

メタルライナー取付構造の耐衝撃特性とエネルギー吸収能に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON IMPULSIVE BEHAVIOR AND ENERGY ABSORPTION
CAPACITY OF ANCHOR SYSTEM OF METAL LINERS UNDER IMPACT LOADING

伊藤 義人* 片岡 誠** 川口 雅樹*** 草田 昭一****

By Yoshito ITOH, Makoto KATAOKA, Masaki KAWAGUCHI and Sho-ichi KUSATA

In this paper, the impulsive behavior and energy absorption capacity of anchor system of metal liners covering concrete surface subjected to impact loading are studied experimentally. Six specimens of three 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 are compared with those under different impact cyclic loading pattern performed before by the authors. The energy absorption capacity of the anchor system of metal liners is discussed and the design procedure using the energy criterion is suggested.

Key Words: impact loading, anchor system, metal liner, energy absorption

1. まえがき

日本の山岳地帯はそのほとんどが急傾斜地であり、毎年と言っていいほど全国各地で人命や財産を奪う土石流や崖崩れなどの土砂災害が発生している。ごく最近の例では、雲仙普賢岳において、土石流の発生が頻繁に報告されている。土石流は、土砂と水の混合体が速度3~20 m/sで流動するもので、その流れの先端に多くの巨礫を含んでいることが知られている^{1), 5), 6), 7), 8)}。

この土石流の被害をくいとめるために作られたコンクリート製の砂防ダムも、土石流に含まれる粒径の大きな岩石や流木などの衝突によって、ダム堤体の袖部や流路、水路床などが摩耗損傷を受けたり、浸食、さらには破壊に至らしめられることがある²⁾。被害の大きなものでは、砂防ダムの水叩き部において、コンクリート表面が広範囲にわたり5 m以上もの深さの損傷を受けているものもある³⁾。これらの被害に対して、石材やゴム、古レール、鋼板などの緩衝材を用いてコンクリート部分を保護しようという方法が研究、試行されているが⁴⁾、それには高い耐摩耗性を持った材料が要求されることや土石流などの大きな衝撃に対しても十分に耐え得るような定着構造が必要とされている。定期的な繰り返し補修工事には、多大な費用と労力を要し、安全面からも歓迎されない。

* 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 NKK) (〒230 横浜市鶴見区末広町2丁目1番地)

*** 名古屋大学大学院 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)

そこで、鋳鋼製のライニング材（メタルライナー）を図－１のように、砂防ダムの水通し部や水叩き部、土石流の流路、通常のダムの排砂路などのコンクリート表面に取付ける構造が検討され、実際に一部試行されている。ここではコンクリート表面を浸食、破壊から守るために耐摩耗性のライニング材を用い、重衝撃に対しても耐え得るようにその定着構造をとる必要がある。また、施工の自由度を確保するために、単体のライナーの大きさを抑えて、それを敷き詰める形態をとっている。

メタルライナー取付構造物の耐衝撃力特性などを明らかにするために、既に筆者らによって静的荷重載荷実験⁹⁾と衝撃荷重載荷実験¹⁰⁾が行われ、以下のような結果が報告されている。

- ・3タイプのライナー取付構造を用いて静的荷重載荷実験を行った結果、耐荷力や安定性、エネルギー吸収能の面で、十字リブ付きライナー取付構造（Rタイプ、後述）が最も優れていることがわかった。
- ・衝撃荷重載荷実験を行った結果、重錘が一回の衝突で失うエネルギーは、ピーク荷重やその継続時間は異なっても、重錘の材質の違いによらず重錘の持つ運動エネルギーにほぼ等しいことがわかった。
- ・一面せん断載荷実験の供試体の崩壊モードは、静的載荷、衝撃載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のモルタルにせん断破壊を生じ、ライナーの載荷側が浮き上がる崩壊形状は、ほぼ共通している。
- ・岩石とメタルライナーのように、緩衝材を介さない衝突におけるピーク衝撃力は非常に大きく、設計にはエネルギー論的アプローチが必要である。

本論文では、さらにこの種の定着構造の耐衝撃設計法を確立するための基礎的データを得るために、一昨年度の静的載荷実験、昨年度の衝撃載荷実験に引き続き、合計6体の供試体について、一面せん断衝撃荷重載荷実験と斜め衝撃荷重載荷実験を行った結果を報告する。一面せん断実験は、昨年度の実験と異なる衝撃載荷履歴によって、吸収エネルギーや衝撃挙動に違いがでるかを確認するために行い、斜め衝撃載荷実験は、斜め方向からの衝撃荷重に対する定着構造の挙動を確認するとともに、コンクリート表面に直接重錘が衝突する場合の衝撃特性を明らかにするために行った。

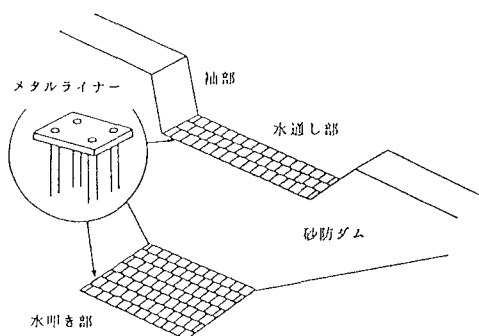
そして最終的に、メタルライナー取付構造の耐衝撃力特性や変形特性およびエネルギー吸収能について検討することにより、エネルギー吸収能に着目した設計方法を確立することを研究の目的としている。

2. 実験計画

(1) 実験目的および供試体

実験は、前回行われた衝撃載荷実験¹⁰⁾と同じように、コンクリート製および鉄製重錘の落下衝突によって、供試体に繰り返し衝撃荷重を作用させる方法で行った。前回の実験では、すべての供試体について重錘の落下高さを10cm間隔で順次上げて繰り返し衝撃載荷する方法がとられたが、今回の一面せん断実験では2種類の重量の重錘を用いて、3mの一定高さからの繰り返し落下による衝撃載荷方法をとった。これは、与える荷重履歴の違いによって、定着構造の耐衝撃特性にどのような違いが現れるのかを検討するためである。

また、今回の斜め衝撃載荷実験では、重錘の落下方法については昨年度と同様に順次高くしていく方法であるが、昨年度の約2倍の重量の重錘を用いて、一回ごとの衝突でより大きな衝撃力を与えて実験を行った。それによって得られた結果を、メタルライナー取付構造の耐荷力特性や変形特性、破壊性状およびエネルギー吸収能力に着目して考察することにより、設計指針確立のための基礎データを得ることを目的とした。



