

メタルライナーの衝撃力評価と定着構造の設計法に関する研究

EVALUATION OF THE IMPACT FORCE AND DESIGN PROCEDURE OF
METAL LINERS UNDER IMPACT LOADING

伊藤義人*, 増田進一**, 八木伸人***

Yoshito ITOH, Shin-ichi MASUDA and Nobuto YAGI

*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 (現名古屋市建設局) 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

***栗本鐵工所部長 鋳物事業部技術開発グループ (〒559 大阪市住之江区泉2-1-64)

In this paper, the impact force and design procedure of the anchor system of metal liners are dealt with. The numerical simulation of the collision behavior is performed using the nonlinear dynamic response analysis program, DYNA3D. The impact force from the test is compared with the results of the numerical calculation and HERTZ formula. A design method of the anchor system of metal liners is suggested considering the energy absorption capacity.

Key Words : nonlinear dynamic analysis, metal liner, anchor system design

1. まえがき

砂防ダム堤体の袖部, 水叩き部および流路のコンクリート面が摩耗損傷, 侵食および衝撃破壊を受けるということが問題となっている。摩耗, 侵食からコンクリート表面を防護するものとして, 耐摩耗性に優れた鋳鉄製ライニング材(メタルライナー)を取り付けることが試みられている^{1)~6)}。このメタルライナー取付構造物の耐衝撃特性を知るため, 伊藤らはこれまで数年に渡ってこの構造物に対する衝撃載荷実験を行い変形性能, エネルギー吸収能などに関する基礎的データを得てきた^{1,4)~1,6), 21)}。

衝撃問題を扱う際には物体の衝突時における衝撃力が重要であるが, その衝撃力の算定には, これまでHERTZの接触理論を弾性球の衝突に適用したものがよく用いられる。これは, 各時刻での接触力 P に $m(dv/dt) = -P$ の運動方程式を用いてつり合いを考えることで, 衝撃問題を静的問題に置き換えており, 広範囲に適用できることが確認されている。ここに, m は質量, v は速度である。しかし, この理論で用いられている仮定は実現象とは異なるものもあるため, HERTZの理論から得られる衝撃力は一般に実際の値より大きなものとなる。そのため, この衝撃力を設計段階でそのまま用いることはできず, 実際には実験などから得られる係数を乗じることで衝撃力が算定されている。

本研究では, メタルライナーに重錘が斜め方向から衝突する際に発生する衝撃力についての数値シミュレーションを, 非線形動的応答解析プログラムDYNA3D^{18)~20)}を

用いて行った。これは, 重錘が及ぼす衝撃力を得るだけでなく, ライナー定着構造に影響を及ぼす衝撃力のライナー面水平方向成分を明確にすることを目的としている。さらに, HERTZの接触理論を見直し, これを衝突問題に適用して最大衝撃力だけでなく衝撃力の時間応答波形や継続時間も求め, 実験結果および解析結果と比較することを試みる。

そして, その結果をふまえて, メタルライナーの定着構造のエネルギー吸収能に着目した設計簡易モデルを用いた設計法を提案する。

2. 衝撃力の算定

2. 1 HERTZの接触理論による衝撃力の算定

2. 1. 1 HERTZの接触理論の仮定

HERTZの接触理論⁷⁾は, 弾性球体が衝突して局部的に変形を生じる間の力-変形-仕事量の関係を弾性問題として説明したものであり, この関係を求める上で次のような仮定が設けられている⁹⁾。

- 1) 接触面に作用する全反力 P は両球で等しい。
- 2) 球の変形-応力関係は弾性理論に従うものとし, 加速度の影響はないものとする。また, 接触面から離れると, 球体内の応力は急激に小さくなる。
- 3) 接触面には軸応力のみ作用し, せん断応力は作用しないものとする。
- 4) 球表面の凹凸による変形およびこれにより生じる局部的な応力は無視できるものとする。

しかし, 実現象を考えた場合, これらの仮定は次のよう

な理由により過大値を与えられられる。

- 1) 接触面を離れた点の応力を零としているが、実際には応力（ひずみ）は3次的に広がる。
- 2) 接触面には実際にはせん断力が発生し、すべりや摩擦などによりエネルギーが消費される。
- 3) 球表面の微小な凹凸の破壊によるエネルギーの消費を見込んでいないが、実際にはこのようなエネルギーの消費も存在する。

