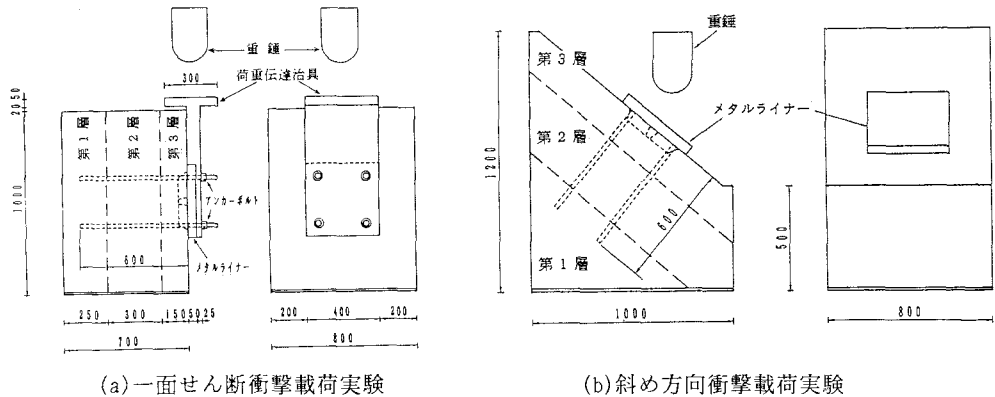


図-1 供試体形状 (単位 mm)

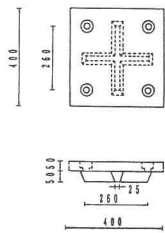
メタルライナーは、文献2）より実際の構造物に用いるのに適しているとされる図-2に示すような十字リブ付きの形状のものを選び、十字リブのリブ高さは静的載荷実験においてリブと鉄筋の耐力力の分担率や安定性、エネルギー吸収の点で最も優れていた5cmとした。

実験で用いた4体の供試体の一覧を表-1に示す。DAシリーズの2体は形状及び材質とも同一であり、一面せん断繰り返し衝撃載荷実験用の供試体である。一方、DBシリーズの2体は斜め方向衝撃載荷実験用である。供試体DB-1と供試体DB-2では、メタルライナーの材質はそれぞれマンガン系とクロム系となっており、メタルライナーの材質の違いによる衝撃力、耐力力特性、およびエネルギー吸収能に与える影響を調べるためのものである。

表－１ 供試体一覧

供試体名	実験方法	ライナー材質
DA－１	一面せん断	マンガン系
DA－２	繰返し衝撃载荷	マンガン系
DB－１	斜め方向	マンガン系
DB－２	繰返し衝撃载荷	クロム系

図－２ メタルライナー形状（単位 mm）

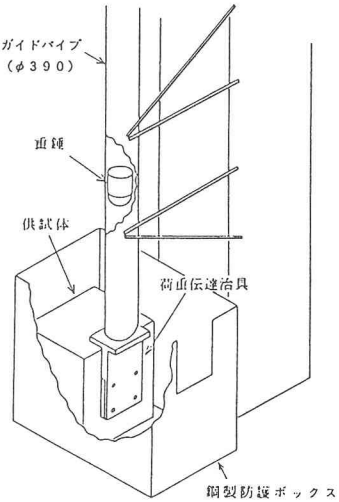


(2)実験装置及び実験方法

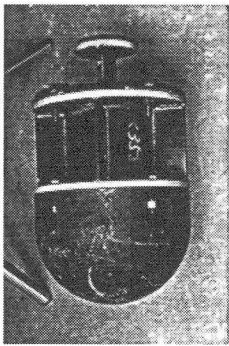
衝撃载荷装置を図－３に示す。この装置はガイド用パイプ（φ390mm）を通して、重錘を自由落下させて衝撃荷重を载荷するものである（最大落下高さ5m）。

重錘は、図－４に示すように重錘下部が半径15cmの半球状になっている。半球部分は焼き入れをした鋼鉄製（図－５（a））とコンクリート製（図－５（b））の２種類がある。いずれの重錘も、重錘全体の重量は108kgfとなっている。コンクリート重錘は、岩石に近い材料定数を持っており、実際の構造物の衝撃力を得るためのものである。

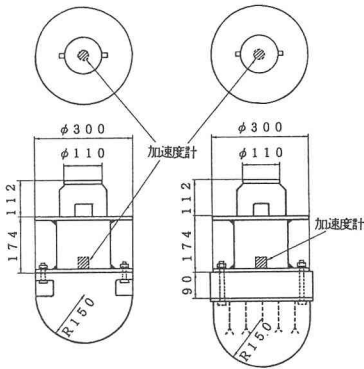
実験は、鉄重錘の落下高さを20cmから10cm刻みで高くしながら繰返し载荷した。なお、落下高さが50cm間隔の所では、それぞれ3回ずつ载荷した。また、鉄重錘の落下高さが1mに達した時点で、重錘を、



図－３ 衝撃実験装置



図－４ 重錘写真



(a)鉄重錘 (b)コンクリート重錘
図－５ 重錘形状（単位 mm）

コンクリート重錘に取り替え、落下高さ20cmから50cmまで繰返し载荷した。その後、再び鉄重錘を使用して実験を続行した。この载荷方法は、重錘の衝突面の材質が異なった時に、衝撃力やライナーの挙動がどのように変わるかを見るためである。

一面せん断衝撃载荷実験では、T型の荷重伝達治具をメタルライナーに取り付け、その上部平坦部に重錘を落下させ、メタルライナーに対して一面せん断衝撃载荷となるようにした。また、斜め方向衝撃载荷実験では、重錘をメタルライナー面に対して斜め方向から直接メタルライナー上へ落下させた。この時、重錘とメタルライナーとの衝突点が、メタルライナーの中央になるように供試体をセットした。

(3)測定項目

測定項目は両実験とも、重錘の加速度、メタルライナーのライナー面水平方向の変位2点及びライナー面と垂直方向の変位1点、アンカーボルトのひずみ12点及びリブのひずみ2点である。