図－１ メタルライナー概念図

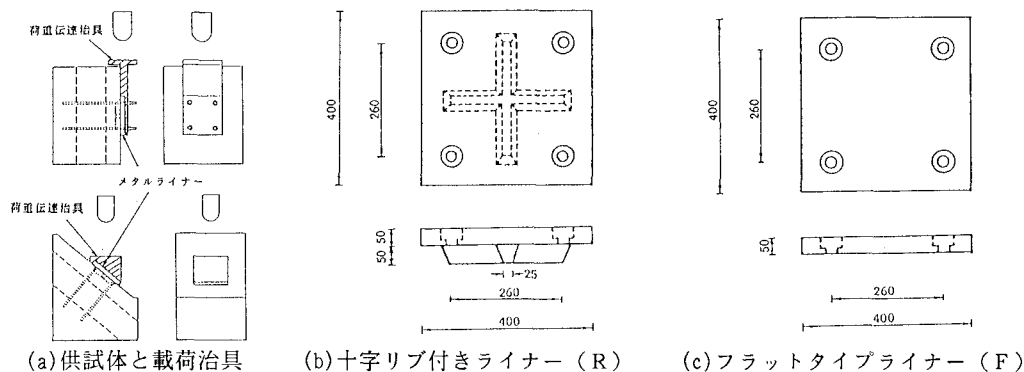


図-2 载荷治具付きの供試体とメタルライナー

表-1 供試体および载荷方法一覧

供試体	実験方法	ライナー形状	使用した重錘	载荷方法
DA-3	一面せん断 荷重载荷	Rタイプ	コンクリート 131.5kgf 鋼鉄 131.5kgf	コンクリート球 10cm ずつ上昇 鋼鉄球 3 m 繰り返し
DA-4		Rタイプ	コンクリート 226.5kgf 鋼鉄 226.5kgf	
DA-5		Rタイプ	コンクリート 131.5kgf 鋼鉄 131.5kgf	
DB-3	斜め方向 荷重载荷	Rタイプ	コンクリート 226.5kgf 鋼鉄 226.5kgf	コンクリート球 10cm ずつ上昇 鋼鉄球 10cm ずつ上昇 50cm ごとに 3 回繰り返し
DB-4		Fタイプ	コンクリート 226.5kgf 鋼鉄 226.5kgf	
DC-1		—	コンクリート 131.5kgf コンクリート 226.5kgf 鋼鉄 131.5kgf	

実験供試体は、一面せん断衝撃载荷実験3体（DAシリーズ）、斜め方向衝撃载荷実験3体（DB、DCシリーズ）の合わせて6体であり、供試体の概要を図-2および表-1に示す。また、今回の実験で使用したメタルライナーの形状も図-2に示す。なお、供試体名は、前回の実験と継続性を持つようにしてある。

一面せん断衝撃载荷実験における、DAシリーズの3供試体は前回と同一の形状であり、文献9)の静的载荷実験においてその優位性が認められた十字リブ高さ5cmのRタイプ（十字リブ付き）メタルライナー取付構造である。コンクリート部分は、実際の構造を想定して3層構造になっている。ただし、DA-3、DA-4の供試体は昨年度と同様に、第1、2層が普通コンクリート、最上部の第3層目が高強度無収縮モルタルの層となっているのに対し、DA-5供試体に関しては、施工コスト低減の可能性を探るために、コンクリート部第3層目に普通モルタルが使用されている。なお、取付構造に使用されるアンカーボルトは、引き抜け破壊が起こらないと考えられるだけの付着長さ（600 mm）をとっている¹²⁾。

一方、斜め方向衝撃载荷実験は、ライナー面に対して平行な方向と垂直な方向の両方に同時に衝撃荷重を受ける場合、取付構造の耐衝撃特性やエネルギー吸収の配分を明らかにするために、昨年と同一形状のDB-3供試体（Rタイプ取付構造）と平板ライナーを用いたDB-4供試体（Fタイプ取付構造）について行った。コンクリートの層構造およびアンカーボルトの付着長は、DA-3、DA-4に準じている。また、コンクリート表面に直接重錘が衝突する場合の衝撃力や、破壊形態などを把握するために、メタルライナーを取り付けないコンクリート1層構造の、DC-1供試体についても実験を行った。これらの供試体は、衝突面に対して仰角50度の方

(2) 実験装置および実験方法

衝撃荷重は、コンクリート製および鋼製の重錘をガイドパイプを通して自由落下させて、供試体に取り付けた載荷治具に衝突させることにより載荷するものである。重錘の最大落下高さは5mである。前回の衝撃載荷実験と異なるのは、斜め衝撃載荷実験においても、直接ライナーに重錘を衝突させるのではなく、図-2に示す載荷治具を使っていることである。

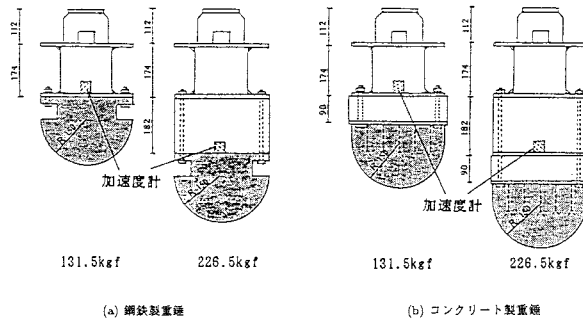


図-3 重錘形状と加速度計

重錘は、図-3に示すように4種類のものを用いた。重錘下部は半径15cmの半球状になっており、この部分がコンクリート製と鋼製の2種類を用意した。各々の重錘は、胴体部分に重りを取り付けることにより、131.5kgfと226.5kgfの2種の重量のものを用意した。コンクリート重錘は、自然の岩石をモデルにしており、鋼製重錘の結果と比較することにより、重錘の材質による衝撃力の違いを確認するためのものである。

それぞれの供試体に対する載荷方法については表-1にまとめて示してある。繰り返し衝撃載荷では、始めにコンクリート重錘を10cmの高さから、10cmきざみで落下高さを上げて繰り返し載荷を行い、コンクリート重錘にクラックが入った時点（普通は50cm程度で供試体は弾性挙動）で、鋼製重錘に取り替えて引き続き実験を行った。それぞれの供試体に対する実験では、基本的に同一重量のコンクリート製重錘と鋼製重錘を用いた。一面せん断衝撃載荷実験では、荷重履歴の違いによる挙動の違いを検証するために、3mの一定落下高さからの繰り返し載荷を行った。また、斜め衝撃荷重載荷実験では、供試体崩壊に至るまでの挙動を観察するために、順次落下高さを高くして繰り返し載荷を行った。実験は、供試体が崩壊するかあるいは落下高さが5mになるまで行った。