そこで、衝撃力を算定する際には、これらの要因を考慮して実験などから求められる修正係数を乗じる必要があると考えられる。

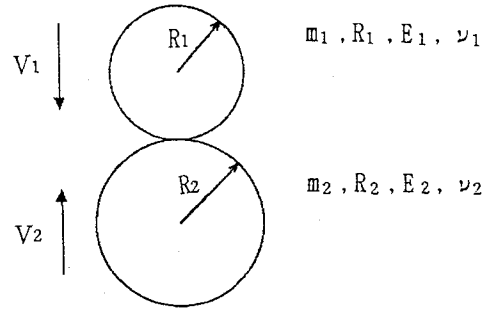


図-1 弾性体の衝突

2. 1. 2 衝撃力の算定

算定式の誘導の詳細は文献7)に述べられているので、ここでは結果のみ示すこととする。図-1のように球1、球2の2球が各々 v_1 と v_2 の速度で衝突する場合、その衝撃力 P は2球の接近距離 α の関数として次のように表される。

$$P = n \alpha^{3/2} \quad (1)$$

$$n = \sqrt{\frac{16}{9\pi^2} \frac{R_1 R_2}{(k_1 + k_2)^2 (R_1 + R_2)}}$$

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \quad k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2}$$

ここで、 R は球の半径、 m は質量、 ν はポアソン比、 E は弾性係数であり、添字の1, 2は衝突するそれぞれの球を表している。いま、球が平面に衝突することを考えるので、球2において R_2 、 m_2 を無限大として

$$n = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} \sqrt{R_1} \quad (2)$$

となる。また、衝撃力 P と時間 t の関係、最大衝撃力 P_{max} および継続時間 t_1 は次のようになる。

$$t = \frac{\alpha_1}{v} \int_0^{\frac{\alpha}{\alpha_1}} \frac{dx}{\sqrt{1-x^{\frac{3}{2}}}} = \frac{\alpha_1}{v} \int_0^{\left(\frac{P}{n}\right)^{\frac{2}{3}}}{\frac{dx}{\sqrt{1-x^{\frac{3}{2}}}}} \quad (3)$$

ただし、 $\left(\frac{\alpha}{\alpha_1} = x\right)$

$$P_{max} = n \left(\frac{5}{4} \frac{v^2}{n_1} \right)^{\frac{3}{5}} \quad n_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \quad (4)$$

$$t_1 = \frac{2\alpha_1}{v} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^{\frac{3}{2}}}} = 2.94 \frac{\alpha_1}{v} \quad (5)$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{5}{4} \frac{v^2}{n_1} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

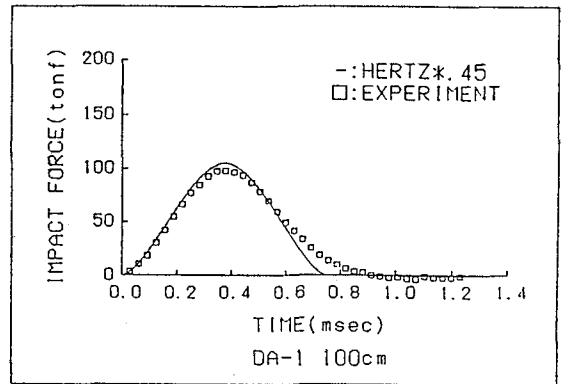


図-2 HERTZの理論による衝撃力時間歴曲線

ここに、 α_1 は2球の最大接近距離、 v は衝突速度である。この関係より得られる衝撃力の時間歴曲線を、文献14)に示す一面せん断実験のDA-1の実験結果と合わせて図-2に示す。重錘の半径 R は15cm、重量は108kgf、落下高さは100cmである。なお、HERTZの理論より得られた衝撃力には、文献21)の中で求められている一面せん断実験の係数を乗じている。この結果、ピーク値と継続時間に若干の差があるものの、HERTZ理論から得られる時刻歴曲線は実験値とある程度一致した結果となった。最大衝撃力のみでなく、実験などにより修正係数を使うことで、衝突応答をHERTZの接触理論から求めることができると考えられる。

