

鋼製落石防護柵の落石による衝撃特性

IMPULSIVE BEHAVIOR OF STEEL ROCK BARRIERS UNDER A FALLING ROCK

吉田 博*・榎谷 浩**・藤井智弘***・前川幸次****

By Hiroshi YOSHIDA, Hiroshi MASUYA, Tomohiro FUJII and Kouji MAEGAWA

The impulsive behavior for steel barriers protecting a falling rock is experimentally investigated. A sand layer or a pile of used tires is usually laid on the steel barriers as a shock-absorbing material against a falling rock.

Investigation has been carried out from the following points of view :

- (1) a discrepancy of the shock-absorbing potentialities and the effects of a dispersion of an impulsive force through both materials.
- (2) behavior of steel barriers under a static load and a impulsive force.
- (3) the effect of flexibility of steel barriers upon the impulsive behavior.

From the test results the impulsive design load and the applying area of it to the barriers are proposed.

Keywords : impulsive force, barrier, shock-absorb, design load

1. 緒 言

道路を落石から保護する対策としては、落石のおそれのある石を取り除いたり、抑えたりする発生源側で行う対策と、岩石が実際に転落してきたときに、道路に与える影響をできる限り軽減・防護するために斜面途中および道路側で行う対策に分けられる¹⁾。

本研究で取り扱う落石防護柵は、後者の対策工の1つであり、一般に斜面の途中に設けられ、落石の停止、あるいは落石エネルギーの低減を目的としている。

落石防護柵は、架設地点が一般に山の斜面部であるため、資材の運搬・架設は人力によることも多く、資材の重量が制限される場合が多い。鋼製の防護柵は、コンクリートを用いた場合に比べ、重量を著しく軽減できるという利点を有している。また、コンクリートに比べ剛性の比較的低い構造にできるため、たわみ性による衝撃力の軽減もある程度期待できる。通常、防護柵上には砂(サ

ンドクッション)あるいは古タイヤ(タイヤクッション)が衝撃緩和材として敷かれている。落石覆工(ロックシェッド)上のサンドクッションについては、これまでの研究によりその衝撃緩和能力やその分布幅がかなり明確にされている^{2)~10)}。しかし、落石防護柵上のサンドクッションおよび前述の施工性および経済性の観点から用いられるタイヤクッションについては、ほとんどその衝撃緩和能力および荷重の分散効果が明らかにされていないのが現状である。

本研究では、砂および古タイヤを鋼製落石防護柵のクッション材として用いた場合の落石時の衝撃緩和能力および衝撃力分布等の衝撃特性を実験的に明確にする。具体的には、以下の点について実験的に検討を行う。

- ① 鋼製落石防護柵のタイヤクッションとサンドクッションの緩衝能力および分散効果の相違
- ② 鋼製落石防護柵の静的荷重に対する挙動と落石の衝撃による動的挙動との相違
- ③ 鋼製落石防護柵の衝撃特性に与えるたわみ性の影響

これらの実験結果の検討より、落石の衝撃力が作用したときの鋼製落石防護柵の動的特性を明らかにし、その合理的な設計のための基礎的資料を提示する。

* 正会員 工博 元・金沢大学教授

(〒932-01 小矢部市水島561)

** 正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科

(〒920 金沢市小立野2-40-20)

*** 正会員 金沢大学自然科学研究科システム科学専攻博士課程(同上)

**** 正会員 工博 金沢大学講師 工学部土木建設工学科(同上)

2. 実験の概要

図-1は落石防護柵の一般的な構造図を示したものである。壁材は比較的剛性の大きなH形鋼(メインポスト)により数m間隔で支持され、そのH形鋼は山側でコンクリート基礎とH形鋼(底部つなぎ材)で、谷側では、H形鋼の柱(サポート)によりさらに支持されている。また、壁材上にはクッション材が敷かれている。

(1) 供試体

本研究では、図-1に示したような落石防護柵の壁材1スパン分を取り出し、これをH形鋼を介して支持しているサポート(H形鋼の柱)と底部つなぎ材の代わりとして剛性の非常に大きなH形鋼を基礎材として用いる供試体を使用することにした。

一般に、構造物上に落下する落石による衝撃力は、落石の質量とその速度、および構造物の剛性の相互作用により決定される。

構造物の剛性が衝撃力に及ぼす影響を検討するために、図-2に示すような比較的剛性の大きい構造の供試体Aと、比較的剛性の小さい構造の供試体Bの2つの落

石防護柵を用意し、静的実験および衝撃実験を行った。

供試体AおよびBとも静的試験は弾性範囲内で行い、供試体Aを1体、供試体Bについては、衝撃試験を後述の2種のクッション材に対して破壊まで実験を行うため、2体用意した。

a) 供試体A

衝撃特性に与える構造物の変形の影響を比較するため、後述の供試体Bに比べ、剛性の高い図-2に示す構造物(供試体A)を用意した。

供試体Aは、供試体Bに比べ、壁材として曲げ剛性の大きなH形鋼を使用している。また基礎材による支持間隔も供試体Bに比べ小さく、基礎材のたわみの影響が現われないようになっている。

壁材として、SS41(降伏点応力度 2400 kgf/cm^2)、断面の高さ 294 mm 、フランジ幅 200 mm ($H294\times 200\times 8\times 12$)、長さ 3.2 m のH形鋼11本を 30 cm 間隔に並置し、各H形鋼は両端で単純支持(スパン 3.0 m)した。さらに、両端の支持材($H300\times 300\times 10\times 15$)を支持している基礎材($H300\times 300\times 10\times 15$)の間隔は 1.8 m とした。

なお、以後中央の5本のH形鋼を、それぞれ壁材No.1~壁材No.5とよぶことにする。

b) 供試体B

衝撃特性に与える構造物の変形の影響を検討するために、図-2に示す比較的たわみやすい構造物(供試体B)を用意した。これは、実際に落石防護柵として一般に使用される規模のものである。

この壁材としては、供試体Aに比べ、曲げ剛性の小さなH形鋼を使用し、また基礎材の支持間隔も供試体Aに比べ大きくなっている。

壁材として、SS50(降伏点応力度 4200 kgf/cm^2)、断面の高さ 125 mm 、フランジ幅 125 mm ($H125\times 125\times 6.5\times 9$)、長さ 3.0 m のH形鋼を 30 cm 間隔に11本並置し、実際と同じように各H形鋼は両端の支持材($H294\times 200\times 8\times 12$)にボルト締めされている。