(3)測定項目およびデータ整理方法

測定項目は、重錘の加速度、メタルライナーのライナー面平行方向の変位2点およびライナー面垂直方向変位1点、アンカーボルトのひずみ12点およびリブのひずみ2点である。重錘の加速度は、重錘半球部上面中央に取り付けた衝撃用加速度計（TEAC製 508S 使用最大加速度 10000g）により、チャージアンプ（TEAC製 SA-600）を介して測定した。応答波形の扱いなどは文献10）と同様に行った。

ライナーの変位は、治具およびライナーにL字形部材を溶接してターゲットとし、レーザー変位計（松下電工製 AN69116 最大測定範囲 10mm）を前回の実験¹⁰⁾と同じ位置に取り付けて測定した。

アンカーボルトのひずみは、曲げひずみと伸びひずみが分離できるように2枚を1組にしてモルタル表面から深さ3cm、10cm、20cmの位置に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）を用いて測定した。また、十字リブのひずみに関しても、2点で測定した。

(4)材料試験

材料試験は、200トン万能試験機（前川製作所製 MR-200-ACT）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．コンクリートおよびモルタルの材料試験では，それぞれの層について3体ずつの円柱試験体（φ100mm x 200mm）を用意し，圧縮試験と引張試験（割裂試験，JIS A1113）を行い，その結果から圧縮強度，引張強度を求めた．

表－2 最上部モルタルとコンクリートの材料試験結果

3. 実験結果

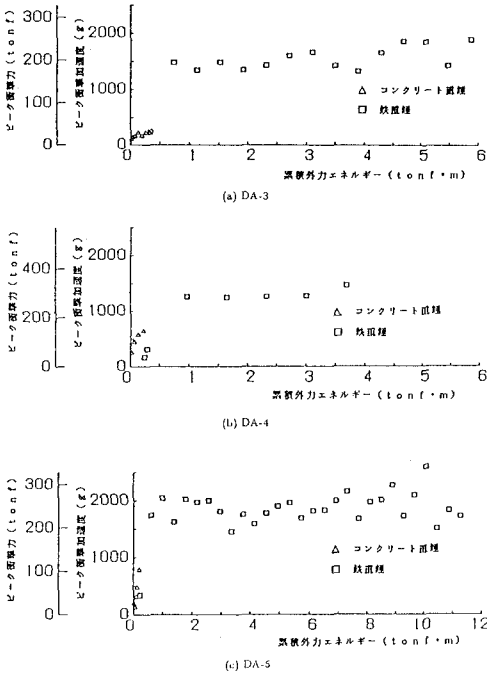
(1)材料試験

供試体用モルタルおよびコンクリートの材料試験の結果を，重錘用コンクリートの材料試験の結果とあわせて表－2に示す．ヤング係数は応力－ひずみ関係から最小二乗法を用いて求めた．なお，供試体の第1層と第2層のコンクリートの圧縮強度の平均値はそれぞれ557 kgf/cm²と481 kgf/cm²であった．

アンカーボルトの材料試験の結果を表－3に示す．弾性係数，ひずみ硬化係数は応力－ひずみ関係より最小二乗法を用いて求めた．硬化ひずみについては，降伏応力からひずみ硬化域での近似直線が立ち上がる点とした．

表－3 アンカーボルトの材料試験結果

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 (%)
1.87×10 ⁶	3.20×10 ³	1.71×10 ⁻¹	4.87×10 ⁴	1.20



図－4 累積衝撃外力とピーク衝撃加速度（衝撃荷重）

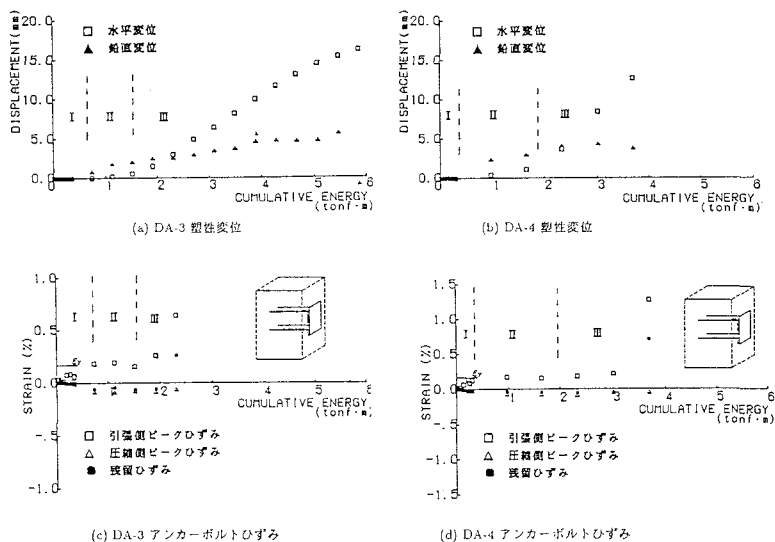


図-5 累積衝撃外力エネルギーと塑性変位, ひずみ関係

(2) 一面せん断繰返し衝撃荷重実験 (DAシリーズ)

応答波形: 重錘の加速度の応答波形は, 重錘の衝突と同時に鋭く立ち上がり, その第一波の継続時間は約 1 msec であった。変位の応答波形は, 高周波がのった形になっており, また加速度の応答波形の立ち上がりから若干遅れて立ち上がっている。ひずみの応答波形にも, 加速度の応答から遅れる傾向がみられる。これらは, 载荷治具を介して衝撃荷重を与えている事に原因があると思われる。これらの結果は, 概ね前回行われた衝撃载荷実験¹⁰⁾と同様の傾向を示しており, 衝撃応答波形には再現性が認められる。

ピーク衝撃荷重: 重錘がメタルライナーに衝突する際に生ずる衝撃加速度に重錘の重量を乗じたものは, 供試体に作用する衝撃力と考えることができる。また, 前回の実験結果¹⁰⁾から, 一面せん断衝撃载荷実験において重錘が一回の衝突で失うエネルギーは, 始めに重錘の持っていた位置エネルギーにほぼ等しいということがわかっている。そのことを踏まえてここでは, 重錘の重量 mg と落下高さ h を乗じて求められる位置エネルギー $E_i = mgh$ が, 重錘の衝突によって供試体に衝撃エネルギーとして与えられると考える。図-4 に DA-3, DA-4, DA-5 供試体について, 重錘が衝突前に持っていた位置エネルギーを累積したものと, ピーク衝撃加速度 (衝撃荷重) の関係を示す。

