

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

伊藤 義人* 倉坪 和弥** 宇佐美 勉*** 片岡 誠**** 草田 昭一*****

By Yoshito ITOH, Kazuya KURATSUBO, Tsutomu USAMI, Makoto KATAOKA and Sho-ichi KUSATA

In this paper, the ultimate strength and deformation capacity of anchor system of metal liners covered concrete surface are studied experimentally. The metal liner having anchor bolts is designed to protect sleeve part of sabo dams, water-course floor and debris barriers from scouring and impact loading of rocks. Twelve test specimens used three shapes of metal liners are tested under statically cyclic loading. It is found from test results that the anchor system using bolts and cruciform rib with metal liners has a good performance in strength and energy-absorption capacity.

1. まえがき

土石流や洪水時に生ずる砂礫や巨礫の衝突により、砂防ダム堤体の袖部や水叩き部、流路およびダムの排砂路や水路床などにおいて浸食、破壊および摩耗損傷などが大きな問題となっている。損傷の激しいところでは、コンクリート面の損傷が1年間で深さ方向で1mを超える程度にもおよぶといわれており、毎年補修工事を行っているのが現状である。損傷の激しい部分に自然石を置いたり、コンクリート表面に鋼板、レー、ゴムなどでカバーして対処している例もあるが、ごく一部を除いてあまりよい結果が得られていない。

そこで、コンクリート表面を防護する新しい方法として、耐摩耗性の鋳鋼、鋳鉄製ライニング材(メタルライナー)の取付が検討されている。このライニング材の材質は、高張力、高延性、耐摩耗性、耐食性、耐熱性などの面で優れており、コンクリート表面を砂礫などによる摩耗損傷から保護して、排砂路や水路床の耐摩耗性を向上させることを目的として、現在、数カ所のダムの排砂路で試験的に採用されている。

メタルライナーの材質はマンガン系材料とクロム系材料があり、両者とも耐摩耗性に優れている。マンガン系材料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。また、クロム系材料は耐

* 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 JR東海 建設工事部 (〒450 名古屋市中村区名駅1-1-4)

*** 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)

食性、耐熱性がマンガン系より優れている。荷重条件および環境によりそれぞれの特徴に応じて材料を選定できる。メタルライナーの取付は、損傷したダムの排砂路や水路床などの補修を対象としており、作業現場における施工性などを考慮して重機を用いずに作業できることを原則としているため、人力により作業ができるようにライナー1個の大きさが制限される。

これまでに土木分野においては、土石流や雪崩、落石といった自然災害に関するもの、船舶と橋脚、自動車とガードレール、岩盤などの掘削工事などにおける発破、地盤への杭打ち、原子力発電所や核シェルターなどの重要構造物に対する飛行物体の衝突などといった衝撃現象に関して種々の研究^{1), 2), 9)}がなされてきている。砂礫や巨礫などの衝突によって実際に砂防ダムの堤体やダムの排砂路、水路床に作用するときの衝撃力は、これまでに弾性球の衝突理論によるもの^{3), 4)}や鋼球の衝突実験^{6), 7)}および砂礫の水理学的な運動機構に着目した研究⁸⁾が行われ、その一部は設計指針に取り入れられている^{12), 13)}が、まだ明確にはなっていない。

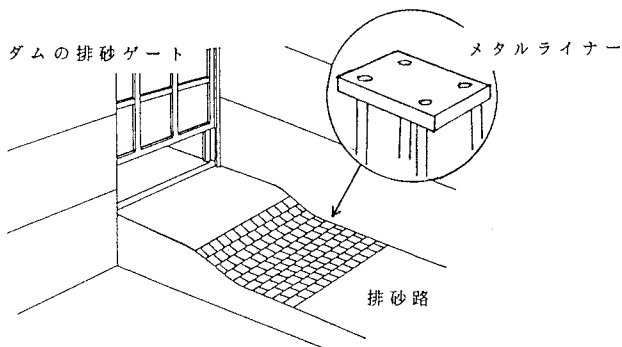


図-1 排砂ゲートに設置されたメタルライナーの概念図

衝撃荷重を受ける構造物の設計においては、吸収エネルギーが重要であり、衝撃エネルギー吸収能と静的エネルギー吸収能は関係があり、一般に衝撃エネルギー吸収能は静的エネルギー吸収能より大きいといわれている¹⁴⁾。このため、まず静的な挙動を明かにすることが衝撃荷重をうける構造物の設計法を考えるときに重要であると考えられる。

本研究では、図-1に示すような排砂路に耐摩耗性保護材メタルライナーを取り付けた構造物に着目して、研究の第1段階として種々のタイプのメタルライナー取付構造物に礫の衝突を想定した一方向繰り返し静的荷重載荷実験を行ない、メタルライナーの定着構造の耐荷力特性と変形能、そして最終的な破壊性状の違いを明らかにし、設計の基礎的データを得ることを目的としている。

2. 実験計画

(1) メタルライナー形状と定着構造

実験は、巨礫の衝突に対してダムの排砂路や水路床などのコンクリート表面の保護に用いられる耐摩耗性ライニング材（メタルライナー）の形状および定着構造の違いが、耐荷力特性や変形能、破壊性状およびエネルギー吸収能などに与える影響を明らかにすることを目的としている。

実験に用いたライナー形状は、図-2に示すように平板ライナー（Fタイプ）、十字リブ付きライナー（Rタイプ）および脚付きライナー（Lタイプ）の3タイプである。材質は、耐摩耗性に優れたクロム系鋳鋼とマンガン系鋳鋼の2種を用いている。その定着構造は、平板ライナーと十字リブ付きライナーは4本の鉄筋を用いたアンカーボルトで定着され、脚付きライナーは、ライナー下部の脚部で2本のアンカーボルトを使って定着するものである。

実験で用いた脚付きライナー（Lタイプ）は、ダムの排砂路のライナーとして実際に用いられているものである。十字リブ付きライナー（Rタイプ）は、今回の研究で考案したものであり、耐重衝撃用メタルライナーとして、図-2のように平板に十字リブを取り付けたものである。十字リブ付きライナーは、メタルライナーに作用するせん断力をアンカーボルトと十字リブで分担して受け持ち、定着構造のせん断耐力を増加させ、アンカーボルトが持つ変形能を十分に発揮させようとするものである。また、十字リブは、メタルライナーに作用する鉛直力に対して補剛材の役割もすると考えられる。十字リブのリブ断面としては、台形断