なお、供試体Aと同様に、以後中央の5本のH形鋼を、それぞれ壁材No.1~壁材No.5とよぶことにする。

(2) クッション材

供試体A、供試体Bのおのおのに対して、クッション材として以下の2通りのものを用意した。

a) サンドクッション

11本のH形鋼の壁材の上に、鋼材に比較して剛性の低い厚さ 1 cm のベニヤ板を敷き、その周囲を鉄製型枠で囲んで、一様な厚さ(70 cm)に砂を敷いたものをクッション材として使用した。衝撃試験においては、サンドクッションは連続2回の重錘落下ごとに砂の掘返しを行った。

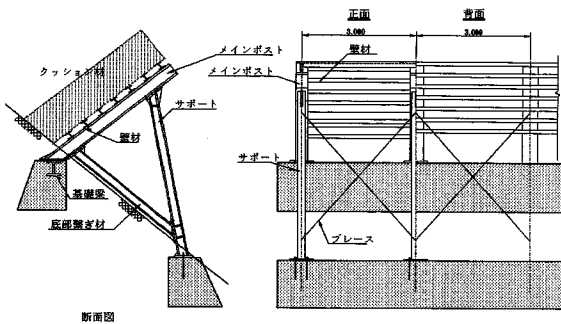


図-1 落石防護柵

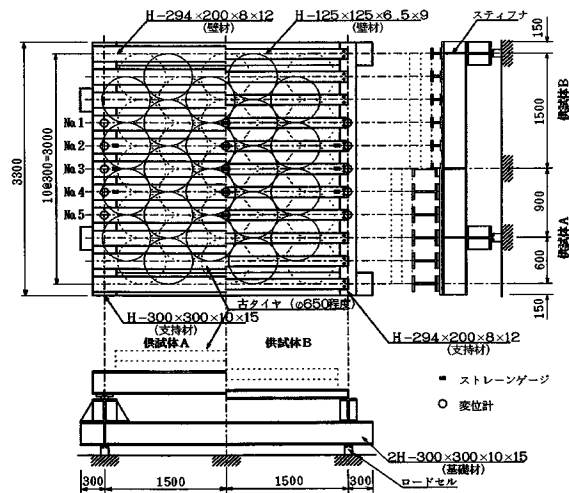


図-2 供試体

表—1 用いたサンドクッション材の特性

10% 粒径	30% 粒径	60% 粒径	均等係数	曲率係数
D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	U _c	U
0.095	0.125	0.145	1.53	1.13

用いた砂の主な特性を表—1 に示す。

b) タイヤクッション

古タイヤを並べたものを使用した。段数は、2段、3段および5段の3通りとし、それぞれに対して図—2 に示す実線と点線配置を交互に行い、最上段を実線または点線配置とする2通りの並び方で実験を行った。以後、最上段のタイヤが実線の並び方のとき、その配置を実線配置、また、点線の並び方のとき、その配置を点線配置とよぶことにする。なお、古タイヤは直径約65cm(直径26inch)の普通タイヤである。衝撃試験においては、各タイヤは隣接するタイヤとばん線により連結した。

(3) 載荷方法

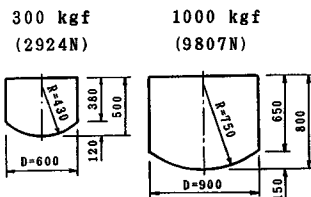
a) 静的載荷試験

クッション材の上面の載荷位置には直径60cm、厚さ1.5cmの鋼製円形載荷板を置き、そこにオイルジャッキ(高津製作所製サーボバルサー、容量40tf)を用いて静的集中荷重を供試体A、供試体Bともに壁材の中央位置、すなわち壁材No.3のSPAN中央上の位置に載荷した。

実験は弾性範囲内で行うため、壁材として用いるH形鋼の降伏荷重を考慮し、最大載荷荷重の大きさは、供試体Aの実験では20tf、供試体Bの実験では7tfとした。また、各クッション材について、次に示す2通りの載荷方法で実験を行い、それらがクッション材に与える影響を比較した。

- ① 最大荷重まで途中で除荷することなく、単調に荷重を増加させていく方法。
- ② 載荷および除荷を繰り返して、徐々に荷重を最大荷重にまで増加させていく方法。

載荷荷重とクッション材の変形の関係を調べるために、レベルを用いて載荷板の沈下量を測定した。



図—3 使用した重錘

荷重は図—2 に示すように、供試体を支持している4個のロードセル(容量20tf)で測定した。

変位の測定は、支点沈下の影響を考慮するために、供試体A、Bともに、中央の5本の壁材(No.1~No.5)のSPAN中央と両支点に各1点ずつ、合計15個の変位計を取り付けて行った。ひずみの測定は、供試体A、Bともに、中央の5本の壁材(No.1~No.5)のSPAN中央の上下フランジに対称に各4点ずつひずみゲージを貼り付けて行った。なお、壁材が両端で支持材にボルト締めされている供試体Bには、さらに中央3本の壁材(No.2~No.4)の両端付近の上下フランジにも各4点ずつひずみゲージを貼り付けた。

b) 衝撃試験

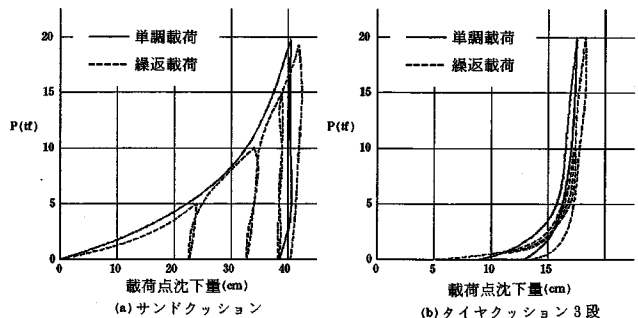
金沢大学落石実験場にある重錘吊り上げ用の鉄塔(高さ24.8m、塔底部幅7.4m×6.52m)の最上部にホイストクレーン(容量5.0tf)を取り付け、これに落下装置と重錘を同時に吊り上げ、落下装置を電氣的に作動させることによって、重錘を初速度零で鉛直自由落下させた。落石として用いた重錘は、重量が0.3tfと1tfのもので、図—3 に示すようにいずれも底面は球形である。ただし、1tfについては破壊実験時のみ使用した^{8),9)}。