どの供試体についても, 鋼製重錘における衝撃荷重は, 実験終了までほぼ一定の値を示していることがわかる。つまり, 一定高さからの重錘の落下により与えられる衝撃荷重は, その繰返し数や供試体の損傷の度合いによらないことがわかる。

変位およびひずみ: 図-5 (a), (b) に累積衝撃外力エネルギーとメタルライナーのライナー面平行方向および垂直方向の塑性変位 (残留変位) との関係を示す。ただし, DA-5 供試体については, 変位計取付位置のモルタルが剝離して測定不能となったので, 割愛した。また, 累積衝撃外力エネルギーと, モルタル表面から深さ 3 cm の位置にあるアンカーボルトのひずみとの関係を図-5 (c), (d) に示す。

これらの関係を供試体ごとに整理すると, それぞれの図に示したように, 崩壊までの挙動を次のように 3 つの領域に分けることができる。

1) 領域 I

- ・ひずみの値はほぼ弾性域内で衝撃荷重に応じて線形的に増加する傾向にある。
- ・ライナー面垂直方向変位, 平行方向変位ともに, ほとんど変化がみられない。

2)領域Ⅱ

- ・ ひずみの値は降伏ひずみ程度でほぼ一定である．
- ・ ライナー面垂直方向変位が生じ始め，累積外力エネルギーに応じて増加する．
- ・ ライナー面平行方向変位には変化はみられない．

3)領域Ⅲ

- ・ ひずみの値は降伏ひずみを大きく越えて急激に増加する．
- ・ ライナー面平行方向変位が生じ始め，ほぼ線形的に増加する．

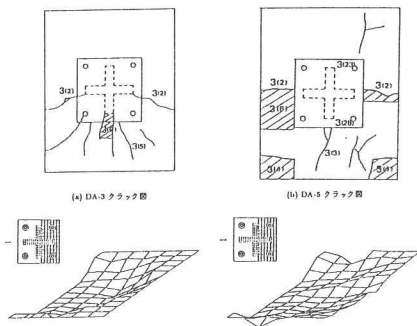
前回行われた一面せん断衝撃载荷実験¹⁰⁾におけるDA-1，DA-2供試体の実験結果においても，同様の段階的な挙動がより明白に確認された．このような挙動は，次のように考えることで説明できる．

まず，領域Ⅰにおいては，アンカーボルトは弾性域内にとどまっており，衝撃荷重に応じて弾性挙動を示し，したがって定着構造自体にも塑性変位を生じない．その後，衝撃荷重が増加してくると，メタルライナーとモルタルの境界部分のアンカーボルトが降伏に達し，この部分で塑性ひずみを生じてアンカーボルトが伸び始める．しかし，メタルライナーは十字リブ前面のモルタルにより平行方向変位を拘束されているので，ライナーの载荷側が浮き上がる方向に回転する形となってライナー面垂直変位が生じる．この間，測定位置（モルタル表面から3cmの深さ）のアンカーボルトのひずみは，ライナーとモルタルの境界部分の塑性ひずみが卓越しているので，むしろ一定の値にとどまっていると考えられる．

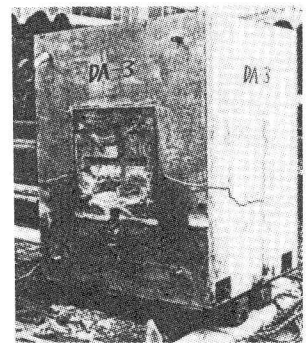
また，領域Ⅱの間に十字リブ前面のモルタルがせん断面を形成して，ついにせん断面に滑りを起こして，領域Ⅲに移行する．この領域にはいると，アンカーボルトは4本とも曲げを伴った伸び変形を起こし，ライナー面平行方向に変位が生じてくる．

破壊性状：一面せん断衝撃载荷実験では，アンカーボルトが破断するか，T型荷重伝達治具と供試体のコンクリート上面にある隙間（20mm）が無くなった状態で実験終了とした．供試体は，重錘の落下回数にともなってメタルライナーの周りへ放射状にクラックを進展させつつ，最終的にアンカーボルトの曲げとせん断を伴う伸び変形（一部破断）すると同時に，十字リブ前面のモルタルがせん断破壊を起こして，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．写真－1にDA-3供試体の崩壊後の写真を示す．崩壊に至るまでに繰り返した，高さ300cmからの鋼製重錘の落下回数は，DA-3供試体が14回，DA-4供試体が5回，そしてDA-5供試体が28回であった．

DA-5供試体は，最終的な崩壊形態は他と同様であったが，崩壊に至る過程においてモルタル部分がかなりブロック状に剥離しており，隣接するライナー取り付け部のモルタルを破壊するため，実際に用いられるには不向きであると思われる．図－6に，それぞれDA-3，DA-5供試体について，クラック図と十字リブ前面モルタルのせん断破壊図を示す．载荷中に発生したクラックおよびアンカーボルト破断時の重錘落下高さ（m）と繰り返し落下回数（括弧内）についても図中に示す．せん断破壊図は，実験終了後，ライナーを取り外して深さを測定して作成したものである．



図－6 クラック図および破談面図



写真－1 DA－3

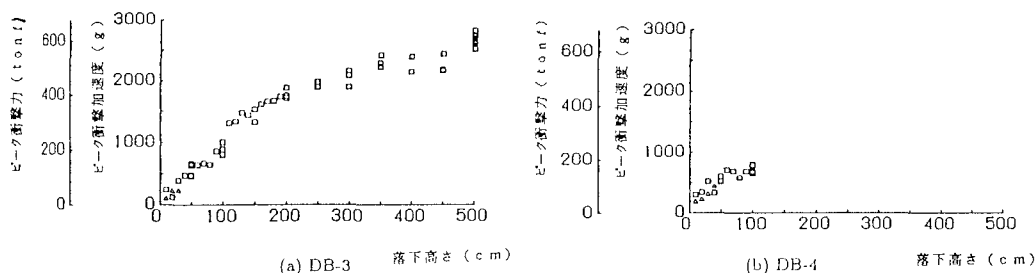


図-7 重錘の落下高さ とピーク衝撃加速度 (衝撃力)