2. 2 DYNA3Dを用いた数値解析による衝撃力の算定

2. 2. 1 解析モデル

本解析は、重錘がライナーに衝突する際に発生する衝撃力を求めるため、文献14)の斜め方向衝撃載荷実験を参考にモデル化したものである。解析は、対称性を利用して供試体全体の1/2をモデル化したものについて行った。表-1に主な解析モデルを、また、図-3にDBおよびDCシリーズ²¹⁾の解析モデルの一例を示す。なお、解析に用いた材料定数は表-2に示すとおりである。

表-1 解析モデル一覧

MODEL	重錘物性	ライナー物性	落下高さ (cm)	備考
DAS30-EL	弾性	弾性	300	重錘の物性の違いによる影響をみる
DAS30-RD	剛体	弾塑性	300	同上
DAS30-PL1	弾塑性	弾塑性	300	同上
DAS30-PL2	弾塑性	弾塑性	300	衝突部の最適メッシュサイズの検討
DAS30-PL3	弾塑性	弾塑性	300	同上
DBS10-PL1	弾塑性	弾塑性	100	斜め衝突モデル, 重錘TYPE1
DBS10-PL2	弾塑性	弾塑性	100	斜め衝突モデル, 重錘TYPE2
DBS10-PL3	弾塑性	弾塑性	100	斜め衝突モデル, 重錘TYPE3
DCS10-PL1	弾塑性	弾塑性	100	衝突角度水平面から15°
DCS10-PL2	弾塑性	弾塑性	100	衝突角度水平面から20°
DCS10-PL3	弾塑性	弾塑性	100	衝突角度水平面から35°
DCS10-PL4	弾塑性	弾塑性	100	衝突角度水平面から50°
DCS10-PL5	弾塑性	弾塑性	100	衝突角度水平面から60°
DCS10-PL6	弾塑性	弾塑性	100	衝突角度水平面から70°
DCS10-PL7	弾塑性	弾塑性	100	衝突角度水平面から80°

(注) MODELの記号の意味は次の通り

DA: 平面衝突

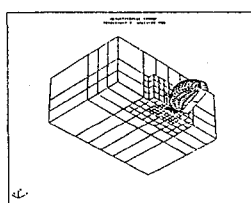
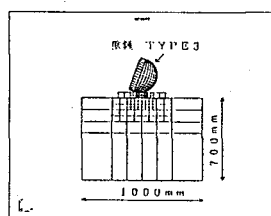
DB: 斜め衝突

S30: 鋼製重錘&落下高さ

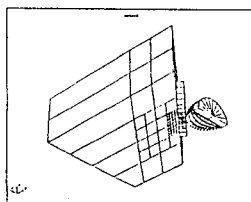
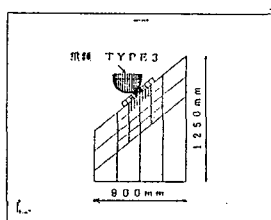
EL: 弾性体

RD: 剛体

PL: 弾塑性体



(a) MODEL A



(b) MODEL B

図-3 解析モデルの一例

表-2 材料定数

	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比	質量密度 (kgf・sec ² /cm ⁴)	降伏応力 (kgf/cm ²)
コンクリート躯体	3.02x10 ⁵	0.2	2.35x10 ⁻⁶	-----
重錘(鉄)	2.10x10 ⁶	0.3	1.04x10 ⁻⁵	3200
ライナー	2.10x10 ⁶	0.3	1.04x10 ⁻⁵	3200

文献21)の実験より、慣性の影響が大きいいため衝撃加速度はライナー定着構造の損傷に依存しないことがわかっている。そのため、ライナーとコンクリート躯体は最終

崩壊直前まで一体と考え、剛体とした。供試体の境界条件は底面完全拘束である。重錘には鋼製重錘を用い、その重量は108kgfである。また、重錘の初速度には落下高

さから計算したものをを用い、それを重錘モデルの各節点に与えている。なお、ライナーと重錘は摩擦を伴う接触をするとし、その接触面にDYNA3Dに用意されているスライドインターフェイスを用いている。摩擦係数は、文献22)より0.35とした。