面を考え、施工時のモルタルの充填を円滑に行うことができるようにした。なお、平板ライナー（Fタイプ）は、平板に4つのアンカーボルト用の穴をあけたものである。

3つのタイプのメタルライナーの上部の平板の大きさは、全て縦40 cm、横40 cm、厚さ5 cmである。

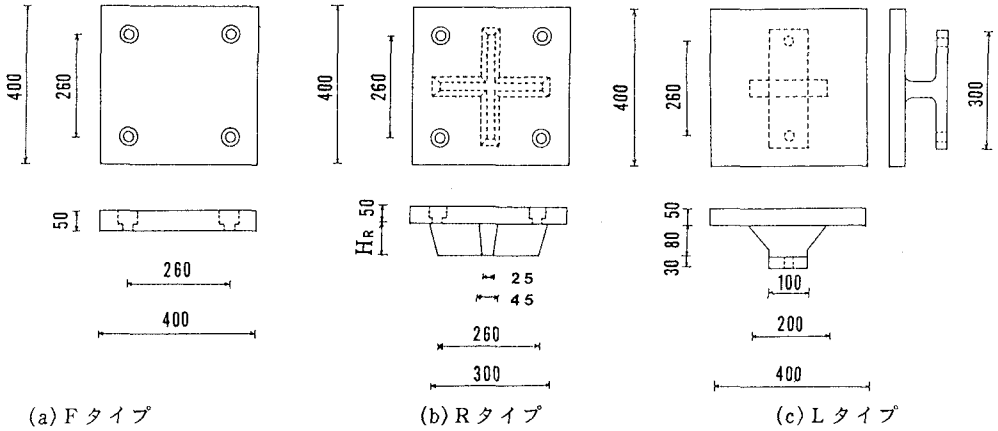


図-2 メタルライナーの形状 (単位 mm)

(2) 供試体

実験では、独立した1つのメタルライナーの取付構造の強度と変形性能に着目するため、コンクリート躯体の上面に1つのメタルライナーを定着させた供試体を用いた。本研究では、ライナーに対して水平方向の力だけが作用する一面せん断実験とライナーに鉛直荷重と水平荷重が同時に作用する斜め荷重載荷実験の2種を行うため、供試体は図-3に示すように2種の形状のものを製作した。

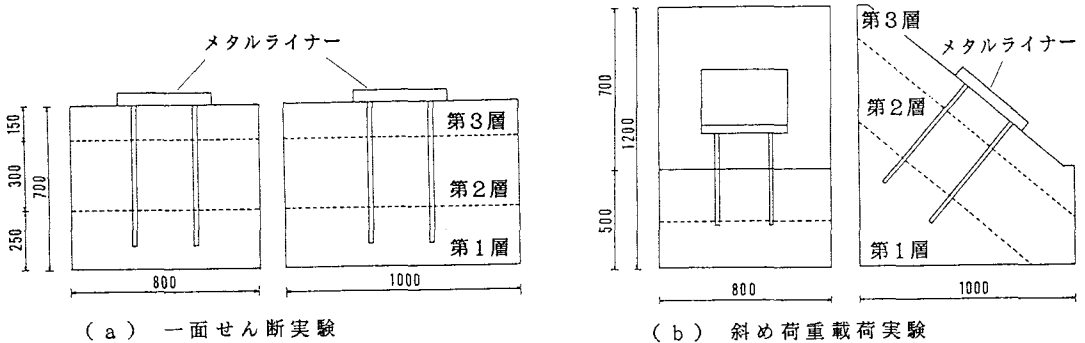


図-3 供試体形状 (単位 mm)

供試体は図-3に示すように三層構造になっており、まず第1層のコンクリート躯体に孔をあけ、長さ600 mmのアンカーボルトを樹脂系定着剤ケミカルアンカーで固定した後、第2層の普通コンクリートを打設した。そしてアンカーボルトにメタルライナーをネジで固定した後、メタルライナーとコンクリートの隙間に高強度無収縮モルタルを充填した。鉄筋を用いたアンカーボルトは、引き抜きにたいして十分抵抗できるだけの付着長さをとっており、アンカーボルトの引き抜き破壊は起こり得ない状態を想定した。

実験で用いた12体の供試体の一覧を表-1に示す。Aシリーズの3体は一面せん断実験でFタイプ、Rタイプ、Lタイプのメタルライナー取付構造について比較するものである。Bシリーズの5体は斜め荷重載荷実験でFタイプ、Rタイプ、Lタイプの取付構造について比較するものであり、またB-2b供試体、B-3b供試体のメタルライナーはクロム系の材質で作られており、マンガン系で作られている他の供試体と

比較して、ライナーの材質の違いによる影響をみるためのものである。Cシリーズの4体は一面せん断実験で、Rタイプの構造に注目して、リップ高さ、アンカーボルト径および割裂補強筋の有無による破壊性状やエネルギー吸収能にどのような違いがあるかを比較するものである。C-1 供試体では割裂補強筋を省き、C-2 供試体ではアンカーボルトの径をD25と太くし（他の供試体はD19）、またC-3 供試体では十字リップの高さを3cmと低くし、C-4 供試体では十字リップの高さを7cmと高くしてある。

実験は、まずメタルライナーの形状に着目してAシリーズの一面せん断実験およびBシリーズの斜め荷重載荷実験を行った。そして、その結果をもとに十字リップ付きメタルライナーの形状に注目してCシリーズの一面せん断実験を行った。

表-1 供試体一覧

供試体名	実験方法	ライナー形状 及び取付構造	アンカー ボルト	リップ高さ H _R (cm)	ライナー材質	割裂補強筋
A-1	一面せん断	Fタイプ	D19	---	マンガン系	有
A-2		Rタイプ	D19	5.0	マンガン系	有
A-3		Lタイプ	D19	---	マンガン系	有
B-1	斜め荷重載荷	Fタイプ	D19	---	マンガン系	有
B-2 a		Rタイプ	D19	5.0	マンガン系	有
B-2 b		Rタイプ	D19	5.0	クロム系	有
B-3 a		Lタイプ	D19	---	マンガン系	有
B-3 b		Lタイプ	D19	---	クロム系	有
C-1	一面せん断	Rタイプ	D19	5.0	マンガン系	無
C-2		Rタイプ	D25	5.0	マンガン系	有
C-3		Rタイプ	D19	3.0	マンガン系	有
C-4		Rタイプ	D19	7.0	マンガン系	有