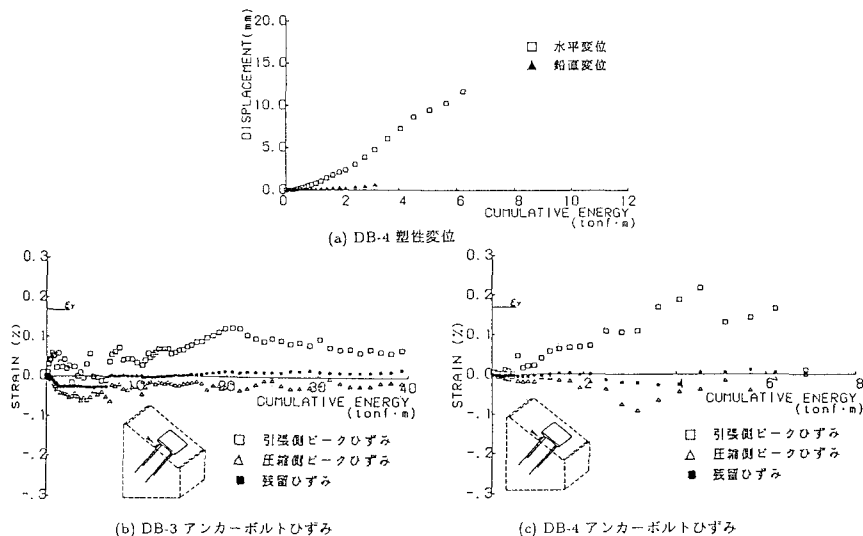


図-8 累積衝撃外力エネルギーと塑性変位, ひずみ関係

(3)斜め方向繰り返し衝撃荷重実験 (DBシリーズ)

ピーク衝撃荷重: 図-7に重錘の落下高さ とピーク衝撃加速度 (衝撃荷重) との関係を示す. DB-4供試体については, 加速度計の不調で落下高さ100cmまでしか測定できなかった. いずれの供試体も, 重錘の落下高さにつれて衝撃荷重が増加しており, 落下高さ100cmまでの増加勾配はよく似ている.

変位およびひずみ: 図-8に, 累積衝撃外力エネルギーと塑性変位およびアンカーボルトのひずみの関係を示す. DB-3供試体については, 崩壊に至るまでライナー面平行変位はほとんど生じておらず, アンカーボルトのひずみも弾性範囲内の値しか出ていない. それに対してDB-4供試体では, ライナー面平行変位が累積衝撃外力エネルギーに応じてほぼ線形的に出ている. この二つの供試体の違いは, 十字リブの有無であり, DB-3供試体ではこのリブがライナー面平行変位を拘束している. また, DB-4供試体ではライナーはほとんど浮き上がり, アンカーボルトはほぼ直接せん断の形で変形し, 伸び変形をしていない. この結果, 供試体崩壊時においても, 一面せん断実験に見られるような急激なひずみの立ち上がりはみられない.

しかし, 前回の実験も含めて, いずれの斜め載荷実験供試体においても, 若干ながらライナー面垂直方向変位が生じており, ひずみの値も引張側に大きく出ている. この傾向は一昨年度の静的載荷実験ではみられず, 衝撃荷重を受けた場合に特有の現象といえる. これは, 重錘の衝突の瞬間にライナー面垂直方向に衝撃圧縮力が作用し, 次の瞬間にその反動でライナーが浮き上がるような挙動が生じるためと考えられる.

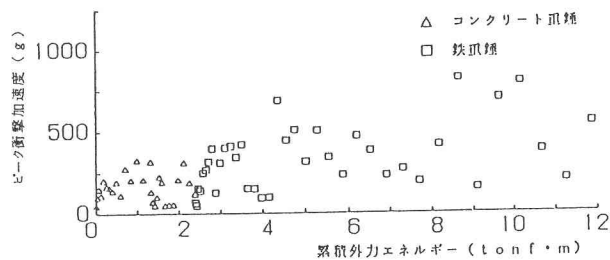
破壊性状: DB-3供試体は, 重錘の落下回数が増えて落下高さが高くなるにしたがって, ライナー周辺部の

モルタルにクラックを進展させつつ、最大落下高さである500cmに至って実験を終了した。実験途中で、供試体下側のモルタル部が応力波の反射による応力集中によってブロック状に剥離したが、取付構造自体は崩壊するに至らなかった。

DB-4供試体は、Fタイプの取付構造であるが、重錘落下高さ250cmの3回目までに4本すべてのアンカーボルトの直接せん断的な破壊により崩壊に至った。実験途中において、DB-3供試体と同様な供試体下側のモルタル部のブロック状剥離を起こしたが、取付構造自体には影響のないものであった。

(4)斜め方向繰り返し衝撃荷重実験（DCシリーズ）

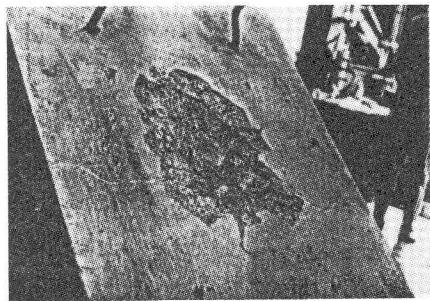
衝撃応答波形：コンクリート製重錘、鋼製重錘による衝撃加速度波形のいずれについても、その継続時間は2 msec～2.5 msecと、他の供試体に比べて2倍程度長い。これは、供試体のコンクリート表面に直接重錘を衝突させているためである。昨年の実験からも、コンクリートと鉄の衝突では、鉄と鉄との衝突の場合に比べて、加速度応答波形の継続時間が2倍程度長いことが確認されている。



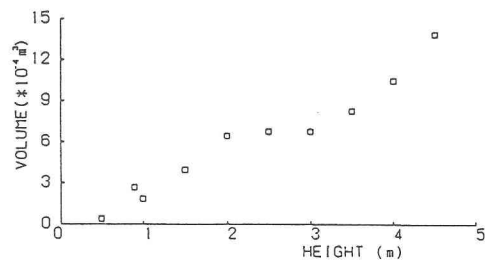
図－9 DC－1の累積衝撃外力エネルギーとピーク衝撃加速度（衝撃荷重）

ピーク衝撃荷重：図－9に累積外力エネルギーとピーク衝撃加速度（衝撃荷重）との関係を示す。この供試体の場合、衝撃加速度にかなりのばらつきがある。重錘の衝突によって、コンクリート躯体はその衝突位置の表面に剥離破壊を生じ、実験が進むにつれて剥離部の深さ、広さを進展させていった。そのために、重錘の衝突位置が安定せず、衝突のしかたも一定ではない状態であった。加速度に大きなばらつきがあったのはこのためであると思われる。