静的実験と同様に、供試体A、Bともに落石防護柵の中央位置に落石を落下させた。

弾性範囲内での実験については、重量0.3tfの重錘を用い、測定ひずみが弾性限界近くに達するまで、順次落下高さを大きくして衝撃実験を行った。

さらに、落石防護柵の破壊挙動を調べるために、供試体Bのサンドクッションに対して、1tfの重錘を用い、落下高さを大きくして落石防護柵が破壊するときの衝撃加速度、衝撃反力等の測定および破壊性状の観察を行った。

測定項目は以下の4項目であるが、それらの測定値は2台のマイクロコンピューター(TEAC社製、PS-80およびPS-85)に入力し、500Hzのサンプリング周波数で2秒間A/D変換を行い(データ数1000)、その数値データをカセットテープに記録した。



図—4 クッション材の静的特性

なお、測定装置の関係で、以下の測定項目すべてを同時に測定することはできないので、衝撃加速度、衝撃反力、変位計の組合せと衝撃加速度、衝撃反力、ひずみの組合せの2組に分けて実験を行った。

- ① 衝撃加速度 重錘を所定の高さから初速度零で鉛直落下させて、重錘がクッション材に衝突し、静止するまでの重錘の衝撃加速度を測定した。
- ② 衝撃荷重 静的実験と同様に、供試体を4個のロードセルで支持し、おのおのの衝撃反力を測定した。
- ③ 変位 静的実験と同じ位置に変位計を取り付けた。
- ④ ひずみ 静的実験と同じ位置にひずみゲージを貼り付けた。

3. 実験結果

(1) クッション材の静的挙動

タイヤクッションおよびサンドクッションに対する静的荷重とそれに伴う載荷点の沈下量の関係を図-4(a)

および(b)に示す。

タイヤクッション、サンドクッションともに荷重の増加に伴い、載荷点沈下量は増加するが、その増加率は徐々に小さくなっている。特にタイヤクッションにおいては、5tfの荷重に対する沈下量は、20tfに対するものの約90%にも達しており、また、10tf前後からは沈下量の増加はほとんどみられず、タイヤは完全につぶれてしまったものと思われる。サンドクッションの場合、載荷点沈下量の増加率の減少の程度は、タイヤクッションに比べ緩やかであり、20tf以上の荷重に対してもまだ沈下は進行するようである。

次に、繰り返し載荷に対するタイヤクッションとサンドクッションの挙動を比較してみる。サンドクッションの場合、最大荷重時の沈下量は、除荷時にはほとんど復元せず残留し、載荷時と異なる径路をたどる。再載荷時には履歴最大荷重までは、除荷時と同じ径路をたどり、履歴最大荷重に達した後に、沈下量の増加が認められる。

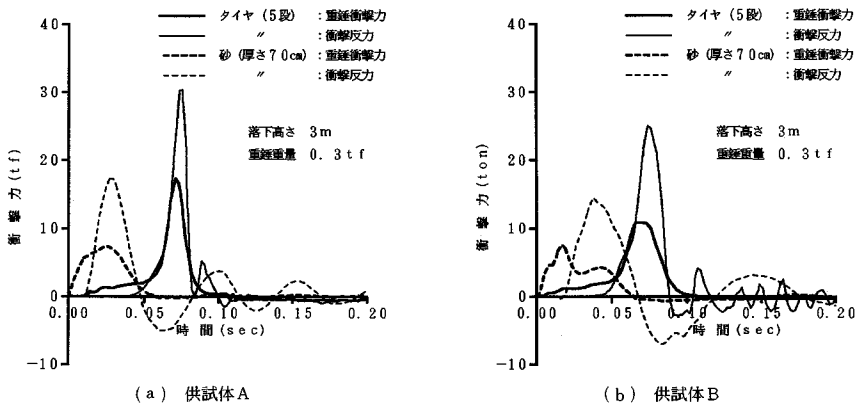


図-5 衝撃力の時間的变化

表-2 衝撃力の時間的变化の特徴

	重錘 衝撃力	衝撃反力
衝撃波形	サンドクッションの場合、重錘の衝突と同時に重錘衝撃力は立ち上がり、衝突後0.06秒程度で消失するのに対し、タイヤクッションの場合には、衝突後しばらくは緩やかに増加した後、ある時点より急激な増加を見せる。この場合に見られる急激な重錘衝撃力の増加点(屈曲点)は、静的載荷実験で認められたと同様、タイヤクッションが完全に潰れた時点を示していると考えられる。 供試体AとBを比較すると、サンドクッションの場合は供試体Aでは、重錘衝撃力は単調に増加し、最大値に達したのち、また、単調に減少する波形を示しているのに対し、供試体Bの波形は2つのピークを有している。タイヤクッションの場合には、供試体Aの波形のピークは鋭いのに対し、供試体Bでは、供試体Aの波形を途中で切断したような形になっている。これらは、供試体のたわみ性の影響と考えられる。	サンドクッションの場合、重錘衝撃力の波形は2つのピークを有していたが、衝撃反力の波形は滑らかな1つのピークを有する波形に成っている。タイヤクッションの場合には、供試体AおよびBとも、波形はさらに滑らかに成っている。 サンドクッションの場合、重錘衝撃力の作用時間がほぼ同じであるにもかかわらず、供試体Aでは衝撃反力は重錘の衝突後約0.05秒後に零となるのに対し、供試体Bでは約0.07秒後に零となっている。タイヤクッションの場合の衝撃反力は、供試体Aでは幅が狭く、鋭い波形を有しているが、供試体Bでは供試体Aのものより幅が広く、ピークも小さくなっている。これらは、供試体のたわみ性の影響と考えられる。
時間	タイヤクッションの場合、供試体AおよびBとも重錘衝撃力のピークは重錘の衝突後約0.07秒後に発生しているが、サンドクッションの場合、供試体Aで約0.025秒後に、供試体Bでは約0.015秒後に発生している。 タイヤクッションとサンドクッションでは、重錘衝撃力のピークの発生時間に約0.05~0.06秒の差が生じている。	サンドクッションの場合、衝撃反力は重錘衝突後約0.01~0.015秒後に立ち上がっているが、タイヤクッションの場合には、約0.04秒後から立ち上がっている。 衝撃反力のピークが発生する時間は供試体AおよびBとも、重錘衝突後サンドクッションで約0.03秒後、タイヤクッションで約0.075秒後となっており供試体による差異は認められない。
減衰波形	重錘衝撃力の波形は、サンドクッションおよびタイヤクッションとも、また供試体AおよびBとも、一旦零に戻った後はほとんど変化していない。	タイヤクッションの場合、衝撃反力は供試体Bで僅かな減衰振動が見られるものの、供試体Aでは振動はすぐに減衰している。しかし、サンドクッションの場合には、供試体AおよびBとも大きな減衰振動を示し、振動周期は供試体AよりBが大きくなっている。 これらは、クッション材の質量の相違と供試体のたわみ性の影響と考えられる。