(3) 載荷装置

一面せん断実験装置

一面せん断実験の載荷装置を図-4に示す。供試体は架台上で2枚の鋼板①で挟み鋼棒②で締め付けて供試体と鋼板を一体化した。図-4に示すように鋼板①の上部に穴をあけて太径鋼棒③(φ36)を通し、センターホールジャッキ⑥(理研油圧式 最大荷重100tonf)とセンターホールロードセル⑦を取り付けて、このセンターホールジャッキでメタルライナーの側面に固定した載荷治具④を引っ張ることにより、メタルライナーに水平荷重を載荷した。載荷中にメタルライナーが浮き上がった場合に載荷治具が外れないように、ライナー側面と治具④とをボルト⑤により固定した。

また、供試体全体が剛体として回転や移動が生じないように、供試体を挟む鋼板①を実験フロアに固定された架台の上でボルトにより固定した。

斜め荷重載荷実験装置

斜め荷重載荷実験の載荷装置の概要を図-5に示す。載荷梁⑮とH型钢柱で供試体を囲むようにラーメンを組み、載荷梁⑮にジャッキ⑯(理研油圧式 最大荷重200tonf)を固定し、傾斜角40°の斜面上に取り付けられたメタルライナーに対して載荷治具⑬を介して鉛直荷重を載荷した。載荷治具⑬の上には、偏心荷重が作用しないように球面座⑫が固定されており、載荷治具⑬が載荷中に外れないように、メタルライナーの側面に孔を開け、載荷治具⑬と固定板⑭をボルトで固定し一体化した。

また、一面せん断実験と同様に、供試体を挟む鋼板⑩を実験フロアに固定された架台の上でボルトにより固定して、供試体の剛体変位を拘束した。

メタルライナーには、鉛直荷重と水平荷重が比例載荷されることになるが、これはライナーに斜めに岩石が衝突したときを考えたものである。

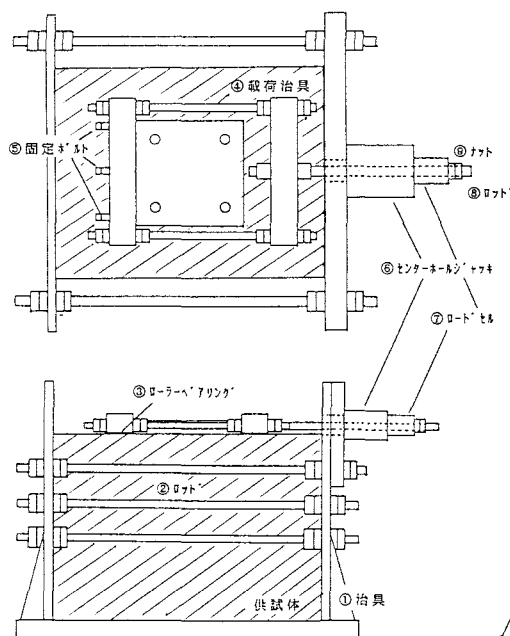


図-4 一面せん断実験装置

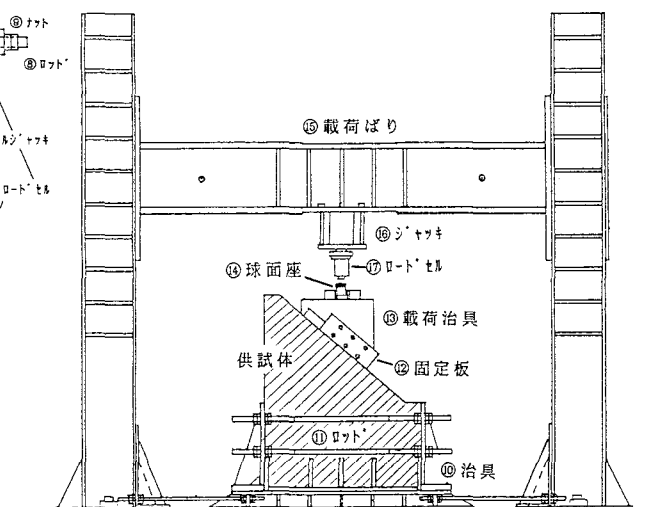


図-5 斜め荷重載荷実験装置

(4) 載荷方法と測定方法

実際の構造物には、複数の岩石の衝突によって繰り返して力がかかると考えられる。そこで本実験では、載荷方法として一方向繰り返し荷重載荷を採用した。載荷は弾性範囲内では荷重で制御していき、弾性限界を超えてからは各ステップを定変位で3回ずつサイクリック荷重をかけ、ループ毎の除荷の度合を確かめながら荷重の除荷域までの荷重-変位関係を求めた。

荷重は、それぞれジャッキの先に取り付けたロードセルにより測定し、変位は変位計（東京測器社製 CD P-5, CDP-25）を一面せん断実験で計5本、斜め荷重載荷実験で計7本取り付けてコンクリートとメタルライナーの相対変位を測定できるようにした。

コンクリート躯体の応力測定のための、供試体製作時に、アンカー、リブおよび脚部の前面のコンクリート躯体中にモールドゲージ（東京測器社製 PMLS-10）を埋め込みコンクリート内の応力を測定し、さらにメタルライナーの周りのコンクリート表面にポリエステルゲージ（東京測器社製 PL-60）を貼って、コンクリート躯体の表面応力も測定した。アンカーボルトについては、メタルライナー下面から深さ3cm, 10cm, 20cmの位置の軸応力と曲げ応力が分離できるようにそれぞれ2枚の塑性ゲージ（東京測器社製 YL-10）を取り付け、アンカーに発生する応力を測定するとともに、RタイプおよびLタイプのメタルライナーについては、十字リブと脚部に塑性ゲージ（東京測器社製 YL-10）を取り付けて、メタルライナーのリブと脚部に発生する応力を測定した。

荷重、変位およびひずみの値はデータロガー（東京測器社製 TDS-302）によって読み取り、パソコン（NEC PC-9801）へGP-IBインタフェースを介してデータを取り込み、ディスプレイに荷重-変位関係のグラフを出力して、荷重および変位の制御の参考にした。