破壊性状：先に述べたように、供試体の重錘との衝突部分は次第に深く広く割れていき、重錘の最大落下高さである5 mに達して実験を終了した（写真－2）。衝突部分のコンクリート剥離の形状は、写真からわかるように楕円形のおわん状であり、これを円錐形で近似してその容積を計算した。図－10に落下高さと剥離部分の容積との関係を示す。実験では、供試体に数本の細かいクラックが衝突部から進展したが、供試体自体が割れて破壊するというようなものではなかった。



写真－2 DC－1



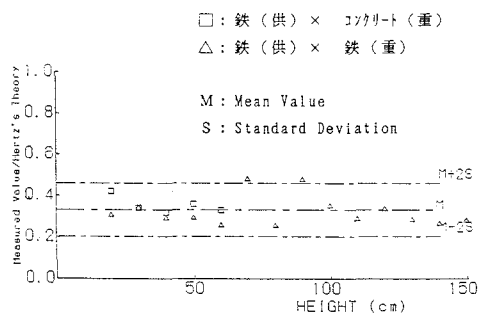
図－10 重錘落下高さと剥離部分の体積

4. 衝撃力とエネルギー吸収能

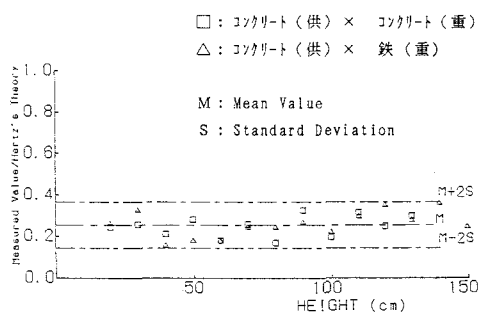
(1) 重錘と供試体の種類による衝撃力の違い

加速度の衝撃応答波形についてはDC-1供試体のところで述べたように、鋼製重錘のものは鋭くとがり、コンクリート重錘のものは頭がつぶれたようなものになっている。コンクリート重錘はDAシリーズにおいても高さ10cmから10cmずつ上昇させながら落下させていったが、ピーク衝撃加速度について見てみると、DAシリーズではコンクリート重錘と鋼製重錘との載荷履歴が異なるため比較はできないが、昨年度のDAシリーズとまったく同じ条件で行ったDA-3については値自体は前回の実験結果とほぼ同様になっている。

Hertzの衝突理論¹⁶⁾から得た式に今回の実験におけるポアソン比、ヤング係数を代入して得られた衝撃力の値を実験により得られた値と比較した。その比と落下高さとの関係はDB-1とDC-1について図-11(a), (b)にそれぞれ示す。コンクリート表面に直接重錘が衝突するDC-1と、前回の実験結果であるライナーに直接重錘が衝突しているDB-1が直接比較することができる。図-11によると、供試体側の接触面が鉄製であるDB-1はほぼ安定した値となり平均値0.331を得た。また、供試体側がコンクリートであるDC-1についてもほぼ安定した値となり平均値0.267を得た。文献10)によると、コンクリート構造物に礫が衝突する場合について実測値(建設省松本砂防工事事務所の圧痕板による測定)が計算値の10%程度となった事が報告されている²⁾。コンクリート表面に直接衝突したときの方の実測値と計算値の比が小さいのは、コンクリートは鉄よりも摩擦係数が大きく、また、コンクリート供試体は衝突実験が進むに連れて表面が削れ、平でなくなる事から、より大きな摩擦力が発生していると思われる。さらに後者は球表面の微小な凹凸の破壊によるエネルギーの吸収も引き起こすと考えられる。



(a) DB-1



(b) DC-1

図-11 衝撃力の実測値とHertzの理論値の比

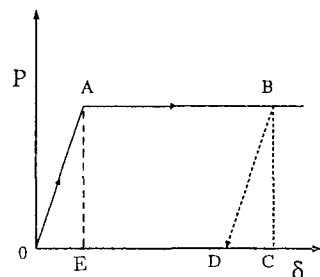
(2) 衝撃吸収エネルギーの評価

累積外力エネルギーの定義については先に述べたが、一面せん断衝撃載荷実験において、累積外力エネルギーが小さい範囲では、定着構造はどこにもほとんど塑性変形を生じていない。このような衝撃荷重が小さい段階では、重錘により与えられる衝撃エネルギーは一時的に弾性変形として蓄えられるだけで、定着構造には累積して吸収されないと考えられる。

衝撃荷重あるいは衝撃エネルギーがある限界を越えると、定着構造にはまずライナーが浮き上がる方向に塑性変形が生じ始める。その後、さらにライナー面に平行な方向にも塑性変位を生じるようになり、衝撃エネルギーを吸収しながら塑性変形が大きくなっていく。このような、ある限界を与える重錘の落下高さを弾性限界高さ h_0 とし、この一回の衝突で重錘が失ったエネルギー $E_0 = mgh_0$ を弾性限界エネルギーと定義する。また、この段階を定着構造の弾性限界と定義する。しかし、この弾性限界を越えた後も、弾性限界高さ h_0 より低い高さからの落下による衝撃エネルギーは、弾性変形によって一時的に蓄えられるだけで、吸収エネル

ギーとしては蓄積されないと考えられる。また、このような弾性限界高さを越える高さからの衝撃に対して、弾性限界高さ以下の分のエネルギーは、同様に吸収されないと考えられる。これは、次の仮定による。衝撃荷重下における塑性変位は、一回毎の衝突で与えた衝撃力の大きさに関係せず、累積衝撃エネルギーに関係する。これは、前回と今回の実験結果からも確認され、それぞれの供試体について荷重履歴が大きく異なるにも関わらず、塑性変位は累積衝撃エネルギーに比例するような、よく似た挙動を示した。そこで、このような場合についての荷重－変位関係を便宜上、図－12のように仮定する。