タイヤクッションの場合、除荷時には載荷時とほぼ同じ径路を下降し、タイヤの形状がほぼ完全に復元する。

(2) 衝撃力

落石により落石防護柵に作用する衝撃力としては、重錘が受ける力の反作用としての力を単に衝撃力とする方法と厳密に構造物の最上面、すなわちクッション底で発生する力より求める方法がある。本実験では、重錘の加速度と支点反力の測定は行っているが、クッション底での荷重の測定は困難であるので厳密な意味での衝撃力は算出できない。よって本研究では次のような力を衝撃力としている。

a) 重錘がクッション材に衝突するときに重錘に発生する衝撃加速度(負値)より重錘が受ける衝撃力(衝撃加速度に重錘の質量を乗じたもの)を求め、これを落石防護柵に作用する衝撃力としたもの。以後、これを重錘衝撃力とよぶ。

b) 落石防護柵を支えている4個のロードセルのおおのにおこに発生する衝撃荷重を合計し、これを衝撃力としたもの。以後、これを衝撃反力とよぶ。

a) 衝撃力の時間的変化

図—5(a) および (b) は、それぞれ供試体 A および B のサンドクッションおよびタイヤクッションに対する重錘衝撃力(それぞれ太い実線および破線)および衝撃反力(それぞれ細い実線および破線)の時間的変化を示す。図中、時間は重錘がクッション材に接触する瞬間を $t=0$ としている。

これらの図から、表—2 のような特徴が観察できる。

b) 落下高さとの関係

サンドクッションおよびタイヤクッション上への重錘の落下高さとの最大衝撃加速度との関係を、それぞれ、図—6(a) および (b) に示す。

サンドクッションおよびタイヤクッションとも供試体 A の方が供試体 B よりも剛性が高いため、同一落下高さでの最大衝撃加速度は、タイヤクッションおよびサンドクッションとも、若干ではあるが供試体 A の方が大きい。

サンドクッションの場合、掘り返し直後の重錘落下の衝撃加速度より2回目の重錘落下の衝撃加速度が大きくなっている。また、タイヤクッションの場合、タイヤの段数が多いほど最大衝撃加速度は小さくなるのがわかる。2段に比べ、3段では3分の1以下、5段では8分の1以下となる。

また、同一落下高さおよび同一タイヤ段数に

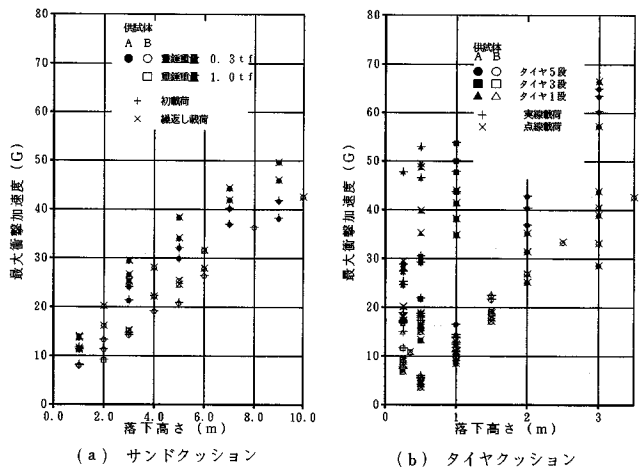
対しタイヤの実線配置の方が最大衝撃加速度は大きい。タイヤクッションとサンドクッションの同一落下高さにおける最大衝撃加速度を比較すると、タイヤクッションの方が大きいことがわかる。

c) 重錘衝撃力と衝撃反力の関係

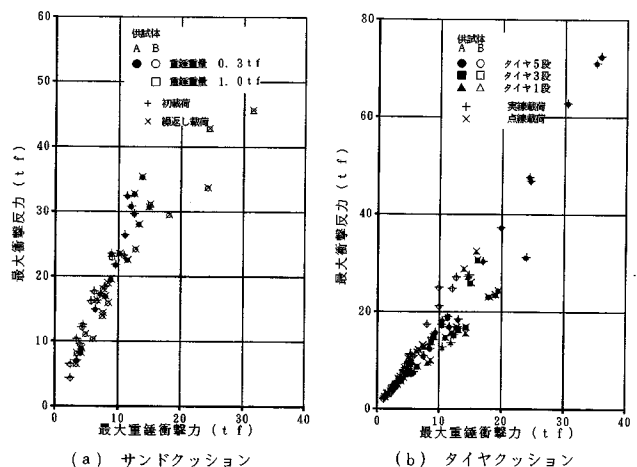
前述したように、最大重錘衝撃力と最大衝撃反力とは一致せず、常に最大衝撃反力の方が大きい。

図—7(a) および (b) は、タイヤクッションおよびサンドクッションの、おのおのの実験における最大重錘衝撃力と最大衝撃反力の関係を示す。

タイヤクッションおよびサンドクッションともに、最大重錘衝撃力と最大衝撃反力はほぼ比例関係にあり、その比例定数は、供試体 A と供試体 B においてほとんど差が認められないが、タイヤクッションおよびサンドクッションとも、最大衝撃反力の方が最大重錘衝撃力よりも大きい。これは、クッション材と壁材の質量が及ぼす動