DAS30-ELとDAS30-RDとDAS30-PL1の解析結果と一面せん断実験結果を比較した場合、それぞれの物性モデルに弾塑性体を用いたDAS30-PL1が比較的良好一致しており、また実験現象においても重錘に多少の変形が見られるため、これらの物性モデルには弾塑性体を用いることとした。なお、メタルライナーと重錘の構成則としてはvon Misesの降伏条件を用いているが、ひずみ速度は10°程度であり、ひずみ速度が構成則に与える影響は小さいとしてここでは考慮していない。また、コンクリート躯体部分については、弾性解析と弾塑性解析の結果にほとんど差がなかったため、ここでは弾性体としている。このような物性モデルにより解析を行ったところ、衝突部のメッシュサイズによって衝撃加速度の大きさや波形形状が変化したため、まず3種類のメッシュサイズ(メッシュ数=1433, 1439, 1830)を用いて平面衝突モデル(表-1中のDAS30-PLシリーズ)を作成し、その解析結果によりライナーと重錘の衝突部のメッシュサイズを決定した。

その後、斜め衝突モデル(表-1中のDBシリーズ)について解析を行った。DBS10-PL1までの解析には重錘に半球(TYPE1)を用いていたが、得られた加速度と実験結果には、かなり差があったため、DBS10-PL2では実験で使った重錘のように半球の上に重量調節用の厚板を付けてモデル化したもの(TYPE2)を使用した。しかし、それでもまだ差があったため、さらにDBS10-PL3モデルでは重錘のメッシュを変更(図-3 MODEL A)したところ(TYPE3)、その結果は実験結果とよく一致した。そこで、このモデルにより落下高さ50cm, 100cm, 200cm, 300cm, 400cmの5ケースについて解析を行い、実験結果と比較した。

次に、この解析から得られた衝突部のメッシュサイズを用いて、MODEL Bのような重錘がライナーに斜め衝突する場合の弾塑性解析を行った。これは、重錘とライナーの衝突角度が水平面から15°, 20°, 35°, 50°, 60°, 70°, 80°の場合について考えている。初速度は、落下高さ1mの場合のものをを用いた。他の各種条件は前述したものと同様である。

2. 2. 2 解析結果

MODEL Aの弾塑性解析(コンクリート部は弾性)により得られた、重錘の上面中心位置の加速度波形を図-4に、また実験結果と解析結果のピーク加速度を比較したものを図-5に示す。なお、図中の実線は、HERTZの接触理論により得られた値に、各落下高さにおいて実験結果と比較することで得られた係数0.32²¹⁾を乗じたものである。また、実験値の加速度のピーク値は、10kHzのローパスフィルターをかけて処理をして求めたものである。この図

をみると、解析から得られたピーク加速度の大きさは実験値とよく一致しており、実験をよくシミュレートしているといえる。また継続時間も、実験値が約1.4msecなのに対し解析では約1.3msecと、よく一致した結果となった。

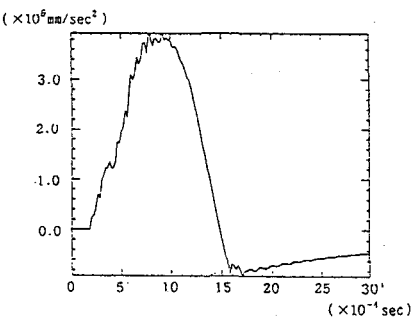


図-4 加速度波形

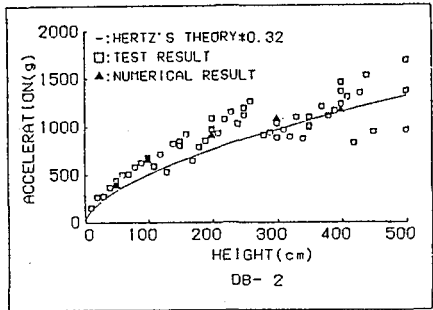


図-5 解析結果と実験結果

次に、衝突角度を変化させた場合の解析結果について述べる。表-3に、各解析から得られたライナー面垂直および水平方向の最大衝撃力を示す。これは、各方向のピーク加速度に重錘重量を乗じたものである。このように、衝突角度を変化させた場合、垂直方向衝撃力は衝突角度が大きくなるに従い増加したが、水平方向衝撃力は衝突角度50°までは増加しその後は減少していくという結果となった。これは、衝突角度が大きい場合には水平方向速度成分が小さくなることにより、水平力に最も影響を及ぼすと考えられる摩擦も小さくなり、局部変形によるものなどの他の要因が支配的となるためと考えられる。