3. 実験結果

(1) アンカー鉄筋とメタルライナーの素材引張試験

供試体のアンカーボルトに用いた鉄筋D19およびD25の材料定数を求めるために、それぞれ3本ずつの試験体について200t万能試験機を用いて引張試験を行い、その結果からヤング係数、降伏点応力、降伏ひずみ、ひずみ硬化係数および硬化ひずみを求めた。その結果の平均値を表-2に示す。

また、メタルライナーの耐摩耗性のマンガン系およびクロム系材料の材料定数を求めるために行った引張試験の結果を表-3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)	硬化ひずみ (%)
D19	1.93×10^6	3.34×10^3	1.73×10^{-1}	5.76×10^4	1.09
D25	1.90×10^6	3.08×10^3	1.62×10^{-1}	6.43×10^4	1.54

表-3 メタルライナーの引張試験結果

	ヤング係数 (kgf/cm ²)	横弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
マンガン系材料	1.82×10^6	7.58×10^5	0.38
クロム系材料	2.11×10^6	8.18×10^5	0.29

(2) モルタルおよびコンクリート材料の素材試験結果

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、各供試体の実験終了後ごとにすぐに、各供試体製作時に作ったφ100mm×200mmの寸法の材料試験体を用いて、圧縮強度試験、引張強度試験をそれぞれ行なった。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-4に示す。結果は、各3体の平均値である。なお、第1、2層のコンクリートの圧縮強度の平均値は、400 kgf/cm²であった。

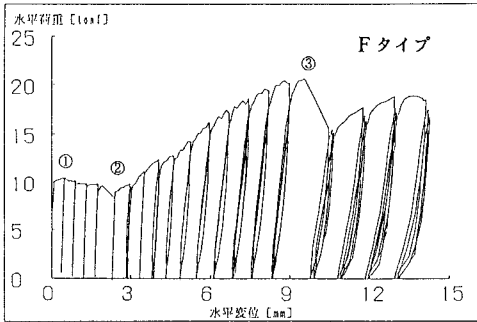
表-4 第3層のモルタルの材料試験

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
A-1	519.1	39.7	2.35×10^5	0.230
A-2	466.0	24.5	1.84×10^5	0.219
A-3	578.9	23.1	1.96×10^5	0.236
B-1	584.4	42.6	2.26×10^5	0.171
B-2 a	452.0	32.9	1.83×10^5	0.214
B-2 b	621.1	83.3	2.30×10^5	0.236
B-3 a	551.1	33.6	2.11×10^5	0.230
B-3 b	510.1	33.0	1.98×10^5	0.222
C-1	527.1	36.5	2.16×10^5	0.226
C-2	508.9	27.5	2.10×10^5	0.228
C-3	406.1	37.1	2.04×10^5	0.223
C-4	482.0	33.5	2.08×10^5	0.225

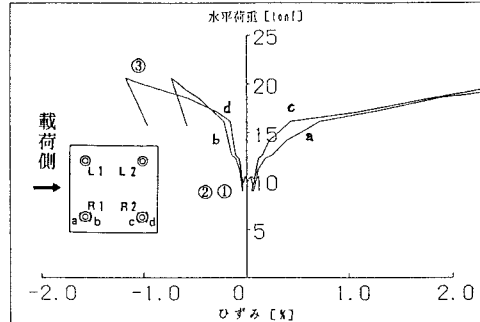
(3)一面せん断実験結果

A シリーズの一面せん断実験の各供試体ごとの荷重－変位関係、荷重－ひずみ関係および崩壊過程について詳しく説明する。

A－1 供試体：A－1 供試体は平板ライナー（Fタイプ）を4本のアンカーボルトで取り付けた構造である。荷重とライナーの水平変位の関係を図－6 (a)に、荷重とアンカーボルトのひずみの関係を図－6 (b)に示す。ただし、アンカーボルトのひずみは、ライナーの下面から3 cmの位置の値である。図－6 (b)の荷重－ひずみ曲線は、各点の値を比較しやすいようにサイクリックループの包絡線のみを示してある。



(a) 荷重－変位曲線



(b) 荷重－ひずみ曲線（アンカーボルト）

図－6 A－1 供試体実験結果

図－6 (a)の荷重－変位曲線で、①点までの区間では荷重が上がっても水平変位はわずかしき発生していない（1mm程度）が、この区間ではコンクリート表面とメタルライナーの間の付着力が荷重に抵抗しているものと考えられる。図－6 (b)の荷重－ひずみ曲線を見ても、①点（10tonf付近）の荷重までは小さなひずみしか出ておらず（0.01%程度）、①点を越えてからひずみが急増している。これは、この時点からアンカーボルトが荷重に抵抗し始め、荷重が上がった。そして、③の点でついに荷重載荷側の2本のアンカーボルト（R1，L1）が破断し最高荷重20.6tonfを記録した。②－③の区間では、図－6 (b)から分かるようにアンカーボルトは荷重に対して前側（ゲージa，c）が圧縮，後側（ゲージb，d）が引張というように主に曲げ変形している。コンクリート躯体にはクラックは見られず、アンカーボルトの破断だけで崩壊モードが決まった。

A－2 供試体：A－2 供試体は、十字リブ付きのメタルライナーを4本のアンカーボルトで定着したものである。荷重とライナーの水平変位の関係を図－7 (a)に、荷重とアンカーボルトのひずみの関係を図－7 (b)に、また荷重と十字リブのひずみの関係を図－7 (c)に示す。なお、十字リブのひずみは、図中に示してあるようにリブの付け根（a，b）の値である。

A－2 供試体では、水平荷重に対して十字リブ前面のモルタルとアンカーボルトで分担しながら抵抗し、最高荷重76.9tonfに達した。図－7 (b)と図－7 (c)から分かるように、荷重が70tonf近傍（①点）で十字リブのひずみが反転しており、逆にアンカーボルトのひずみが増大していることがわかる。このことより、70tonfの荷重を境に、リブとアンカーボルトの荷重に対する分担率が変化し、①以降ではアンカーボルトの分担率が大きくなったといえる。その理由として、①の段階でリブ前面のモルタルがせん断破壊を開始し始め、リブにかかる力が減ったのではないかと考えられる。その後、モルタルのせん断破壊が進み、②でついにせん断面のすべりが大きく発生し、最高荷重76.9tonfを記録した。アンカーボルトは、図－7 (b)で、ひずみの値が前側（ゲージa，c）と後側（ゲージb，d）とも引張を示していることから分かるように曲げとともに伸び変形を表している。これは、リブ前面のモルタルによりライナーの前方向の移動が拘束され、ライ