図—6 落下高さとの最大衝撃加速度



図—7 最大衝撃加速度と最大衝撃反力

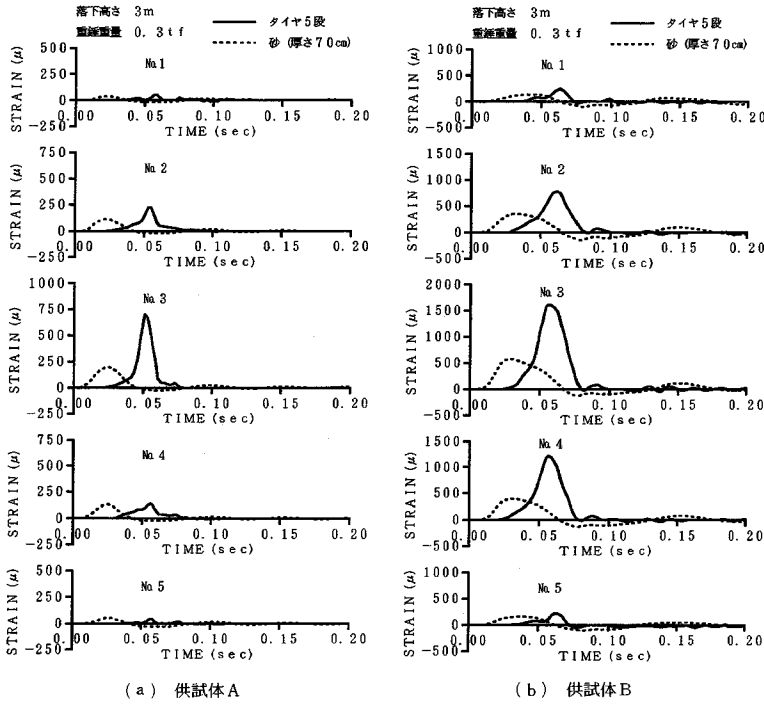


図-8 壁材フランジのひずみの時間的变化

的影響のためであると推定される。また、タイヤクッションとサンドクッションを比較した場合、タイヤクッションでは最大衝撃反力は最大重錘衝撃力の約1.2~2.2倍であるのに対して、サンドクッションでは約1.9~2.7倍である。これは、サンドクッションがタイヤクッションに比べ質量がかなり大きいためと考えられる。

(3) ひずみおよびたわみ

図-8(a) および (b) は、図-5に示した4ケースの実験に対するH形鋼上下フランジの平均ひずみの時間的变化を表わしている。壁材上の質量の大きいサンドクッションの場合には、最初の衝撃波形の後は、減衰自由振動をしており、その周期は供試体Aより供試体Bのものが長くなっている。質量の小さいタイヤクッションの場合には、大きな衝撃

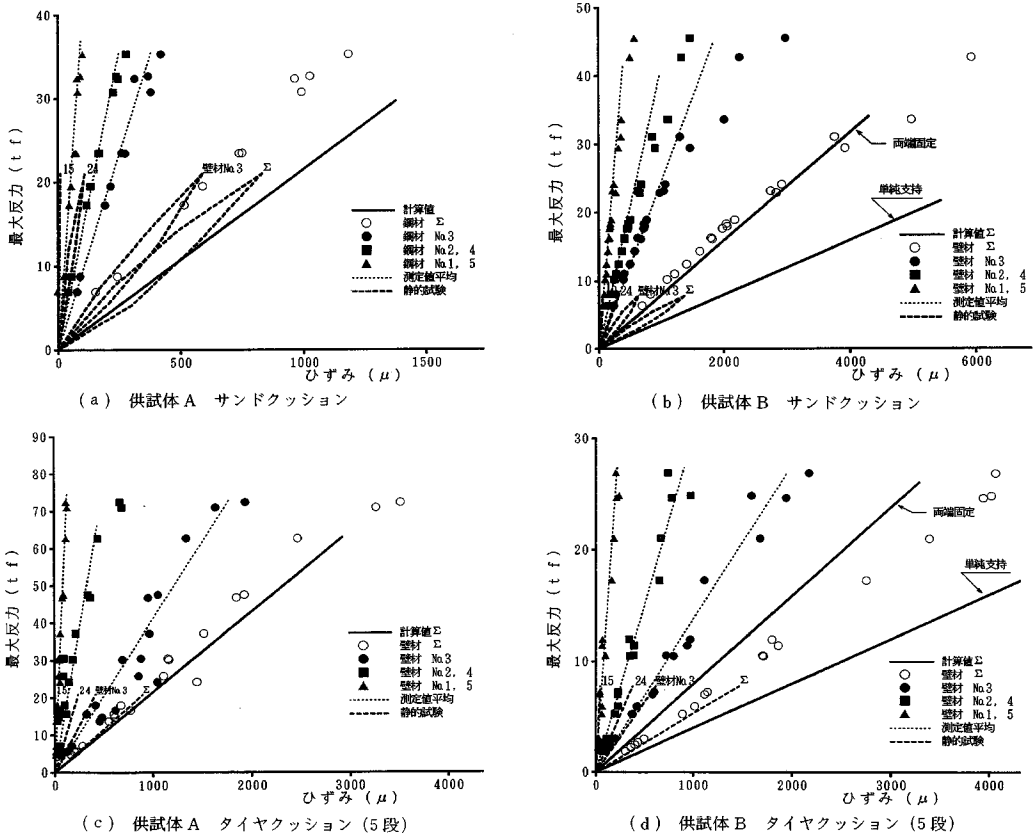


図-9 最大衝撃反力と壁材フランジのひずみ

波形後の減衰振動が認められない。これらより、最初の衝撃波形の後の減衰振動は、クッション材の質量と壁材の剛度に影響されている。同様の傾向はたわみの時間的変化についても認められる。

次に、図-9(a)~(d)は、そのおのおのについての静的試験の反力および最大衝撃反力と各壁材のひずみの関係を示す。ただし、壁材 No.3 (●印) についてはその測定値が、壁材 No.1 と壁材 No.5 (▲印) および壁材 No.2 と壁材 No.4 (■印) のひずみについては、対称性より、それぞれ2つの測定値の平均値がプロットされている。図中の○印は壁材 No.1~壁材 No.5 のひずみの合計で、太い実線は荷重が1本の壁材のスパン中央に集中荷重として静的に作用した場合のひずみの計算値である。ただし、供試体Aは壁材が単純支持されているとした場合のみが、供試体Bでは単純支持と両端固定の2つの場合が示されている。また、図中の太い破線は静的載荷試験の結果である。

弾性範囲内ではひずみは荷重に比例するので、作用荷重を集中荷重と仮定すると、全荷重を1本の壁材で負担すると仮定した場合のひずみと複数の壁材で分担する場合の各壁材のひずみの和は一致するはずである。供試体Aの場合、タイヤクッション (図-9(c)) では壁材の測定ひずみの合計が計算ひずみに近い値を示しているが、サンドクッション (図-9(a)) では前者は後者よりかなり小さくなっている。これは、計算ひずみは集中荷重と仮定して計算されているのに対し、サンドクッションでは実際は分布荷重として作用していること、荷重が中央の5本の壁材の外側にまで分布していることなどを示唆している。