重錘の加速度は、重錘フランジ内に衝撃用加速度計（TEAC製 508S 使用最大加速度 $\pm 10000g$ ）をネジで取り付け、チャージアンプ（TEAC製 SA-600）を介して、データレコーダ（SONY製 KS-616）2台及びFFT（小野測器製 CF-350）に接続して測定した。

ライナーの変位は、治具及びライナーにターゲットのついたL字形部材を溶接し、レーザー変位計（松下電工製 AN69116 最大測定範囲 $\pm 10mm$ ）を図-6

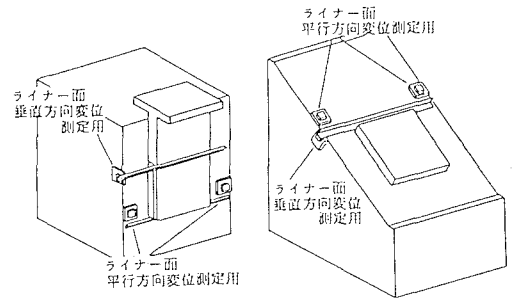


図-6 レーザー変位計の位置

に示す位置に取り付け、水平変位はデータレコーダ2台とFFTで、他はデータレコーダ2台に記録した。

アンカーボルトのひずみは、伸びひずみと曲げひずみが分離できるように、2枚を1組として、3種の深さの位置に、合計12枚のひずみゲージを貼付し、動ひずみ測定器（東京測器製 SDA-62B, SDA-82B）を介してそれぞれデータレコーダへ記録した。また、十字リブのひずみ測定のためにリブ前面に2枚のひずみゲージを貼付し、アンカーボルトのひずみと同様に測定した。

データレコーダは、最高速（38cm/s）で記録し、最低速（1.2cm/s）で再生して利用することによって、短い継続時間の応答波形を扱うことができるようにした。なお、測定と同時にシンクロスコープ（岩通電機製 SS-5702, SS-5116）により加速度、ひずみなどの波形を観察した。また、全実験を1/10000秒のシャッタースピードでビデオ録画して重錘のリバウンド量を測定した。

DB-1供試体では、大きな衝撃を受けると表面で加工硬化を起こして引張強度が高くなるというマンガン系材料で作られたライナーについて硬度変化を知るため、鉄重錘100cm、200cm及びコンクリート重錘60cmでの高さの載荷後にライナー表面の硬度を硬度計（proceq社製 EQUOTIP）を用いて測定した。

(4)載荷方法

土石流などを想定した実際の現象では、多くの岩石がライナーに衝突すると考えられる。そこで、本実験では落下高さを20cmから10cm刻みで上昇させ、それぞれの高さで1回ずつ重錘を落下させた。ただし、落下高さ50cmから50cm刻みの所では、3回ずつ重錘を落下させた。装置の可能最大落下高さは5mである。DA-1、DA-2、DB-1の各供試体では、鉄重錘を1mまで落下させた後、コンクリート重錘に取り換え、コンクリート重錘が崩壊するまで落下させた。その後、再び鉄重錘に取り換え、供試体が破壊するかまたは落下高さが5mになるまで実験を行った。DB-2供試体については鉄重錘のみを用いた。

(5)データ整理方法

データレコーダに記録した加速度、ひずみ及び変位は $\pm 1V$ の電圧のアナログデータであるので、まず全データをサンプリングタイム1msec（実際の時間は $1.2/38msec = 0.032msec$ ）でA/D変換し、MTにデータをおとし、大型計算機を用いて一次処理し、ファイル形式にした。その後、応答波形の必要部分を取り出し、パソコンを用いて各種処理を行った。なお、変位に関しては高周波ノイズが含まれていたため、デジタルローパスフィルターをかけたものを用いた。具体的には、まず波形をフーリエ変換し、変位の高周波成分をカットしたものを逆変換して求めた。

(6)材料試験

材料試験は、200トン万能試験機（前川製作所）を用いて行った。アンカーボルトの引張試験は3本の異形鉄筋D19試験体について行い、その結果から弾性係数、降伏応力、降伏ひずみ、ひずみ硬化係数、硬化開始ひずみを求めた。コンクリート及びモルタルの材料試験では、それぞれの層について3体の試験体を用意し、圧縮試験と引張試験を行った。そして、その結果から、コンクリートとモルタルの圧縮強度と引張強度を求めた。

3. 実験結果及び考察

(1)材料試験

供試体のアンカーボルトに用いた異形鉄筋D19の材料定数を求めるために、3本の試験体について200トン万能試験機を用いて引張試験を行い材料定数を求めた。試験結果の平均値を表-2に示す。

表-2 アンカーボルトの引張試験結果

ヤング係数 (kgf/cm ²)	降伏応力 (kgf/cm ²)	降伏ひずみ (%)	ひずみ硬化係数 (kgf/cm ²)	硬化開始ひずみ (%)
1.85×10^6	3.20×10^3	1.73×10^{-1}	4.66×10^4	1.31

また、マンガン系及びクロム系の2種類のメタルライナーの材料定数を求めるために行った引張試験の結果から、ヤング係数として、 1.82×10^6 kgf/cm²、 2.11×10^6 kgf/cm²、ポアソン比として0.38、0.29がそれぞれ得られた。

各供試体の第3層のモルタルと第1、2層のコンクリートの材料定数を求めるために、各供試体の実験終了後に圧縮試験及び引張試験をそれぞれ行った。材料試験には、各供試体作成時に作ったφ100mm×200mmの寸法の材料試験体を用いた。実験結果に最も影響を与える第3層のモルタルの材料試験結果の平均値を表-3に示す。なお、第1、2層のコンクリートの圧縮強度の平均値は、440kgf/cm²であった。

表-3 第3層（モルタル）の材料試験結果

供試体名	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
DA-1	682	39.0
DA-2	646	24.1
DB-1	708	43.2
DB-2	640	33.9

なお、コンクリート重錘のコンクリートの圧縮強度と引張強度の平均値は、 471 kgf/cm²と 32.8 kgf/cm²であった。

(2)一面せん断繰り返し衝撃載荷実験

衝撃応答波形

一面せん断繰り返し衝撃載荷実験の重錘の加速度、アンカーボルトのひずみ及びメタルライナーの変位の衝撃応答波形の一例を図-7に示す。加速度の衝撃応答波形は、重錘の衝突と同時に応答波形が立ち上がり、衝突後約1msec程度で消失している。第二波以降は、第一波に比べて極めて小さな減衰振動波形となっている。ひずみ、変位の応答波形は、加速度の応答波形の立ち上がりから1~2msec程度遅れて立ち上がっている。変位の応答波形は、高周波成分がのった形になっている。加速度の応答波形は第一波ではほとんど終わっている