ナーの載荷側に浮き上がりが発生したことによると考えられる。

リップ前面のモルタルのせん断破壊面の立体図を図-7 (d)に示す。この図は、実験後にライナーの前半分に
あたる部分のモルタル破壊面の深さを計測して作成したものである。

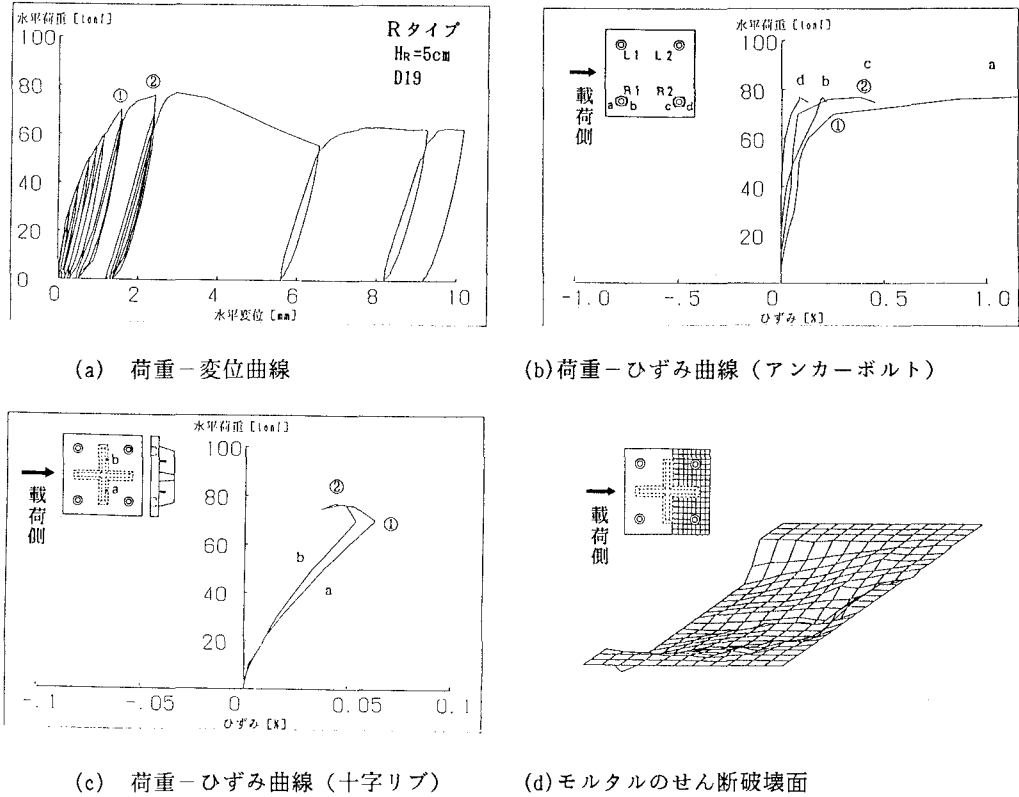


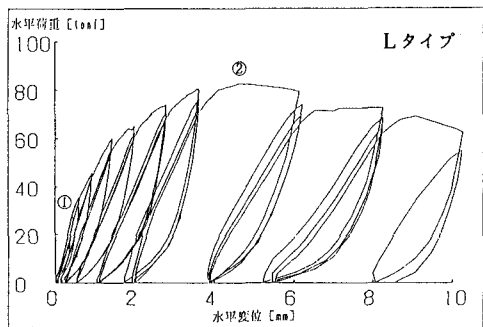
図-7 A-2 供試体実験結果

A-3 供試体：A-3 供試体は脚構造を持ったライナーを、脚部で2本のアンカーボルトにより取り付け
たものである。荷重とライナーの水平変位曲線およびアンカーのひずみ曲線を図-8 (a)と図-8 (b)にそれ
ぞれ示す。また、脚部前面から3 cm離して埋め込まれたモールドゲージから読み取ったコンクリートのひず
みと荷重の関係を図-8 (c)に示す。

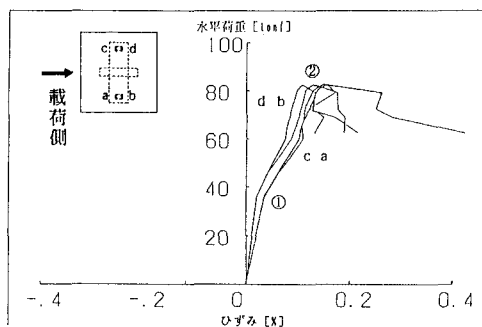
A-3 供試体は、64tonfでライナーの側面の外側のコンクリート表面からクラックが発生し始め、その後
広い範囲にクラックを進展させながらコンクリート躯体の割裂破壊を広い範囲に起こし最高荷重82.5tonfに達
した。図-8 (d)にクラック形状をスケッチしたものとそのクラックの発生した荷重値を示す。

図-8 (b)と図-8 (c)によると、①点(約37tonf)でアンカーボルトのひずみが大きくなると同時にコン
クリートのひずみが反転しており、この荷重でコンクリート内部に最初のクラックが発生してアンカーボ
ルトの荷重分担量が増えたと考えられる。

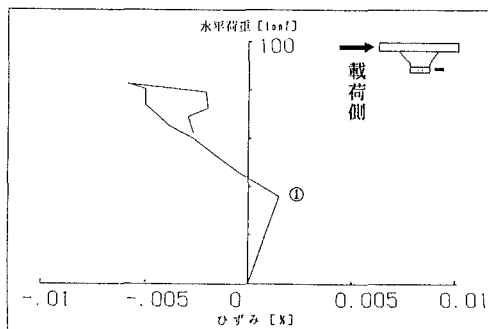
図-9にA-1～A-3 供試体の荷重-変位曲線の包絡線を示す。また、本研究で扱った12体の供試体
の最高荷重と主な崩壊形式を表-5に示す。