また、供試体Bでは、壁材の両端が支持材にボルト締めされているが壁材の両端付近に貼り付けられたひずみゲージの測定より、ボルト締めの影響は認められず、壁材は単純支持されていると考えてよいことが明らかになった。

供試体Bの場合、サンドクッション (図-9(b)) およびタイヤクッション (図-9(d)) と同様に、壁材が単純支持されていると考えた計算ひずみより測定ひずみはかなり小さく、特にサンドクッションではその傾向が著しい。これは、供試体Bではたわみによる衝撃の緩衝効果が期待できること、これに伴う荷重の分散効果が大いことを示唆しており、後にさらに検討を行う。

4. 鋼製落石防護柵の設計衝撃力および分布

以上の実験結果の検討により、衝撃力として最大衝撃反力を用いた場合に、壁材に発生するひずみおよびたわみの計算値と測定値が比較的良好に一致することが明らかとなった。よって、ここでは衝撃力として最大衝撃反力

を用いることにする。

(1) 衝撃力の推定

図-10はサンドクッションを用いた場合の、重錘重量0.3tfに対する落下高さおよび最大衝撃反力の関係をプロットしたものである。図には落石対策便覧の式¹⁾、鋼材クラブの式²⁾、吉田の式^{3),4)}および吉田の式を1.7倍および2.4倍した値が、それぞれ示されている。プレストレストコンクリート製の落石覆工の設計には、その動的特性を考慮して、その値を1.4倍したものを採用することを提案している^{11),12)}。

図-10より、本実験結果に関する限り、鋼材クラブの式は最大衝撃反力を過小評価しており、供試体Bの実験値は落石対策便覧の式にきわめてよく一致しているが、供試体Aの実験値とは一致していない。

図-6(a)にみられる同一落下高さに対する供試体Bの最大衝撃加速度に対する供試体Aの値の比以上に、図-10におけるそれらの最大衝撃反力の比が大きいのは、明らかに供試体AとBの動的特性の相違に起因するものであり、これについては、改めて検討する予定である。

図-5に示した衝撃反力の時間的変化の曲線において、その立ち上がりから零に戻るまでの時間を衝撃力の作用時間とよぶことにすると、図-11は重錘重量0.3tfに対する実験結果より得られた落下高さHと衝撃力の作用時間tの関係を示したものである。落下高さの増加とともに作用時間が短くなっていることがわかる。また、タイヤの段数が減少しても作用時間が短くなること

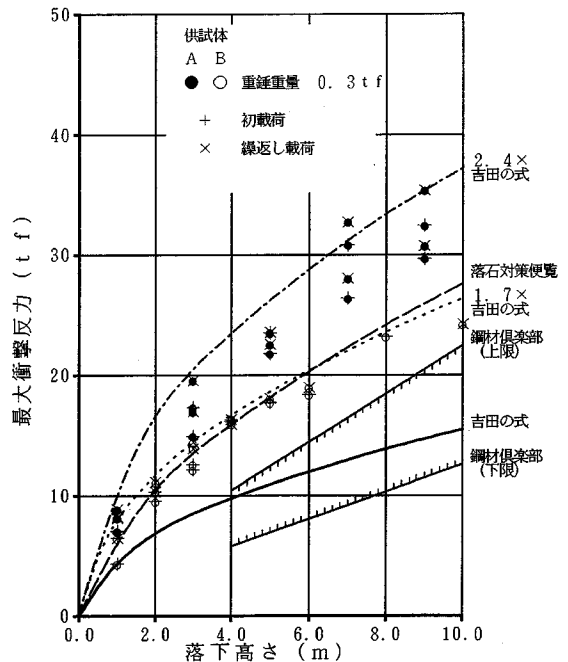


図-10 落下高さと最大衝撃反力 (サンドクッション)

がわかる。

ここで、衝撃反力の作用時間 t が次式で表わされると仮定する。

$$t = \beta H^\gamma (n/n_0)^\delta \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H は落下高さ (m)、 n はタイヤ段数であり、 n_0 は基準となるタイヤ段数であり、ここでは $n_0=5$ とする。タイヤ段数 $n=2$ および 3 に対する実験データは少ないが、最小二乗法により $\beta=0.1096$ 、 $\gamma=0.5072$ 、 $\delta=1.438$ が得られた。図-11 にはこれに対する曲線が示されている。

ここで、衝撃力は重錘の質量と衝突速度に比例し、作用時間 t に反比例すると仮定すると、衝撃反力 P_R は次式で表わされることになる^{11),12)}。

$$P_R = \alpha \frac{W \sqrt{2gH}}{g t} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 α は比例定数、 W は重錘重量 (tf)、 g は重力の加速度 (9.8 m/s^2) である。

図-12 は重錘重量 0.3 tf に対する落下高さと最大衝撃反力の関係を示したものである。図中実線は最小二乗法より得られた $\alpha=5.143$ に対するものであり、破線は

提案設計式としての標準偏差 1.864 の 2 倍を考慮した $\alpha=8.871$ に対するものである。

(2) 荷重分担率

表-3 は、落下高さを変化させた重量 0.3 tf の重錘による衝撃実験において得られた、各実験における壁材のフランジのひずみより求めた荷重分担率の平均値、標準偏差および変動係数が示されている。ここでいう荷重分担率とは、次式により定義されるものである。

$$\mu_i = \epsilon_i / \epsilon_E \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ϵ_E は 5 本の壁材のフランジの測定ひずみの和 $\sum \epsilon_i$ である。

また、表中には壁材が単純支持されている場合に、測定衝撃反力に相当する荷重が 1 本の壁材のスパン中央に作用したと仮定したときの壁材のフランジに発生するひずみ ϵ_s に対する 5 本の壁材の測定ひずみの和 ϵ_E の比 γ_s が示されている。ここに、 γ_s は同一荷重に対する集中荷重と分布荷重により発生するひずみの比を意味し、ここではこれを荷重分布係数とよぶことにする。

図-13(a) および (b) には、供試体 A および B の各壁材の衝撃実験における荷重分担率の平均値が太い実線で、平均値 $\pm 2 \times$ 標準偏差の範囲が斜線で示されている。また、両供試体の静的実験における最大荷重時での分担率が太い破線で示されている。