のに対し、ひずみ及び変位の応答波形では第一波以降も波形が続いており、全体の応答継続時間も加速度に比べ長くなっている。

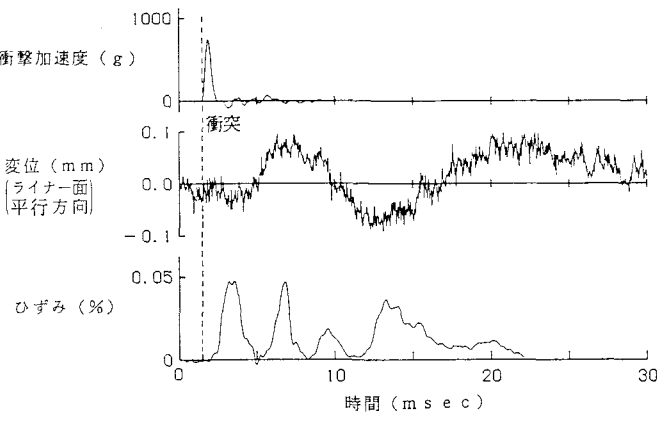


図-7 加速度、変位、ひずみの衝撃応答波形
(供試体 D A - 1, 鉄重錘, 落下高さ100cm)

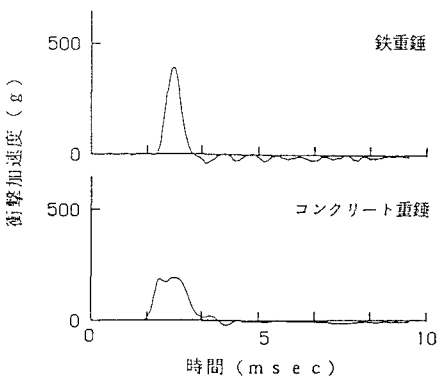
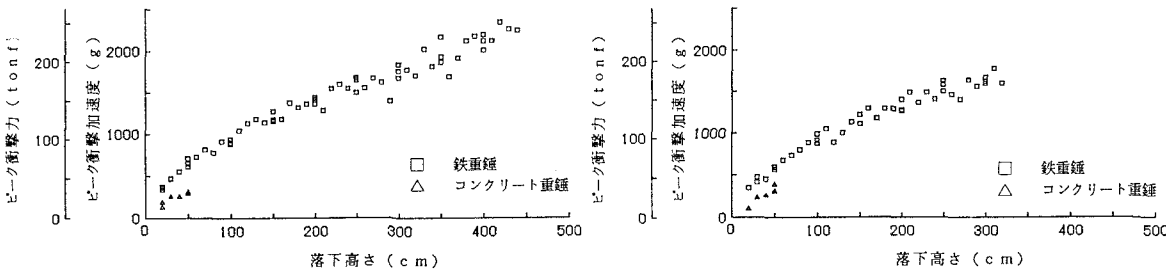


図-8 加速度の衝撃応答波形
(供試体 D A - 1, 落下高さ50cm)

鉄重錘とコンクリート重錘の同じ落下高さ（50cm）における応答加速度波形を比較したものを図-8に示す。コンクリート重錘の衝撃応答波の継続時間は、鉄重錘のものよりも2倍程度長くなっている。コンクリート重錘の応答波形の形状は、鉄重錘の鋭くとがった形状と異なり、なだらかな形状になっている。

落下高さとピーク衝撃荷重

重錘がメタルライナーに衝突する時に生ずる衝撃加速度に重錘の質量を乗じたものは、供試体に作用する衝撃力と考えることができる。図-9に、D A - 1とD A - 2供試体における重錘の落下高さと応答加速度波形からのピーク値を取ったピーク衝撃加速度（ピーク衝撃荷重）との関係を示す。



(a) 供試体 D A - 1 (b) 供試体 D A - 2

図-9 落下高さ～ピーク衝撃加速度（ピーク衝撃荷重）関係

重錘が供試体に与える衝撃荷重は、落下高さが高くなるほど大きくなっていることがわかる。図中△で示したコンクリート重錘が与える衝撃荷重は、□で示した同一の落下高さの鉄重錘のものに比べ約2分の1程度である。鉄重錘は衝撃载荷を繰り返しても、衝突による局部変形がみられなかったのに対し、コンクリート重錘では落下高さが高くなるにつれ局部変形が生じ、高さ50cmの落下で重錘にクラックが入り割れた。コ

ンクリート重錘によるピーク衝撃荷重が鉄重錘よりも小さくなるのは、このような重錘の局部変形によると思われる。重錘の落下高さとピーク衝撃荷重との関係は、図-9より供試体DA-1及びDA-2ではほぼ同一とみなすことができる。

衝撃エネルギー

重錘がメタルライナーに衝突する直前の速度 v_0 は $\sqrt{2gh}$ (g :重力加速度、 h :重錘の落下高さ) により求められる。図-7に示した時間～衝撃加速度曲線を、式(1)を用いて第一波を積分することにより、メタルライナーに衝突して離れる瞬間の重錘の速度が得られる。

$$v = v_0 - v_{EXP} = v_0 - \int_{t_0}^{t_1} a(t) dt \tag{1}$$

ここで、

$a(t)$: 衝撃加速度測定値、 v_{EXP} : 測定加速度の第一波を積分した値、(t_0, t_1): 積分区間
加速度計は鉛直上向きを正にして衝撃加速度を測定しているの、式(1)では、積分項の前に負符号がついている。この v_{EXP} と v_0 との関係を図-10に、 v_{EXP} と落下高さとの関係を図-11に示す。図より、 v_0 と v_{EXP} はほぼ同じ値である。すなわち、式(1)により重錘がメタルライナーに衝突する瞬間に重錘が持っていた速度は、衝突の直後には、ほぼ零になるということがいえる。また、鉄とコンクリートの重錘の落下高さが同じである時、両者の速度 v_{EXP} の値は一致しており、材質の違いによる影響はみられなかった。このことから、一回の衝突で重錘の失うエネルギーは、重錘の材質によらず落下高さにより決まる位置エネルギーとほぼ等しいということがいえる。衝突後の跳ね返り高さが落下高さに対して無視できる程度のものであることは、重錘のリバウンド量が非常に小さいというビデオによる観察結果からも確認された。