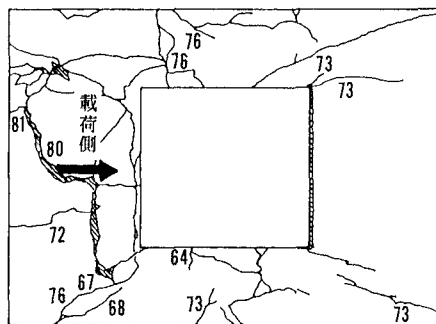
(a) 荷重－変位曲線



(b) 荷重－ひずみ曲線（アンカーボルト）

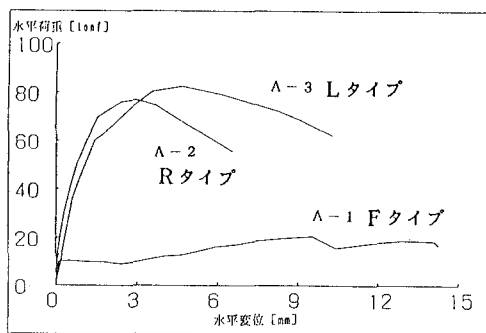


(c) 荷重－ひずみ曲線
（コンクリート）

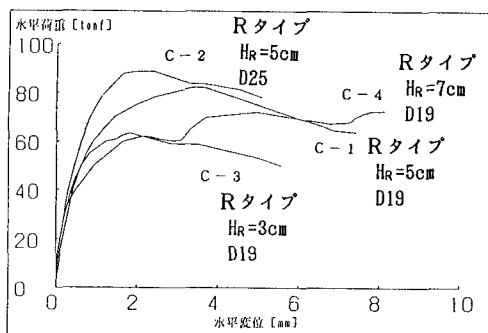


(d) クラック形状とクラック発生荷重

図－8 A－3 供試体実験結果



図－9 A シリーズの荷重－変位曲線の包絡線



図－10 C シリーズの荷重－変位曲線の包絡線

表－５ 最高荷重と主な崩壊モード

供試体名	最大耐荷力	破壊性状
A－１	20.6 tonf	アンカーボルトのせん断破壊
A－２	76.9 tonf	リブ前面のコンクリートのせん断破壊
A－３	82.5 tonf	コンクリート軀体の割裂破壊
B－１	126.1 tonf	アンカーボルトのせん断破壊
B－２	－－－－	破壊に至らなかった
B－３	－－－－	破壊に至らなかった
C－１	79.0 tonf	リブ前面のコンクリートのせん断破壊 (アンカーボルト２本破断)
C－２	88.9 tonf	リブ前面のコンクリートのせん断破壊
C－３	63.4 tonf	リブ前面のコンクリートのせん断破壊 (アンカーボルト１本破断)
C－４	72.6 tonf	リブ前面のコンクリートのせん断破壊

C－１供試体～C－４供試体：図－１０に、C－１～C－４供試体の、荷重－水平変位曲線の包絡線をまとめたものを示す。C－１供試体はA－２供試体と同じ形状であるが、他の供試体には付けてあるアンカーボルトの周りの割裂補強筋が省かれている。最高荷重は、79.0tonfとA－２供試体に比較すると、わずかに高めになったが、ライナーの荷重－変位関係およびアンカーボルトの荷重－ひずみ曲線は、A－２供試体とほぼ同じものが得られた。割裂補強筋の有無による強度および変形性能に差はないといえる。

C－２供試体はアンカーボルトにD25が使われている。最高荷重はCシリーズの中では最も大きく、88.9tonfであったが、リブのひずみが反転すると同時にアンカーボルトのひずみの急激な伸びが見られ、その後すぐに十字リブ前面のモルタルのせん断すべりと載荷側のアンカーボルトのナットのすべりによって崩壊した。

C－３供試体は十字リブの高さが3cmであり、十字リブ前面のモルタルのせん断破壊開始点はあまり定かではないが、最高荷重63.4tonfを記録した。

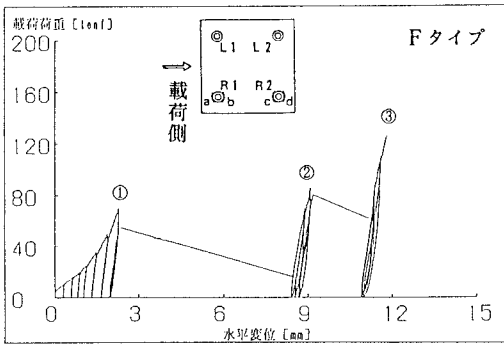
C－４供試体は十字リブの高さが7cmであり、ライナーの側面下の十字リブの縁からコンクリート軀体に50tonf近傍からクラックが発生した。その後、クラックが進展しつつリブ前面のモルタルがせん断破壊を生じ、最高荷重72.6tonfに達したとほぼ同時に、リブ前面のモルタルの大きなせん断すべりとコンクリート軀体の割裂破壊および載荷側のアンカーボルトのナットのすべりが一気に起こり終局状態に至った。

(4) 斜め荷重載荷実験結果

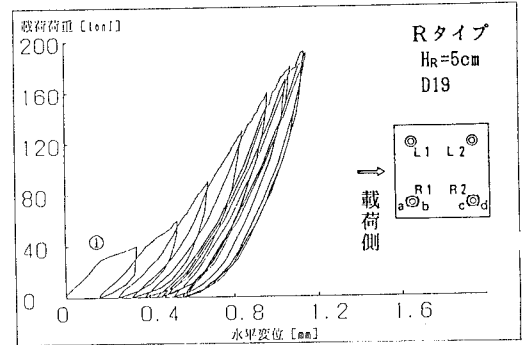
B－１供試体：B－１供試体はA－１と同じ平板ライナーを４本のアンカーボルトで取り付けたものである。荷重とライナーの水平変位の関係を図－１１に示す。図中の①点でR１、②点でL１と次々に荷重載荷側のアンカーボルトが破断し最大斜め荷重126.1tonf（③点）で向い側のR２、L２のアンカーボルトが切れて崩壊した。この最大斜め荷重をメタルライナーに垂直な方向とせん断方向に分解すると、それぞれ96.6tonf、81.1tonfとなる。アンカーボルトの破断部においては軸方向伸びがなく、破断面はきれいな平面であった。コンクリート軀体にはクラックは発生しなかった。

B－２～B－３供試体：B－２a、B－２b、B－３a、B－３bの４つ供試体は十字リブ付きライナーと脚付きライナー構造であるが、ジャッキの最大容量である200tonfに達しても破壊に至らなかった。B