表-3 数値解析結果

衝突角度 θ	ライナー面 水平方向 (tonf)	ライナー面 垂直方向 (tonf)
15°	13.4	25.7
20°	15.9	33.0
35°	24.7	65.0
50°	35.0	97.9
60°	27.9	99.9
70°	20.8	111.5
80°	12.2	118.2

そこで、この摩擦力和、重錘の水平方向速度成分をHE RTZの接触理論に用いることで得られる衝撃力について考える。摩擦力は、重錘の垂直方向速度成分をHERTZの接触理論に代入して得られた衝撃力に摩擦係数を乗じて算定する。重錘がライナーに衝突したとき、水平方向速度成分による衝撃力が摩擦力より大きいときには摩擦力が、そうでなければその衝撃力がライナーに作用すると考える。この考え方により、ここではライナーに作用する水平力を算定することにする。重錘速度を v 、その水平、垂直成分をそれぞれ v_H 、 v_V とすれば次式のようになる。

$$v_H = v \cos \theta \quad v_V = v \sin \theta \quad (7)$$

ライナー面垂直方向衝撃力 P_V は

$$P_V = f(v_H) = n \left(\frac{5v_V^2}{4nn_1} \right)^{3/5} \quad (8)$$

と表され、摩擦力和水平方向速度成分による衝撃力が等しいときは次のようになる。

$$f(v_H) = \mu f(v_V) \quad (9)$$

つまり

$$\tan \theta = \mu^{-5/6} \quad (10)$$

である。ここに、 n 、 n_1 は式(1)で示した定数、 μ は摩擦係数である。いま、鉄と鉄の間の摩擦係数を $\mu=0.35$ とすれば、 $\theta=67.37^\circ$ となる。これにより、ライナーに作用する水平衝撃力 P_H は、 θ の関数として次のように表すことができる。

$$P_H = \mu \cdot k_H \cdot n^{2/5} \left(\frac{5}{2} W \cdot h \cdot \sin^2 \theta \right)^{3/5} \quad (0^\circ \leq \theta \leq 67.37^\circ) \quad (11)$$

$$P_H = k_H \cdot n^{2/5} \left(\frac{5}{2} W \cdot h \cdot \cos^2 \theta \right)^{3/5} \quad (67.37^\circ \leq \theta \leq 90^\circ) \quad (12)$$

ただし、

$$n = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} \sqrt{R_1}$$

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \quad k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2}$$

ここに、 k_H は衝撃力算定係数（実験により求められる係数、鋼製重錘で0.45、コンクリート重錘で0.4）、 W は重錘重量、 h は落下高さ、 R_1 は重錘の半径である。ここで得られた水平力 P_H とJDYNA3Dによる解析の結果を図-6で比較して示す。この図で、横軸は衝突角度 θ であり、縦軸は水平衝撃力 P_H である。実線で示した水平衝撃力の関数の値は、 Δ で示したJDYNA3Dの解析結果と比較すると約2倍であり、必ずしも良い精度とはいえないが、この関数

の値は安全側であり、荷重の安全係数と考えることができる。従って、今後はこの関係を用いて、ある衝突速度で物体がライナーに衝突したときにライナーに作用する水平衝撃力を算定することとする。

実際の岩石がメタルライナーにぶつかるときの衝撃力は、コンクリート重錘による衝撃力とほぼ等しいと考えて、文献21)の実験から得られた係数0.4をHERTZ解に乘じることによりその衝撃力は求めることができる。従って、その水平荷重は、衝突角度により式(11)、または式(12)を用いて算定できる。岩石と金属の摩擦係数は文献22)より0.3~0.4であるので、ここでは0.4を用いるとする。

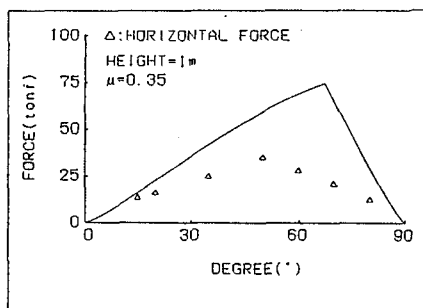


図-6 衝突角度と水平衝撃力関係

3. 吸収エネルギーに着目した設計法の提案

ライナー定着構造のような衝撃力を受ける構造を設計する場合、その構造の衝撃力に対する強度を明確にしたうえで弾塑性変形による吸収エネルギーを把握できれば、想定される岩石の衝突による累積エネルギーと定着構造の限界吸収エネルギーとを比較することで合理的な設計を行うことができる^{14), 21), 24)}。ここでは定着構造の強度および吸収エネルギーに着目した設計法を提案する。