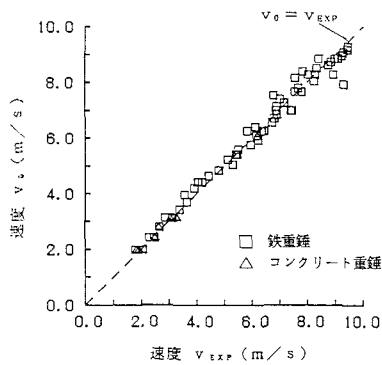


図-10 速度 v_{EXP} ～速度 v_0 関係 (DA-1)

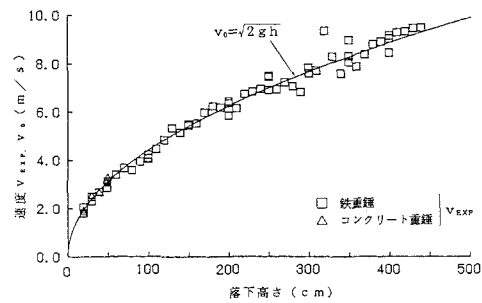


図-11 落下高さ～速度関係 (DA-1)

落下高さとピーク変位及びピークひずみ

図-12(a)に、DA-1とDA-2供試体に関する重錘の落下高さとメタルライナーのライナー面水平方向変位の応答波形のピーク値(最大値)の関係を示したものを示す。同様に、ライナー面垂直方向変位のピーク値と重錘の落下高さの関係を示したものを図-12(b)に示す。重錘の落下高さと変位のピーク値の関係は、定性的に3つの領域に分けられる。最初の領域は、重錘の落下高さが小さい範囲で、ほとんどライナーの変位は発生しない。2番目の領域では、重錘の落下高さにほぼ比例して小さな変位が発生する範囲であり、3番目の領域は、重錘の落下高さが大きくなると指数的に変位が大きくなる範囲である。このことは、ライナー面水平方向変位及び垂直方向変位ともにいえる。ただし、DA-1とDA-2の供試体では、この領域