－ 2 a の供試体についての荷重とライナーの水平変位曲線を図－ 1 2 に示す．メタルライナーの材質が違う供試体においても，互いに非常によく似た挙動を示しており，ライナーの材質の違いは，今回の実験の範囲内ではその取り付け構造の挙動に変化を及ぼさなかったといえる．



図－ 1 1 荷重－変位曲線（B－ 1）



図－ 1 2 荷重－変位曲線（B－ 2 a）

4. 考察

(1) メタルライナー形状による比較

図－ 9 の A シリーズ 3 体の供試体の荷重－変位曲線の包絡線図と表－ 5 から明らかなように， A－ 1 供試体は最大耐荷力が A－ 2 供試体， A－ 3 供試体に比べて約 1／ 4 と小さな値であり，十字リブや脚構造がせん断耐荷力の面では非常に有効であることがわかった．変形特性についても A－ 1 供試体では特に変形が大きく，最高荷重時の変位で A－ 2 供試体に比べて約 3 倍， A－ 3 供試体に比べて約 2 倍となっている．これは， A－ 2 供試体， A－ 3 供試体が，十字リブや脚構造を介して第 3 層のモルタルにもせん断耐力を分担させているのに対し， A－ 1 供試体では全ての水平荷重に対してアンカーボルトのせん断耐力だけに抵抗させているからであろう．

A－ 2 と A－ 3 を比較してみると最大耐荷力や変形特性には大きな差はない．しかし，その破壊性状に注目すると大きな違いがみられる． A－ 2 ではアンカーボルトの変形を伴いつつ十字リブ前面のモルタルがせん断破壊を起こした．一方， A－ 3 ではアンカーボルトが変形していない状態でライナー周りのコンクリート躯体が広範囲に割裂破壊している．一般に，コンクリートの破壊は脆性的であり，実際のメタルライナーの定着構造を考えると，アンカーボルトにも耐力を分担させアンカーボルトを先に降伏させる方が望ましいと考えられる．また，群としてのメタルライナーの挙動を考えると，周辺コンクリートを損傷しない十字リブ付きライナーをアンカーボルトで取り付けた R タイプの定着構造の方が有利であると考えられる．

(2) 平板ライナーを用いた一面せん断実験結果（A－ 1）と斜め荷重載荷実験結果（B－ 1）との比較

F タイプの平板ライナーを用いた供試体について一面せん断実験結果と斜め荷重載荷実験結果とを比較する． B－ 1 の破壊も A－ 1 と同じように，アンカーボルトの破断が崩壊原因であった． B－ 1 供試体の斜め方向最大耐荷力を，ライナー表面に垂直な方向とせん断方向に分解すると，それぞれ 96.6tonf， 81.1tonf となる．このせん断耐荷力を A－ 1 供試体の最大耐荷力と比較すると約 60tonf の差がみられ，約 4 倍の大きさである．これは， B－ 1 供試体にはライナーに垂直な方向にかかる圧縮力によりせん断耐荷力が大きく上昇したことを意味する．

(3) 十字リブ付きメタルライナーの強度算定モデル

十字リブ付きメタルライナーの水平荷重に対する強度算定モデルとして、アンカーボルトのせん断強度とリブ前面のモルタルのせん断すべり強度をたし合わせたものを考える。

アンカーボルトのせん断強度¹⁰⁾としてはJ.W.Fisherの式¹¹⁾があるが、ここでは単純な次式を考える。

$$Q_{su} = 4 \frac{A_s \sigma_u}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 A_s ：アンカーボルト1本当りのせん断部面積(cm^2)， σ_u ：アンカーボルトの引張強さ(kgf/cm^2)である。この式は、アンカーボルトの破断強度まで考えるために、von Misesの降伏条件式を拡張して、降伏点応力の代わりに引張強さを使ったものである。リブの前面のモルタルのせん断強度 τ_u は、モルタルの一軸圧縮強度 σ_u から求められる無筋コンクリートのせん断強度の以下の推定式を用いる。

$$\tau_u = 0.98 \sigma_u^{2/3} \dots\dots\dots (2)$$

0.98はMohr説から導かれた係数である。リブ前面のモルタルのせん断耐荷力 Q_{ou} は上式から求められる τ_u と、せん断破壊面の面積 A との積で与えられるとする。

$$Q_{ou} = A \tau_u \dots\dots\dots (3)$$

実験で得られた材料強度と測定されたリブ前面のせん断破面の面積を用いて、A-2とC-1～C-4供試体のアンカーの受け持つ分担力とリブの前面のモルタルの分担力を、式(1)と式(3)で求め、実際に実験で得られた供試体の耐荷力と比較したものを図-13に示す。図-13において算定耐荷力は実験から求めた耐荷力の91.8%から110.2%という値を示しており、実際の耐荷力をうまく推定している。また、十字リブとアンカーボルトの荷重分担率は、A-2供試体とC-1供試体ではともにリブ高さが5cmであり、十字リブの分担率が51.2%、50.6%と、ほぼ全強度の半分を分担している。C-2供試体は、リブの分担率が36.9%となり、A-2供試体、C-1供試体に比べて約14%低い割合を示している。これはC-2供試体ではアンカーボルトの径が太く、その分だけアンカーボルトの荷重分担が増えたものと考えられる。ただし、後で示すがC-2供試体では、最高荷重に達した後に、リブ前面のモルタルがすべり破壊を始めるとA-2などに比べると耐力の減少が大きいため吸収エネルギーは多少小さい。

C-3供試体、C-4供試体ではリブの分担率がそれぞれ41.2%、55.3%でありA-2供試体、C-1供試体に比べてC-3供試体は約10%低く、C-4供試体は約5%高い割合を示している。これはC-3供試体ではリブの高さが3cmと他のものより2cm低く、またC-4供試体ではリブの高さが7cmと他のものより2cm高いのでその分だけ荷重の分担がC-3では小さくなり、C-4では大きくなったものと考えられる。