3.1 外力の評価

平面と球が斜めに衝突する場合について考える。球が平面に斜め方向から衝突する場合、平面には垂直方向に圧縮力、水平方向に摩擦力が作用する。このうち、まず垂直方向について考える。文献17)によると、コンクリートの支圧強度 $f_{b,cd}$ は、支圧面積を A' 、コンクリート面の面積を A とすれば次のようになる。

$$f_{b,cd} = \sqrt{\frac{A}{A'}} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \left(\sqrt{\frac{A}{A'}} \leq 2 \right) \quad (13)$$

ただし、 f_{ck} は圧縮強度、 γ_c はコンクリートの材料係数である。いま、実験で用いた供試体について考えると、コンクリート面の面積 A は $100 \times 80 = 8000 \text{ cm}^2$ 、支圧面積 A' はライナー面積の $40 \times 40 = 1600 \text{ cm}^2$ であり $\sqrt{A/A'} = 2.24$ となり2を超えるので、 $\sqrt{A/A'} = 2$ と考える。実際の使用時には、コンクリート面は半無限に近い値となるので、 $\sqrt{A/A'} = 2$ を用いることになる。また、コンクリートの材

料係数を終局限界状態の値である1.3とし、モルタルの圧縮強度 f_{ck} を400kgf/cm²とすれば、支圧強度は1101tonfとなる。つまり、垂直方向圧縮力がこの値を越えるような場合には、定着構造の崩壊だけを考えるのではなく、モルタルの支圧破壊についても考慮する必要がある。

3. 2 変形挙動のモデル化

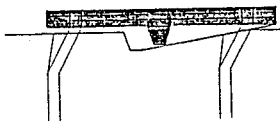
3. 2. 1 ライナーが浮き上がる場合の最終崩壊挙動
十字リブ前面のモルタルにせん断破壊面が形成されると、ライナーはせん断破壊面に沿って滑り始める。そして、最終的には図-7(a)に示すような形態で崩壊に至る。このとき、アンカーボルトは曲げを伴う伸び変形を示すが、この変形についての模式図を図-7(b)に示す。

いま、リブ前面のモルタルのせん断破壊面が図-7(a)のようにリブの先からライナーの端部までの直線であるとし、それに沿ってライナーが滑るとすると、ライナーの垂直、水平変位 δ_v 、 δ_H とアンカーボルトの軸方向変形 δ_b の関係は次のようになる。

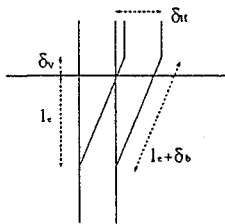
$$(\delta_b + l_e)^2 = (\delta_v + l_e)^2 + \delta_H^2 \quad (14)$$

δ_v と δ_H は、ライナー寸法とアンカーボルトの位置によって関係づけられるが、40cmx40cmのライナーの場合、以下の関係になる

$$\delta_v = 5 \delta_H / 18.75 \quad (15)$$



(a) モルタルのせん断面模式図



(b) アンカーボルトの変形模式図

図-7 浮き上がり挙動の最終崩壊模式図

また、文献26)によれば、アンカーボルトのネジ部の塑性変形は次式により近似できる。

$$\delta_b = (0.4d_s + l_e) \varepsilon_u \quad (16)$$

$$\varepsilon_u = 0.53 - 0.51(\sigma_y / \sigma_u) \quad (17)$$

ここで、 l_e : ネジ部の有効長さ、 σ_y : アンカーボルトの降伏点応力、 σ_u : アンカーボルトの引張強さ、 d_s : アンカーボルトのネジ部直径である。一面せん断実験で、アンカーボルトには深さ3cmの位置においても軸ひずみと曲げひずみが生じているので、ここでは l_e を3cmとする。