の範囲に多少差が生じている。これは、メタルライナーのアンカーボルトの取付穴とアンカーボルトとの初期設置の位置関係などに原因があるのではないと思われる。

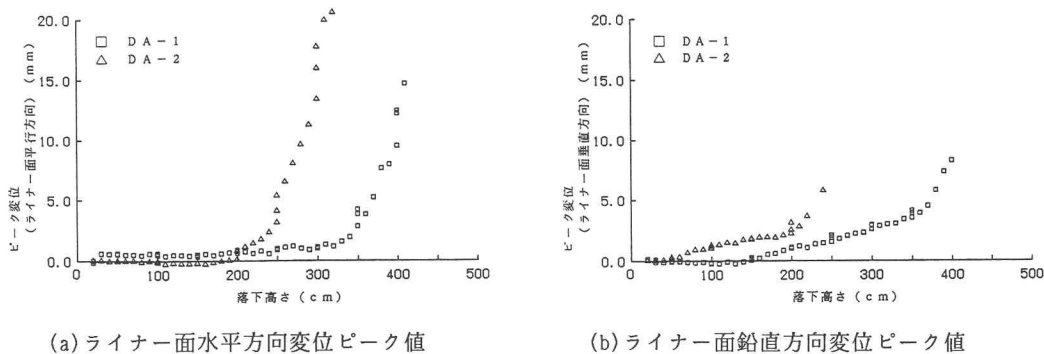


図-12 重錘の落下高さと言イナーの変位関係

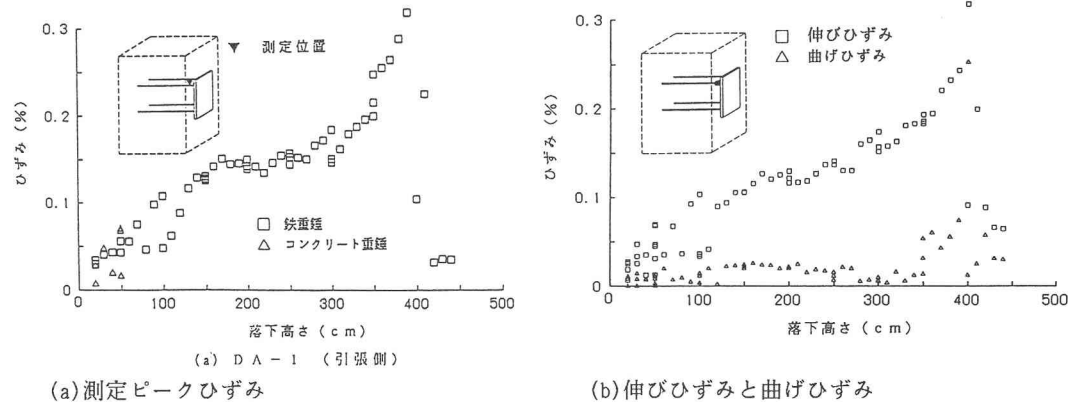


図-13 重錘の落下高さと言ンカーボルトのひずみ関係

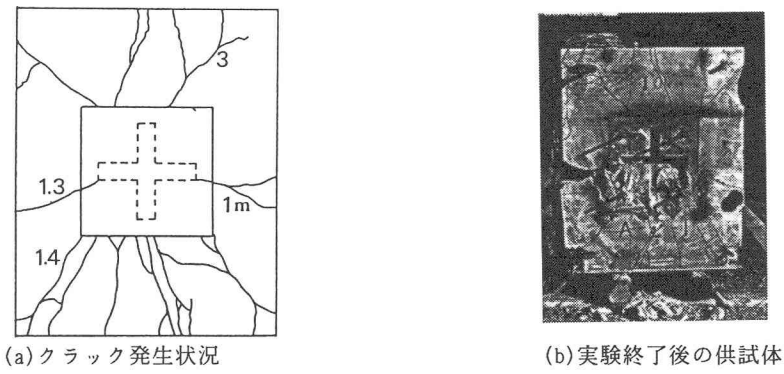


図-14 DA-1 供試体の崩壊状況

図-13 (a)にDA-1のアンカーボルトのひずみ応答波形のピーク値と重錘の落下高さの関係を示す。ひずみの測定点は、メタルライナー下面から3.1cm下の点である。ピークひずみの値も図-12で示した変位と同じように3つの領域に分けることができる。図-13 (b)に、この測定点での2つのひずみゲージの値を使って、伸びひずみ(□)と曲げひずみ(△)に分離した図を示す。この図より、アンカーボルトのひずみは、伸びひずみが卓越しているが、ライナー変位が急増しているところでは、曲げひずみも急増している

ことが分かる。

破壊状況

一面せん断衝撃载荷実験では、T型の荷重伝達治具が供試体の上面のコンクリートに接触するまで（20mmのライナー面水平方向変位）衝撃载荷を繰り返した。

図-14 (a)にD A-1 供試体のクラックの発生状況を示す。重錘の落下高さが1 mに達したあたりで最初のクラックが発生し、それ以降重錘の落下高さの上昇にともないクラックの数も増えていった。クラックはメタルライナーを中心に放射状に延びている。供試体はアンカーボルトのせん断変形（一部破断）と、メタルライナーのリップ前面のコンクリートに圧壊およびせん断破壊を生じ、メタルライナーの载荷辺が浮き上がる形で崩壊に至った。図-14 (b)にD A-1 供試体の実験終了後、メタルライナーを取り除いた供試体の写真を示す。

文献2)の静的载荷実験ではメタルライナーの十字リップ端から外方向へわずかにクラックが発生しているだけであったが、今回の衝撃载荷実験では、クラックがメタルライナーの周りへ放射状に進展した。

(3)斜め方向繰り返し衝撃载荷実験

衝撃応答波形

斜め方向繰り返し衝撃载荷実験の加速度、ひずみ及び変位の衝撃応答波形の一例を図-15に示す。加速度の応答波形は、一面せん断衝撃载荷実験のものと、ほぼ同じ形状である。しかし、载荷方向がメタルライナー面に対して斜め上からであるため、アンカーボルトのひずみの応答波形は圧縮側に大きく現れている。また、D Aシリーズでみられた加速度応答波の立ち上がりに対する他の応答波の時間的な遅れはD Bシリーズにはなく、ひずみ及び変位の応答波は加速度とほぼ同時に立ち上がっている。これは、D AシリーズではT型の荷重伝達治具を介してメタルライナーに载荷するのに対し、D Bシリーズでは重錘を直接メタルライナーに衝突させたことによるものと思われる。

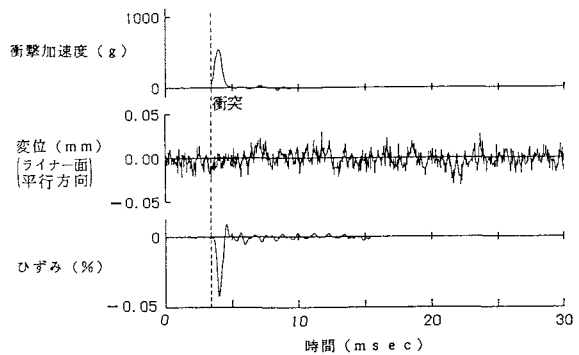


図-15 加速度、変位、ひずみの衝撃応答波形
(D B-2, 鉄重錘, 落下高さ100cm)

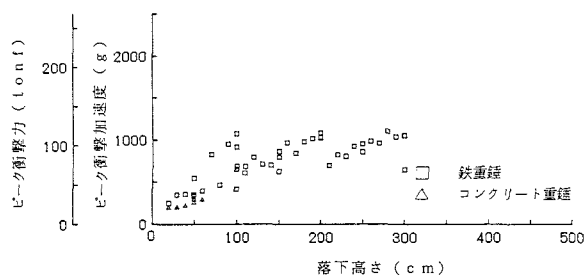
落下高さとピーク衝撃荷重

図-16に、D B-1とD B-2 供試体における重錘の落下高さとピーク衝撃荷重の関係を示す。D Aシリーズと同様落下高さが高くなるほどピーク衝撃荷重も大きくなる傾向にある。しかし、D Bシリーズのピーク衝撃荷重は、D Aシリーズにおける落下高さと同じ時のピーク衝撃荷重の50～70%の大きさになっている。これは、ピーク衝撃加速度より求めたD Bシリーズのピーク衝撃荷重は、重錘が供試体から受ける反力の鉛直方向の成分であることによるものと思われる。また、落下高さが高くなると、衝撃力の大きさは大きくばらつくようになる。これは、重錘がライナー面に斜めから衝突したのち、ライナー面を滑るなど複雑な動きをするためと考えられる。

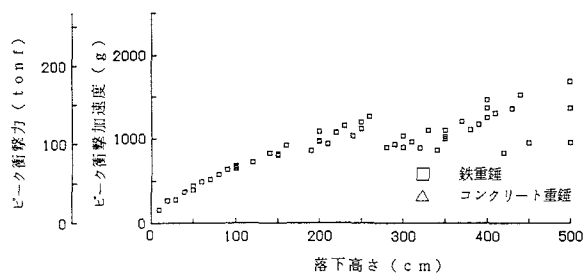
衝撃エネルギー

D Aシリーズと同様に、衝突速度 v_0 と応答加速度曲線の時間積分により求めた速度 v_{EXP} との関係及び落

下高さとの関係を、それぞれ図-17と図-18に示す。DBシリーズでは、重錘はメタルライナーに対して斜めの方向から衝突し、その後重錘は運動の方向を変えてガイド用の鋼製パイプの内側に衝突していた。ピーク加速度がDAシリーズより小さかったために V_{EXP} の値は V_0 より小さくなっており、重錘は衝突後にも下向きの速度を持っていたと言える。これは、衝突後、重錘の持っていたエネルギーは、DAシリーズと異なり、メタルライナーに全ては吸収されなかったと考えることができる。