この図において、弾性限界荷重 P_0 に満たない衝突では、荷重変位履歴はA点まで達しずには0点に戻り、その間に吸収したエネルギーはすべて放出される。弾性限界を越える衝突では、荷重変位履歴は0点→A点→B点と進んで台形OABCの面積で表されるエネルギーを吸収する。しかしその直後、荷重変位履歴はB点からD点に進んで三角形BCDの面積で表される分のエネルギーを放出する。これは三角形OAEで表される弾性限界エネルギーと同値であり、結局累積吸収されるのは、平行四辺形OABDの面積で表されるエネルギーだけである。繰り返し荷重の下では、同様に平行四辺形分のエネルギーを累積しながら、塑性変位が線形的に増加していく。また、この後に荷重が弾性限界に満たない衝撃が与えられたとしても、荷重変位履歴はB点まで達しずにはD点まで戻り、その間に吸収したエネルギーをすべて放出するので、エネルギーは累積されない。



図－12 荷重変位関係模式図

このように、メタルライナー取付構造が吸収する衝撃エネルギーは、重錘の落下高さ h から弾性限界高さ h_0 の分を減じた高さ $h-h_0$ に、重錘重量を掛けて計算した位置エネルギー $mg(h-h_0)$ とする。これは、重錘が始めに持っていたエネルギー $E=mgh$ から、弾性限界エネルギー $E_0=mgh_0$ を減じたものと同一である。このエネルギーを1回の衝突における衝撃吸収エネルギー E_i として、この E_i を累積したものを累積衝撃吸収エネルギー E_A とすることができる。

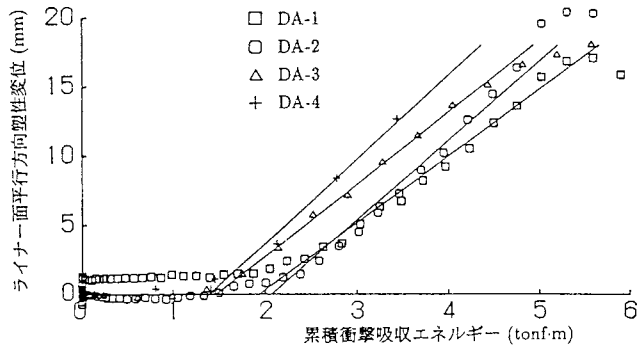
また、衝撃力や衝撃エネルギーが衝突する速さ v を用いて与えられる場合においても、以上の文章を位置エネルギーと運動エネルギーの関係を用いて、 $h=1/2v^2/g$ として読みかえれば、全く同様に考えることができる。

(3)一面せん断荷重載荷実験における吸収エネルギー

累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位:ここでは、定着構造の弾性限界を決定する条件として、ライナー面垂直方向変位を考える。先に述べたように、一面せん断実験供試体は、載荷側にあるアンカーボルトが引張り側で降伏した時点で、ライナー面垂直方向に定着構造として初めて塑性変位を生じた。この段階までは、アンカーボルトによってライナーの変位が支配されると考えられるので、アンカーボルトが弾性の状態であれば、構造全体が弾性であると見なすことができる。この時点から、定着構造はエネルギーを累積吸収し始め、その後ある時点からライナー面平行変位を生じ始める。このように、定着構造の弾性限界は、ライナー面垂直方向に浮き上がるように塑性変位を生じ始める段階と定義することができる。

この弾性限界を用いて、4(2)にしたがって計算した累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位の関係を図－13に示す。

累積衝撃吸収エネルギーに対する、ライナー面平行方向塑性変位の立ち上がり後の傾きについて最小二乗近似して図中に直線で示した。この図から、この傾きは与えられた荷重履歴の違いによらずほぼ一定の値（平均 $5.48\text{mm/tonf}\cdot\text{m}$ ）であることがわかる。しかし、その立ち上がる部分の累積衝撃吸収エネルギーの値は、DA-3、DA-4の供試体が、DA-1、DA-2供試体よりも約 $0.5\text{tonf}\cdot\text{m}$ 程小さい。つまり、弾性限界の考え方を導入したにも関わらず、初期の段階から大きな衝撃力を与えていくと、塑性変位を生じ始める累積衝撃エネルギー

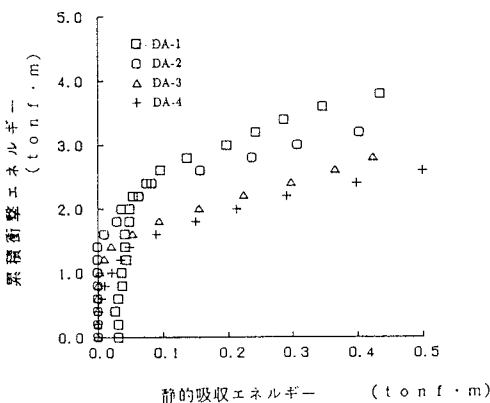


図－１３ 累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位

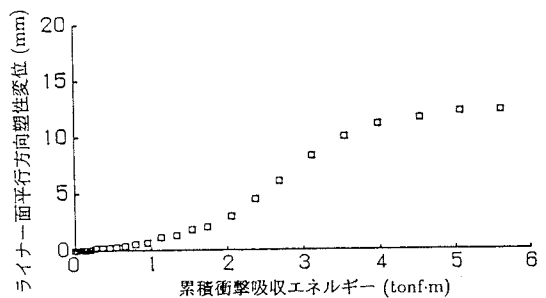
値が若干小さくなる傾向がみられた。また、DA-1、DA-2供試体については全く同じ条件下での実験にも関わらず、その傾きや立ち上がりの切片に若干の違いが認められる。逆に、DA-3、DA-4の供試体は、一回についての衝撃力の与え方が、約1.3倍の違いがあるが、それほどの相違はみられない。

これが、荷重履歴の違いによるものかはさらなる実験や解析による検討の余地が若干あると思われるが、供試体ごとのばらつきを考慮にいと、荷重履歴にはほぼ影響されないと考えられる範囲であると考えられる。この関係について、様々な構造や載荷条件のものが整備されれば、許容平行方向塑性変位を実験やモデルから決定することにより、それに対応する定着構造の許容累積衝撃エネルギー吸収能を決定することできると考えられる。

累積衝撃吸収エネルギーと静的吸収エネルギー：同一の塑性変位を生ずるときの静的吸収エネルギーとの関係を図－１４に示す。この図においても、静的吸収エネルギーが約0.05 tonf・mを越えたあたりからの曲線の傾きは、ほぼ一定値を示している。しかし、供試体によってその切片に違いがみられ、その傾向は塑性変位と累積衝撃吸収エネルギーの関係に類似する。この関係についても、様々な構造や荷重条件のものが整備されれば、静的載荷実験の結果や静的なモデルから、衝撃荷重下における定着構造の吸収エネルギーを概算することができると考えられる。