3. 2. 2 ライナーが浮き上がらない場合の崩壊挙動

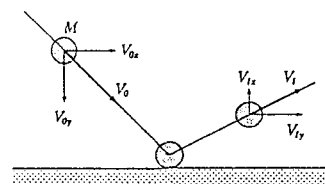
斜め方向衝撃载荷実験では、リブ付ライナー定着構造は崩壊に至っていないが、リブ無ライナーの定着構造の崩壊挙動を参考に考えると、浮き上がりの無い場合には、アンカーボルトはほぼ直接せん断の形で破断する。この場合のライナー面平行方向変位は、最大でアンカーボルトのネジ部の径であるので、ここではライナー面平行方向許容変位をアンカーボルトのネジ部の径とする。

3. 3 累積衝撃吸収エネルギーのモデル化

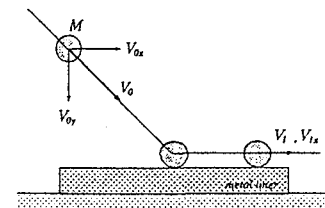
3. 3. 1 外力エネルギーの評価

斜め方向からの衝突に対する定着構造の累積吸収エネルギーについて考える。図-8のように球が斜め方向から滑らかな平面に衝突する場合、その垂直速度成分は衝突の前後で反発係数 e の分だけ減少する。この考え方からすると、実験では鋼製重錘、コンクリート重錘のいずれもリバウンドがほとんど見られなかったので、この場合の反発係数 e は0に近いと考えられる。また、滑らかな面では衝突の前後で球の水平方向速度成分は変化しないが、実際の現象では接触面に摩擦力などが作用するため、衝突後の水平方向の速度は減少する。つまり、摩擦力などによりエネルギーが定着構造に与えられるのである。

これを踏まえ、ライナーに斜め方向から岩石が衝突する場合について考える。この場合、ライナー面に垂直な速度成分が持っていたエネルギーは、音、熱および弾塑



(a) 滑らかな面と球の衝突



(b) ライナーと球の衝突

図-8 面と球の衝突模式図

性変形などによって消費される。しかし、3. 1で述べたようにライナー定着構造は垂直方向の支圧力には非常

に強く、通常の岩石などの衝突では弾性挙動を示すと考えられる。

表-4 係数の値

供試体	DA-1	DA-2	DA-6	DA-9	DA-10
α (tonf·m/mm)	0.207	0.149	0.178	0.093	0.186
β (tonf·m)	1.848	2.204	2.135	0.106	2.773

従って、岩石が斜め方向から衝突する場合は、衝突物の持つエネルギーの垂直方向成分はライナー定着構造には累積吸収されないとし、摩擦力などにより与えられた水平方向成分のエネルギーのみ累積されるとする。

一方、岩石がライナーに水平方向から衝突する場合には、地盤の支圧方向にはエネルギーを持たないので、衝突物の持つエネルギーから衝突後の運動エネルギーを減じたもの全てがライナー定着構造に累積吸収されることになる。

通常の岩石の衝突ではこのように考えるが、ここでは最も危険な場合を想定し、衝突物が衝突の際の摩擦や引っかかりにより静止してしまうような場合を考える。つまり、定着構造に吸収されるエネルギーは、岩石がライナーに水平方向から衝突する場合には衝突物の持つ全運動エネルギー、斜め方向から衝突する場合には運動エネルギーの水平成分のみとし、安全側での設計を行うこととする。

3. 3. 2 ライナーが浮き上がり崩壊する場合

一面せん断実験の各供試体^{14), 21), 27)}では、リブの有無により累積衝撃吸収エネルギーとライナー面水平方向塑性変位の関係に大きな違いが見られた。すなわち、リブが有るものは途中から塑性変位が立ち上がったが、リブの無いものは原点から立ち上がっているという点である。従って、他の条件は全て同様であることを考慮すれば、塑性変位が立ち上がる点までの累積エネルギーはリブにより分担されたものと考えることができる。

リブ付ライナーを用いた定着構造の累積衝撃吸収エネルギーとライナー面水平方向塑性変位の関係を図-9のように簡略化して表せば、次のようにこの関係を定式化することができる。

$$E_A = \alpha \delta_H + \beta \tag{18}$$

ここで、 E_A は累積衝撃吸収エネルギーを、 δ_H はライナー面平行方向塑性変位を表す。また、 α 、 β は係数であり、文献14), 21), 27)の各供試体について、実験値から求めた値を表-4に示す。ライナーサイズが40cmのもののリブによる吸収エネルギー分担量は、DA-1, DA-2, DA-10の供試体の β の平均をとると2.28tonf·mである。