(a) 供試体DB-1



(b) 供試体DB-2

図-16 落下高さ～ピーク衝撃荷重（ピーク衝撃加速度）関係

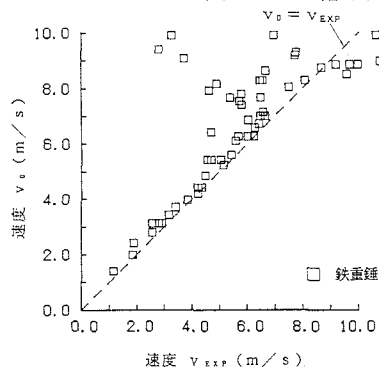


図-17 速度 V_{EXP} ～速度 V_0 関係（DB-2）

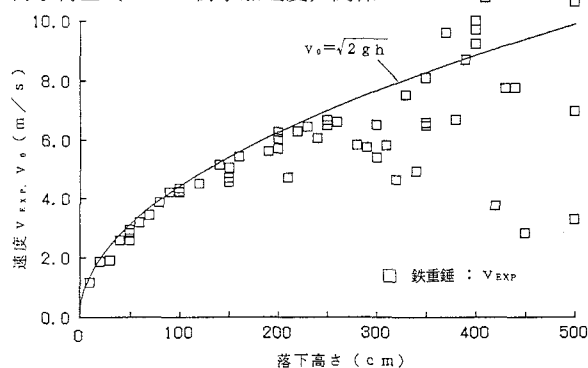


図-18 落下高さ～速度関係（DB-2）

落下高さとピーク変位及びピークひずみ

DBシリーズにおける重錘の落下高さとライナー面水平方向変位のピーク変位及びアンカーボルトのピークひずみとの関係を図-19、図-20にそれぞれ示す。ひずみ、変位のいずれも弾性範囲内の小さな値しか生じていない。落下高さ150cm辺りからアンカーボルトの引張側にひずみの増加が見られる。

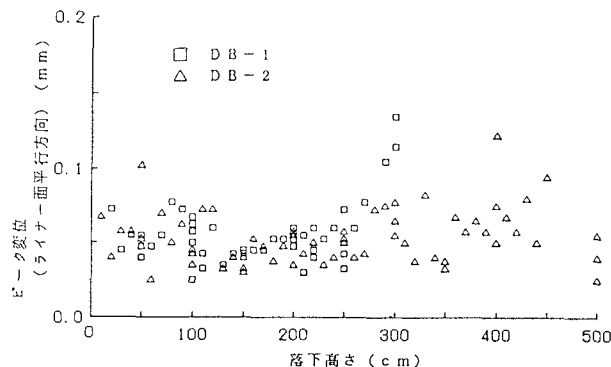


図-19 落下高さ～ピーク変位関係

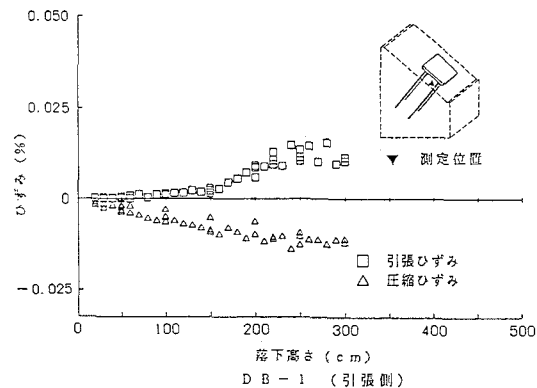


図-20 落下高さ～ピークひずみ関係

破壊状況

斜め方向衝撃载荷実験の D B - 1 供試体では、落下高さ 300cm まで载荷を繰り返した時点で、跳ね返った重錘の衝突によりガイドパイプの変形が大きくなったため実験を終了した。また、D B - 2 供試体では、最大落下高さ 500cm まで载荷を繰り返した。ただし、落下衝撃によるメタルライナーの定着部分についてはわずかにクラックが発生した程度で一面せん断実験のような破壊には至らなかった。D B - 1 では落下衝撃により発生し供試体の底面で反射してきた応力波により、供試体の上端部及び下端部に応力集中が生じたために、モルタルの層がブロック状に剝離したが、メタルライナー取付構造自体には、影響のないものであった。

メタルライナーの硬度変化

マンガン系鋳物材料は、一般に大きな衝撃を受けると表面で加工硬化し、引張強度が高くなり耐摩耗性が向上する。そこで、衝撃荷重载荷による硬度変化を知るため、D B - 1 供試体実験途中にショア硬度計（proceq社製 EQUOTIP）を用いて硬度を測定した。測定結果を表-4 に示す。

測定結果から、明らかにメタルライナーの硬度は変化しており、その変化の度合は 1m の落下高さまでは著しいがその後はあまり変化していないことが分かる。

表-4 硬度測定結果

測定時期	ショア 硬度Hs	ブリネル 硬度換算値
初期値	26.4	173
鉄重錘 1m	35.4	241
コンクリート重錘	34.9	238
鉄重錘 2m	34.6	235
実験終了時	38.9	266

表-5 最大荷重と最大変位

载荷 方法	供試体	最大荷重 (tonf)	最大変位 (ライナー面 平行方向) (mm)	最大変位 (ライナー面 垂直方向) (mm)
静的	A - 2	76.9	3.8	---
	C - 1	79.0	3.4	0.5
衝撃	D A - 1	252.6	16.8	3.1
	D A - 2	191.5	20.1	---

4. 静的载荷実験結果との比較及び吸収エネルギーの評価

(1) 静的载荷実験結果との比較

同一の供試体を使った静的载荷実験結果と今回の衝撃载荷実験結果を比較する。まず、一面せん断载荷実験結果の最大荷重を比較する。D A - 1、D A - 2 供試体での実験を通してのピーク衝撃荷重とライナー面平行方向変位及び垂直方向変位の最大値と静的载荷実験結果の最大値とを比較したものを表-5 に示す。衝撃载荷実験結果におけるピーク衝撃荷重の最大値は、静的载荷実験結果における最大荷重の約 3 倍の大きさとなっている。メタルライナー面平行変位及び垂直方向変位の最大値については、衝撃载荷実験値は静的载荷実験値の 5 倍以上の値となっている。