これらの図より、衝撃実験においては、サンドクッションよりタイヤクッションの方が荷重は中央に集中して作用し、特に剛性の大きい供試体 A において著しい。サンドクッションの場合、荷重分担率の平均値は両供試体においてほぼ等しく、供試体 A においては変動率がきわめて小さくなっているが、供試体 B においては約 3 倍の変動率となっている。

サンドクッションの場合、衝撃実験より静的実験の方が荷重は中央に集中しており、特に供試体 A のとき著しい。しかし、タイヤクッションの場合、衝撃実験の平均値と静的実験とは、供試体 A および B ともほぼ同じになっている。

図-14 に示すように、サンドクッションまたはタイヤクッションの表面に、重錘重量 0.3 tf の投影面積、すなわち、直径 60 cm の円形面積に一樣に荷重が作用し、 θ の角度で荷重が分散して直径 D の円形面積に一樣に作用すると仮定する。

この場合、中央の壁材 No. 3 の荷重状態は図中に示されるようになり、スパン中央の曲げモーメント M_c は次式で与えられる。

$$M_c = \frac{P_R d}{\pi D} \left(l - \frac{D}{2} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 d は壁材の間隔である。一方、中央の壁材 No. 3 の測定ひずみより求まるスパン中央の曲げモーメ

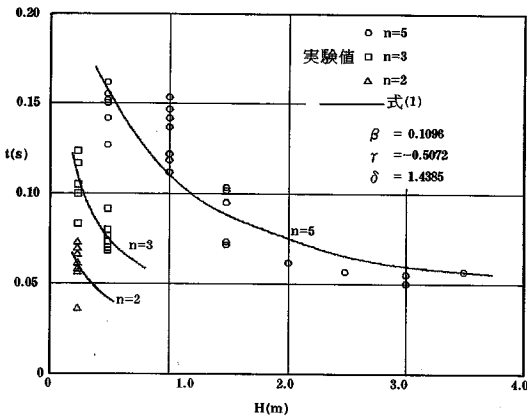


図-11 落下高さと衝撃力の作用時間

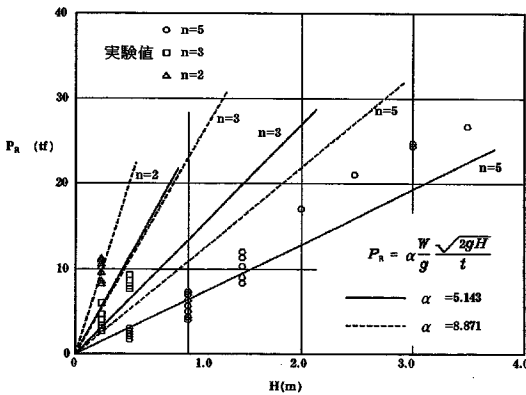


図-12 落下高さと最大衝撃反力 (タイヤクッション)

表—3 各壁材の荷重分担率および計算値との比較

	サンドクッション				タイヤクッション			
	μ_3	$\mu_{2,4}$	$\mu_{1,5}$	γ_s	μ_3	$\mu_{2,4}$	$\mu_{1,5}$	γ_s
供試体A								
実験数	9				11			
平均値	0.367	0.228	0.087	0.675	0.546	0.184	0.043	0.842
標準偏差	0.0129	0.0030	0.0066	0.0354	0.0707	0.0298	0.0071	0.0314
変動率	0.035	0.013	0.076	0.097	0.129	0.162	0.165	0.037
供試体B								
実験数	14				17			
平均値	0.375	0.244	0.096	0.456	0.437	0.224	0.058	0.644
標準偏差	0.0468	0.0327	0.0186	0.0273	0.0681	0.0215	0.0160	0.0217
変動率	0.125	0.134	0.194	0.061	0.156	0.096	0.276	0.034

$\mu_1 = \epsilon_1 / \epsilon_0$, $\gamma_s = \epsilon_2 / \epsilon_0$, $\epsilon_0 = \sum \epsilon_i =$ 壁材の測定ひずみの和
 $\epsilon_{0s} =$ 壁材が単独支持されていると仮定したときの衝撃反力によるひずみ
 $\epsilon_0 =$ 壁材が何個も固定支持されていると仮定したときの衝撃反力によるひずみ

ントは、荷重分担率 μ および荷重分布係数 γ_s を用いて次式で与えられる。

$$M_c = \frac{1}{4} P_R \mu \gamma_s \dots \dots \dots (5)$$

式(4)および(5)を等置して、荷重分布の直径 D は次式より得られる。

$$D = \frac{4dl}{\pi \mu \gamma_s + 2d} \dots \dots \dots (6)$$

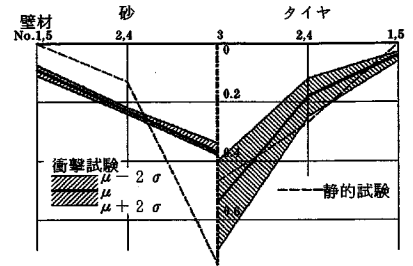
式(6)の荷重幅より求めた荷重の分散角 θ が、供試体AおよびBのサンドクッションおよびタイヤクッションに対して表—4に示されている。衝撃実験においては、荷重分布の直径 d の平均値に対する分散角 θ_1 と平均値 $-2 \times$ 標準偏差に対する分散角 θ_2 が示されている。ただし、供試体Aのタイヤクッションの衝撃実験に対する θ_2 は 90° を越えるので表には記入されていない。

設計では落石の衝撃力はクッション材中を 45° で分散するものとして考慮しているのが一般であるので、これまでの設計法を踏襲するとすれば、落石がタイヤクッションでは約62%、サンドクッションでは26%クッション材中に貫入してから 45° に分布すると考えることができる。この状態を示したのが、図—15である。

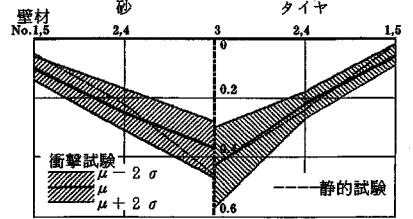
(3) 崩壊時の挙動

供試体Bのサンドクッションを用いた場合、重量1tfの重錘を10mで落下させると中央の壁材No.3のフランジが降伏し、落下高さの増大とともに隣接の壁材No.2およびNo.4のフランジも降伏する。また、供試体Bでタイヤ5段を用いた場合、重量0.3tfの重錘を2.5mから落下させると中央の壁材No.3のフランジが降伏し、以後、サンドクッションの場合と同様の挙動を示す。しかし、壁材の降伏に伴う衝撃の緩衝効果は両者ともほとんど認められていないが、荷重の分担は中央の3本の壁材に集中し、それらの壁材のスパン中央のモーメントは、最終的には全塑性モーメントに到達する。