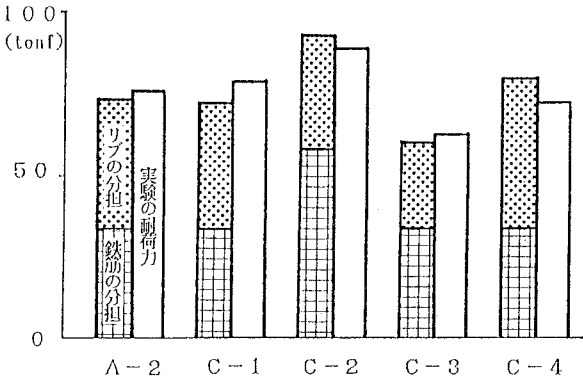


図-13 モデルの算定耐荷力と実験値の比較

表－6 最高荷重時と5%除荷時の変位と吸収エネルギー

供試体	最大荷重 P_{max} (tonf)	P_{max} 時の変位 $\delta_{P_{max}}$ (mm)	5%除荷時の変位 δ_{P95} (mm)	$\frac{\delta_{P95} - \delta_{P_{max}}}{\delta_{P_{max}}}$ (%)	P_{max} までの 吸収エネルギー $E_{P_{max}}$ (tonf・m)	5%除荷時までの 吸収エネルギー E_{P95} (tonf・m)
A－1	20.6	9.6	9.8	2.1	0.17	0.17
A－2	76.9	2.9	3.8	31.0	0.22	0.31
A－3	82.5	4.7	6.2	31.9	0.36	0.54
C－1	79.0	3.4	5.0	47.1	0.23	0.26
C－2	88.9	2.4	3.1	29.2	0.17	0.24
C－3	63.4	1.8	2.4	33.3	0.09	0.14
C－4	72.6	8.1	---	---	0.51	---

(4)吸収エネルギー

メタルライナーのエネルギー吸収量を荷重と水平変位の積の仕事量で表すと、エネルギー吸収量は荷重－変位曲線において曲線と変位の軸で囲まれた部分の面積で表される。AシリーズとCシリーズの各供試体の最高荷重時の変位までの吸収エネルギーおよび最高荷重時から5%除荷したときの変位の吸収エネルギーを表－6に示す。

最高荷重 P_{max} までの吸収エネルギーを比べると、脚付きライナーのA－3が他のものよりも大きく1.5倍から4倍の値となっている。A－3は最高荷重の後も比較的安定して変位が増加している。しかし、A－3は破壊に至るまでに周辺コンクリート部に広範囲にひび割れを発生させており、1個のライナー取付構造としてのエネルギー吸収能および変形能としては優れているといえるが、図－1に示すような実際における群ライナーの場合、周辺のコンクリート部に損傷を与えるため、全体としての耐荷力および変形能に優れているとはいえない。

C－4の終局状態は脆性的で不安定であり、かつ、十字リブの先端からクラックが発生し、周辺コンクリートを損傷するため、A－3と同じ問題がある。リブ高さ5cmのリブ付きライナーの供試体A－2、C－1およびC－2は最高荷重時から5%除荷したときまでの吸収エネルギー量は同じ程度であり、崩壊状況はリブ前面のコンクリートの破壊面がリブの下端から発生してメタルライナーの前部に達するため、周囲のコンクリートの強度に影響を与えない。したがって、多数の群体としての耐荷力を考えると、ライナー1個当たりの耐荷力をそのままたし合わせて全体の耐荷力として評価することができると考えられ、3種のリブ高さの中では5cmのリブ高さのメタルライナーが最終的に最も優れていると考えられる。

5. 結論

本実験的研究で得られた主な結論は以下のようである。

- 1) 3種の形状のメタルライナーの内、アンカーボルトのみで水平荷重に抵抗する平板ライナー（Fタイプ）は、強度およびエネルギー吸収の点で、他の2種のライナーより性能が落ちる。
- 2) 脚付きライナー（Lタイプ）の構造では、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のRタイプの構造よりも優れているが、コンクリート躯体に広範囲に割裂破壊を発生し、実際の構造物に用いるには不向きであり、本研究で考案した十字リブ付きライナー（Rタイプ）が最も優れている。

- 3) 十字リブ付きライナーのRタイプの構造は、アンカーボルトと十字リブ前面のモルタルが荷重を分担して受け持ち、定着構造としてリブ高さ5cmでアンカーボルト径D19を用いたものがアンカーボルトとリブ前面のモルタルによる荷重の分担率が約50%ずつとなり、耐力や安定性、エネルギー吸収能の点で最も優れていることが実験から明かになった。
- 4) 十字リブ付きライナーの一面せん断強度を求める簡易モデルを提案し、実験値をうまく説明できることを実証した。

今後の課題として、以下の項目を継続研究中である。

- 1) 衝撃荷重載荷実験を行い、荷重の評価とライナーに発生する動的効果を考慮する。
- 2) 群体として設置されたメタルライナーの耐力と変形性能の把握を行なう。
- 3) 有限要素法により、この種の定着構造をモデル化し、種々のパラメトリック解析を行い、エネルギー吸収能力をも解明できる力学モデルを構築する。

なお、この研究の一部は平成2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、栗本コンクリートにより入念に製作された。また、供試体の作成方法およびコンクリートの挙動などについて名古屋大学の二羽助教授に助言をいただいた。ここに深謝致します。

参考文献

- 1) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，1985。
- 2) 林卓夫，田中吉之助：衝撃工学，日経工業新聞社，1988。
- 3) 水山高久：砂防ダムに対する土石流衝撃力の算定とその問題点，新砂防，112号，1987，pp. 40-43。
- 4) 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，1989，pp. 1195-1104。
- 5) 砂防・地すべり技術センター：鋼製砂防構造物設計便覧，1987。
- 6) 水山高久，中西宏，松村和樹：大口径鋼管に対する衝撃載荷試験，砂防学会誌，Vol. 28，No. 9，1985，pp. 10-15。
- 7) 水山高久，鈴木浩之：鋼管の衝撃による変形と破壊，砂防学会誌，Vol. 41，No. 4，1988，pp. 11-20。
- 8) 石橋毅：ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗損傷に関する水理学的研究，土木学会論文報告集，No. 334，1983，pp. 103-112。
- 9) 谷口紀男：硬脆材料の衝撃破砕加工法，誠文堂新光社，1959。
- 10) 日本建築学会：各種合成構造設計指針，1985。
- 11) J.W.Fisher et.：Shear Strength of the Stud Connectors in Length-Weight and Normal-Weight Concrete, AISC, 1971, pp. 270-279。
- 12) 土木学会：国鉄構造物設計標準解説，1983。
- 13) 石橋忠良，吉野伸一：鋼棒ストッパーの設計，構造物設計資料No73, 1983。
- 14) 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)，1990，pp. 11-20。

(1991年9月30日受付)