(2) 落下重錘の種類による衝撃力の違い

表-6 の各種材料の弾性係数、ポアソン比を代入して、ライナーとの衝突における衝撃力を Herz の算定式^{4), 6)}を使って求めたものと実測値を比較したものを表-7 に示す。但し、重錘、ライナーとも等方性弾性体と仮定した。なお、コンクリートの弾性係数 E_c は、圧縮強度 f_c' を用いた式 $E_c = 40000 f_c'^{1/3}$ より求めた。

表-6 材質による特性値

	ライナー	鉄重錘	コンクリート重錘	岩石
弾性係数 (kgf/cm ²)	1.8×10^6	2.1×10^6	3.1×10^5	2.0×10^5
ポアソン比	0.38	0.3	0.2	0.2

表－7 衝撃力の実験値及び理論値

落下 高さ (cm)	コンクリート重錘 実測ピーク衝撃力 (tonf)	鉄重錘実測 ピーク衝撃力 (tonf)	コンクリート 理論値 (tonf)	鉄 理論値 (tonf)	岩石 理論値 (tonf)	実測 理論 (鉄)	実測 理論 (コ)
20	16.5	39.2	51.1	88.3	43.7	0.44	0.32
30	27.2	51.8	65.1	112.6	55.7	0.46	0.42
50	38.6	68.4	88.5	153.0	75.7	0.45	0.44
100	—	105.3	134.2	232.0	114.8	0.45	—
200	—	156.5	203.3	351.6	174.0	0.45	—
300	—	193.1	259.4	448.4	221.9	0.43	—

Herzの算定式では、両物体とも等方性弾性体を仮定しているが実際には完全な弾性体ではないので、落下高さが高くなるほど誤差が生じると思われる。しかし、表－7の結果を見ると、鉄重錘では落下高さ300cmでも、実測値と理論値の比は0.43程度であり、20cmのときと比べてもほとんどかわらない。このため、実際の衝撃力は理論値に0.45ほどの係数を掛けることで評価できる可能性がある。また、コンクリートの場合も、データ数が少ないため正確ではないが、同じ程度の係数を掛ければ評価できそうである。

なお、参考に岩石の理論値も示したがこれはコンクリートの値にかなり近く、岩石の衝撃力はコンクリートのもので代用できると考えられる。

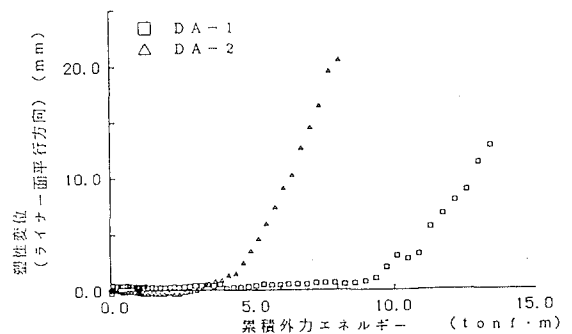
(3)静的吸収エネルギーと衝撃吸収エネルギー

静的一面せん断截荷実験による荷重～変位関係から、静的吸収エネルギー E_s は荷重～変位曲線において面積を計算することにより、外的仕事量として求めることができる。一方、一面せん断衝撃截荷実験において重錘が1回の衝突で失うエネルギーは、落下高さ(h)と重錘の重量(mg)をかけて求められる重錘のもつ位置エネルギー($E_k = mgh$)にはほぼ等しいことが実験結果からいえた。そこで、ここではこの重錘の位置エネルギーを重錘が供試体に与える衝撃エネルギーと考える。そして、繰り返し衝撃截荷した時の供試体に作用する衝撃エネルギーの和を累積外力エネルギー($\sum E_k$)とする。図－21に累積外力エネルギーとメタルライナーの平行方向の塑性変位との関係を示す。ここで、衝撃截荷実験における塑性変位は、各落下高さにおいて重錘の落下により衝撃截荷した後、重錘を取り除いた時のメタルライナーの残留変位を表している。

供試体DA－1、DA－2とも累積外力エネルギーの小さい範囲では、塑性変形を生じていないか、あるいはごく小さな変形でほとんど変化していない。落下高さが小さい段階で重錘が供試体に繰り返し与えた衝撃エネルギーは、弾性変形として貯えられ、供試体に損傷を与えていないと考えられる。

衝撃外力エネルギーがある限界を越えると、供試体に塑性変形が生じ始め、その後衝撃エネルギーの増加にともない塑性変位はほぼ線形的に増加している。このときの重錘の落下高さを弾性限界高さとする。弾性限界高さより低い高さからの落下による衝撃エネルギーは弾性変形の形で一時的に貯えられる

もので、供試体に損傷を与えるのは、落下高さが弾性限界高さを越える高さからの落下による衝撃エネルギーであると考え。このエネルギーは全てが塑性変形として吸収されるものとし、これを衝撃吸収エネルギー



図－21 累積外力エネルギー～塑性変位関係

$-\Delta E_D$ とする。また、衝撃吸収エネルギー ΔE_D を累積したものを累積衝撃吸収エネルギー E_D とする。

そこで、実験結果から得られたライナー面の平行方向に同一の塑性変位を生ずる静的吸収エネルギー E_s と累積衝撃吸収エネルギー E_D との関係を図-22に示す。

図のような E_D と E_s の関係を、 E_{s0} で分岐する2本の直線（バイリニア）で近似し、その関係を次のような式で表すことができる。

$$E_D = \alpha_1 E_s \qquad (E_s \leq E_{s0}) \qquad (2)$$

$$E_D = \alpha_1 E_s + \beta \qquad (E_s > E_{s0}) \qquad (3)$$

ここで、 E_D : 累積衝撃エネルギー、

E_s : 静的吸収エネルギー、

$\alpha_1, \alpha_2, \beta$: 供試体の材質、形状により決

まる係数（DA-2の場合 $\alpha_1=13.4$,

$\alpha_2=3.3, \beta=1.08$ ）

分岐点 E_{s0} に対応する累積衝撃エネルギー E_D は、実験においては、アンカーボルトに曲げひずみが生じ始め、急激に変位が増大し、終局状態に移行する点である。