したがって、式(2)より計算された設計用衝撃荷重

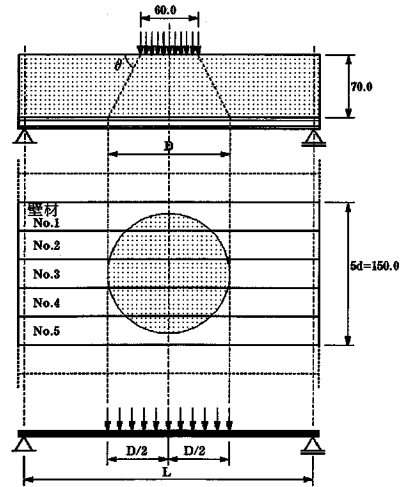


(a) 供試体A



(b) 供試体B

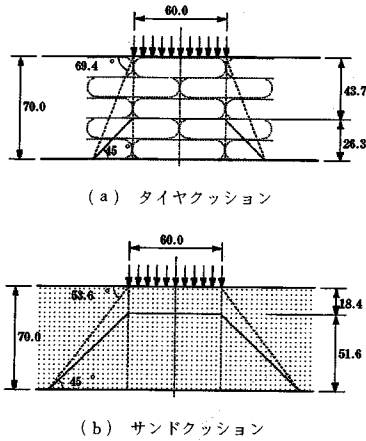
図—13 各壁材の荷重分担率



図—14 荷重の分散と作用幅

表—4 荷重の分布幅

	サンドクッション		タイヤクッション	
	静的載荷	衝撃載荷	静的載荷	衝撃載荷
供試体A				
D (分布幅: m)	0.564	1.230	0.758	0.744
σ (標準偏差: m)	—	0.061	—	0.116
D-2 σ (m)	—	1.108	—	0.512
θ_1 (度)	—	65.8	83.6	84.1
θ_2 (度)	—	70.1	—	—
供試体B				
D (分布幅: m)	0.705	1.632	0.738	1.126
σ (標準偏差: m)	—	0.142	—	0.143
D-2 σ (m)	—	1.348	—	0.840
θ_1 (度)	85.7	53.6	84.4	69.4
θ_2 (度)	—	61.9	—	59.0



図—15 荷重分散モデル

に対し、中央3本の壁材の全塑性モーメントで抵抗するような設計は可能であるが、壁材の過度の変形はメインポスト等の他部材の変形を誘発し、補修が困難になることに留意する必要がある。

5. 結 論

本研究では、剛性の異なった2種の壁材を用いた落石防護柵の供試体に、クッション材としてタイヤと砂を用い、それぞれの静的載荷実験結果、および重錘を落下して行った落石実験結果の検討より以下の結論を得た。

(1) 鋼製落石防護柵の設計衝撃荷重は、衝撃反力を用いるのが妥当である。本研究で用いたサンドクッションの層厚70cmの場合、その大きさは壁材の剛性およびスパンにより変化する。実験に用いた壁材の範囲では、吉田の式の1.7~2.4倍の値であるが、一般的には動的応答解析等により、さらに検討することが必要である。

また、タイヤクッションを用いた場合、実際に一般的に用いられる壁材を有する防護柵に対しては、次式による設計衝撃反力を用いればよい。

$$P_R = 8.871 \frac{W}{g} \frac{\sqrt{2gH}}{t} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 W は重錘重量 (tf)、 H は落下高さ (m)、 g は重力の加速度 (9.8 m/s^2) であり、 t は次式により与えられる。

$$t = 0.1096 H^{-0.5072} (n/5)^{1.438} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 n は使用タイヤ段数2, 3または5である。

(2) (1)で得られた設計衝撃反力は、実験に用いた重錘で、サンドクッションの場合、その厚さの約26%貫入し、タイヤクッションの場合、約62%貫入してから45°の角度で分散すると考えてよい。

(3) 実験の範囲内では、崩壊時においては落石の落

下直下の3本の壁材で抵抗し、これらの壁材のスパン中央の曲げモーメントが全塑性モーメントに到達する荷重をこの防護柵の耐荷力と考えてよい。

(4) 落石による衝撃力の緩衝効果および分散効果に関しては、クッション材として砂が有利と考えられるが、斜面上の運搬、維持、管理などを考えると、古タイヤが有効と思われる。

謝 辞：本研究にあたりご協力頂いた陵城成樹氏（当時金沢大学大学院修士課程）および清水 公氏（当時金沢大学学部生）に感謝致します。また、数値計算およびデータ整理には、金沢大学情報処理センター電子計算機 FACOM M 760/10 を使用した。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983年7月。
- 2) 鋼材倶楽部：新しい落石覆いの開発に関する研究，鋼材倶楽部，研究報告書，1973年4月。
- 3) 吉田 博・竹島 忠・古市進作・石塚賢吉：ロックシェッド上の落石による衝撃力の推定に関する実験，道路，pp.35~41，1976年10月。
- 4) 吉田 博・石塚賢吉・細川 豊：ロックシェッド上の落石による衝撃力の推定法に関する研究，道路，pp.38~43，1978年2月。
- 5) 建設省土木研究所動土質研究室：敷砂上の落石による衝撃力の推定に関する実験報告書，土木研究資料，1822号，1982年3月。
- 6) 吉田 博・榎谷 浩：落石の衝撃力実験結果と各種推定式の関連について，第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp.9~16，1983年7月。
- 7) 佐々木康・古賀泰之：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 340，pp.127~137，1983年12月。
- 8) 金沢大学工学部構造力学研究室：防護覆い上への落石による衝撃力の推定に関する研究，落石実験報告書，1984年1月。
- 9) 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，土木学会論文集，No. 352，pp.61~70，1984年12月。
- 10) 金沢大学工学部構造力学研究室：防護覆いの設計荷重に関する研究，試験研究（2）研究成果報告書，1985年3月。
- 11) 吉田 博・細川 豊・石塚賢吉：落石によるロックシェッドの動的効果に関する実験，道路，pp.54~58，1977年8月。
- 12) 吉田 博・榎谷 浩・岡 衛：落石覆い屋根上への落石による衝撃荷重特性について，土木学会論文集，No. 362，pp.461~470，1985年10月。

(1989.4.10・受付)