図－１４ 累積衝撃吸収エネルギーと静的吸収エネルギー



図－１５ 累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位

(4)斜め方向荷重載荷実験における吸収エネルギー

累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位:斜め方向載荷における十字リブ付きライナー取付構造(Rタイプ)の実験は、静的載荷実験、衝撃載荷実験のどちらにおいても崩壊に至らず、構造としては弾性状態の挙動が得られたに過ぎない。ここでいう弾性状態とは、一面せん断実験における場合と同じように、定着構造のどこにも塑性変形を生じていない状態のことである。また、一面せん断実験においては、定着構造の弾性限界を、ライナー面垂直浮き上がり方向に塑性変位が生じ始める段階で定義したが、斜め載荷実験ではライナー面垂直圧縮方向にも大きな荷重が作用するため、浮き上がり方向に塑性変形を生じない。そのため、このようにライナーが浮き上がる挙動を生じない場合には、ライナー面平行方向に塑性変位が生じ始める時点が、定着構造の弾性限界と定義することができる。

しかしながら、衝撃載荷実験において、Fタイプの構造は約6tonf・mの累積外力エネルギーを与えて崩壊に至ったのに対して、Rタイプの構造は、実に40tonf・mの累積外力エネルギーを与えても定着構造には塑性変形がほとんど生じず、崩壊に至らなかった。実験において、一回の衝突によって与えることのできる最大衝撃力(618.3tonf)、最大外力エネルギー($0.2265 \times 5 = 1.13 \text{ tonf} \cdot \text{m}$)をもってしても弾性挙動を示したことから、このRタイプ構造の弾性限界荷重、弾性限界エネルギーは少なくともこれ以上の値であるということがいえる。従ってここでは、Fタイプの取付構造のDB-4供試体についてのみ、累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位の関係を図-15に示す。ここでは、一面せん断実験の場合のように、塑性変位の立ち上がりに遅れがない。これは、先に述べたように、一面せん断実験の場合とは、定着構造の塑性変形が生じ方に違いがあるからである。

このFタイプの取付構造では、ライナーに十字リブがないにも関わらず、一面せん断実験におけるRタイプの取付構造と同等のエネルギー吸収能(約6tonf・m)を示している。これはライナー面垂直方向の圧縮力の影響であり、モルタルとライナーの接触面における摩擦力を大きく増大させる効果を持っている。静的載荷実験でも、同じFタイプの取付構造の実験において、斜め載荷の場合には一面せん断載荷の場合に比べて、ライナー平行方向の最大耐荷力やエネルギー吸収能において、約4倍の増大効果があることがわかっている。

5. 結 論

本研究では、メタルライナー取付構造の耐衝撃特性や変形特性およびエネルギー吸収能に着目した設計指針を提案することを目的にして、一昨年の静的載荷実験、昨年の衝撃載荷実験に引き続き、合計6体の供試体について、一面せん断衝撃荷重載荷実験と斜め衝撃荷重載荷実験を行った。本研究により次のような結論が得られた。

- 1) 3体の十字リブ付きライナー取付構造の供試体について行った一面せん断衝撃載荷実験では、前回の実験も含めて、それぞれ異なった載荷履歴の下においても、その衝撃荷重、変位、ひずみおよび破壊性状の傾向はほぼ共通しており、再現性が確かめられた。
- 2) 重錘落下による衝撃荷重は供試体の損傷に関わらず、一定の落下高さに対してほぼ一定の値を示した。また、この実験値とHertzの接触理論解の比は、供試体の衝突面の材質に関係して、重錘の種類にはよらず、ほぼ一定の値であった。
- 3) 平板ライナー取付構造について行った斜め方向衝撃載荷実験では、静的載荷実験の場合と同様、アンカーボルトが4本とも直接せん断された形で崩壊に至った。また、この供試体は、十字リブがないにも関わらず、一面せん断載荷実験における十字リブ付きライナー取付構造とほぼ同等のエネルギー吸収能を示し、ライナー面垂直方向圧縮力の効果が確認された。
- 4) コンクリート表面に直接載荷する斜め衝撃載荷実験では、重錘の衝突部分が落下回数につれて剥離を起こして楕円錐状に彫れていった。また、このように局所的な破壊でエネルギーを吸収するため、メタルライナーがある場合と比較して、ピーク衝撃力は小さい値であった。

- 5)一面せん断載荷実験では、その挙動を3つの領域に分けることによって、耐荷機構を明らかにした。そこでは、ライナーの浮き上がり方向に塑性変位が始まる時点を定着構造の弾性限界とすることができることを明らかにした。
- 6)弾性限界吸収エネルギーを定義することにより、ほぼ荷重履歴によらない累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位の関係を得た。この関係を用いて、衝撃エネルギー吸収能に着目した設計法が可能であることを示した。

参考文献

- 1)水山高久, 下田義文, 石川信隆: コンクリート製砂防ダムに対する巨礫の衝撃模型実験に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 1095-1104, 1989. 3.
- 2)建設省土木研究所, 砂防部砂防研究室: 土木研究所資料, 砂防ダムの災害実態調査(2), 土木研究所資料第2491号, 1987. 4.
- 3)宇梶 実: 五十里ダムの水叩き洗掘について, ダム技術, No. 30, pp. 81-91, 1989.
- 4)水山高久, 松村和樹, 山本卓朗: 土石流対策施設に適用する緩衝材の効果評価, 新砂防, Vol. 41 No. 3 (158), 1988. 9.
- 5)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), pp. 40-43, 1979.
- 6)水山高久, 伊巻幹雄: 砂防ダムに対する土石流衝撃力実験, 土木技術資料22-11, 1980, pp. 27-32.
- 7)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), pp. 11-19, 1990.
- 8)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), pp. 11-20, 1990.
- 9)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, pp. 1529-1542, 1991. 3.
- 10)伊藤義人, 八谷 徹, 宇佐美勉, 片岡 誠, 草田昭一: 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, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1539-1552, 1993. 3.
- 11)J. A. Zukas, T. Nicholas, H. F. Swift, L. B. Greszczuk and D. R. Curran: Impact Dynamics, A Willy Interscience Publication JOHN WILEY & SONS.
- 12)岡田恒男, 田中礼治, 松崎育弘, 坂本 功, 河村壮一: あと施工アンカー, 技術書院, 1990.
- 13)土木学会: 国鉄構造物設計標準解説, 1983.
- 14)秋山 宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985.
- 15)土木学会: 土木技術者のための振動便覧, 1985.

(1993年9月16日受付)