また、静的载荷実験における最大荷重を経て5%除荷した時までの静的吸収エネルギーと、衝撃载荷実験における弾性限界高さから最終落下高さまでの累積衝撃エネルギーを表-8に示す。静的载荷の時の吸収エネルギーに対して、累積衝撃吸収エネルギーは10倍以上の大きな値となった。

5. 結 論

以下に、本研究で得られた主な結論を述べる。

- 1) コンクリート重錘では、鉄重錘に比べ衝突継続時間が長く、物体に与えるピーク衝撃力は小さな値が得られた。しかし、一回の衝突で重錘が失うエネルギーは重錘の材質によらず衝突前の重錘の持っていた運動エネルギーにほぼ等しいことが実験結果から分かった。
- 2) 衝撃载荷によっても十字リブ付メタルライナーの定着構造は、局所的な進行性の破壊は発生せず、崩壊モードも、静的载荷の結果とほぼ一致した。
- 3) 一面せん断载荷実験の供試体の崩壊モードは、静的载荷、衝撃载荷のいずれの実験においても、メタルライナーのリブ前面にせん断破壊を生じ、ライナーの载荷側が浮き上がる崩壊形状は共通している。しかし、供試体のクラックの発生状況は、静的载荷実験の供試体ではメタルライナーのリブ端から横方向へわずかに進展しているのみであるのに対して、衝撃载荷実験の供試体ではメタルライナーを中心に放射状に進展した。
- 4) 岩石とメタルライナーのように、中間に緩衝材のない衝突により発生するピーク衝撃力は非常に大きく、この衝撃力をそのまま静的に作用させて設計することは一般に困難である。そのため、エネルギー論的アプローチを基準に入れた設計法の確立が望まれる。
- 5) メタルライナーの静的及び衝撃载荷実験結果から、累積衝撃吸収エネルギーと静的吸収エネルギーとの関係をバイリニア型で近似し、定式化することができた。

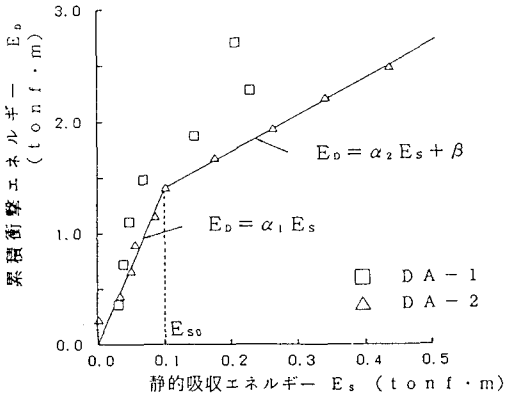


図-22 累積衝撃エネルギー～
静的吸収エネルギー関係

表-8 静的吸収エネルギーと累積衝撃
吸収エネルギーの比較

载荷 方法	供試体	吸収エネルギー (tonf・m)
静的	A-2	0.31
	C-1	0.26
衝撃	DA-1	5.56
	DA-2	5.05

今後の課題として、以下の項目が上げられる。

- 1) 繰返し衝撃力の履歴によって、ライナー取付構造物の吸収エネルギーや変位履歴に違いがでるかどうかを、異なる衝撃载荷パターン（たとえば、一定高さから繰返し）で確認する必要がある。
- 2) メタルライナー面に斜め方向からの荷重が作用したときのライナー面の水平、垂直方向へのエネルギー配分を明らかにし、一面せん断のエネルギー吸収能に結び付ける。また、重錘がメタルライナーに与えたエネルギーが、どのような割合で弾性エネルギーと塑性エネルギーに分担されるのか明らかにする。
- 3) 定着構造物の強度と変形能を算定するモデルを作成し、簡便に吸収エネルギーを算定し、それを用いた設計法を作成する。

なお、この研究の一部は平成3年度に栗本鐵工所からの委託研究費を使用して行った。実験供試体は、栗本コンクリート（株）により入念に製作された。また、実験に際しては、名古屋大学大学院生 増田進一君と栗本鐵工所鋳物事業部の皆様にお世話になった。ここに深謝致します。

参考文献

- 1) 石川芳治, 水山高久, 浅井信秀: 流木の衝突による鋼材の変形に関する実験的研究, 新砂防, Vol. 42, No. 5(166), Jan. 1990, pp. 11-20.
- 2) 伊藤義人, 倉坪和弥, 宇佐美勉, 片岡 誠, 草田昭一: メタルライナー取付構造物の耐荷力と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 38A, 1991. 3, pp. 1529-1542.
- 3) 建設省土木研究所: 土石流衝撃力関係資料集, 1981.
- 4) 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, Vol. 32, No. 1(112), 1979. 8, pp. 40-43.
- 5) 三好岩生, 鈴木雅一: 土石流の衝撃力に関する実験的研究, 新砂防, Vol. 43, No. 2(169), July 1990, pp. 11-19.
- 6) J. A. Zukas, T. Nicholas, H. F. Swift, L. B. Greszczuk and D. R. Curran: Impact Dynamics, A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY & SONS.
- 7) 斎藤英明, 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, 土木学会論文報告集, 第386号, 1987. 10, pp. 321~327.
- 8) 斎藤英明, 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. 35, 1989. 3, pp. 1057~1068.
- 9) 伊藤一雄, 石川信隆, 川嶋幾夫, 鈴木 宏: モルタル充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する実験的考察, 構造工学論文集, Vol. 37, 1991. 3, pp. 1581~1589.
- 10) 吉田 博, 榎谷 浩, 鈴木哲次: 敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第352号, 1984. 12, pp. 61~70.
- 11) 吉田 博, 榎谷 浩, 藤井智弘, 前川幸次: 鋼製落石防護柵の落石による衝撃特性, 土木学会論文報告集, 第409号, 1989. 9, pp. 75~84.
- 12) 水山高久, 川井 豊, 山野井節雄: 鋼製オープンダム部材の耐力実験, 新砂防, Vol. 43, No. 4(171), Nov. 1990, pp. 22-26.

(1992年9月21日受付)