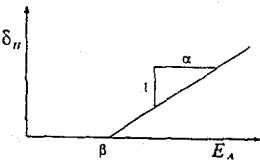


図-9 累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位関係簡略図

3. 3. 3 ライナーの浮き上がり崩壊がない場合

浮き上がり挙動の無い場合として、文献21)で行われた斜め方向荷重載荷実験のDB-4供試体について考える。これはリブの無いフラットタイプのライナーを用いたもので、ライナーサイズは40cmであり、226.5kgfの鉄重錘を用いた実験である。文献28)で詳しく述べられている弾性時の定着部のつり合いモデルに各値を代入して計算すると、弾性限界荷重 P_H は19.0tonfとなる。これをHERTZ解に0.45を乗じて求めた衝撃力に等しいとしてその弾性限界落下高さを求めると、 $h_0=4.74$ cmを得る。重錘が斜めに衝突してライナーが浮き上がらない場合には、定着構造に累積吸収されるのは重錘の持つ運動エネルギーの水平方向成分から弾性限界エネルギーを減じたものであるから、この値を用いて求めた累積吸収エネルギーとライナー面水平方向塑性変位の関係を図-10に示す。

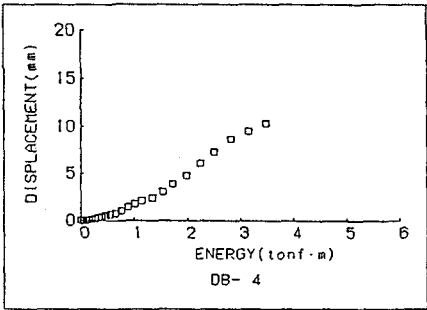


図-10 累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位関係(DB-4)

また、この関係を図-11のように簡略化して表せば、次のように定式化することができる。

$$E_A = \alpha \delta_H \tag{19}$$

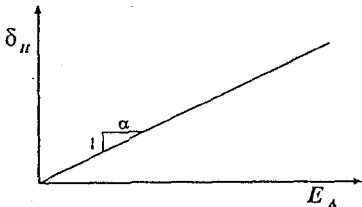


図-11 累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位関係簡略図

最小2乗法により α を求めると、 $\alpha=0.321$ (tonf·m/mm)である。これにより、アンカーボルトが吸収するエネルギー

一の分担量が求められた。

次に、リブ付ライナー定着構造のエネルギー吸収能について考える。実験では、この定着構造は崩壊に至っておらず、そのエネルギー吸収能-塑性変位関係を求めることは出来なかった。そこで、ここではとりあえずこの定着構造の吸収エネルギーをアンカーボルトによるものとリブによるものに分け、その和によってエネルギー吸収能を求めることとする。いま、ライナーサイズが40cmのもののリブによる吸収エネルギーは、3.3.2で求めたように2.28tonf・mであり、これを式(19)に加えると累積吸収エネルギーと塑性変位の関係は

$$E_A = 0.321 \delta_H + 2.28 \quad (20)$$

となる。よって、40cmのライナーを用いた定着構造のエネルギー吸収能は、この関係から求めることができる。

6.4 設計への適用

ライナーの使用箇所を決定したとき、ライナーに作用する荷重形態によってどのような設計がその場所では最適であるのかを決定する必要がある。ここでは、この判断を次のように行うとよいと考える。

(a) ライナーが浮き上がり挙動を示す場合

- ・ ダムの水通し部や水路床のように、水平力がライナーに直接加わる可能性の高い所
- ・ 水叩き部やダム前面などにおいて、ライナー端部に岩石が衝突する場合のように、定着構造が一撃で破壊される危険性の高い所

(b) ライナーの浮き上がり挙動がない場合

- ・ 水叩き部やダム前面などにおいて、岩石がライナー中央付近に衝突する場合
- ・ 小岩石による衝突が多く、一撃での破壊の危険性が低い所
- ・ 排砂路など

以上の考察をもとに、定着構造の吸収エネルギーと塑性変位との関係を用いたメタルライナー定着構造の設計手法を提案する。衝突物にはそれぞれ異なった重量と衝突速度を持った n 個の岩石を考え、それぞれに対して安全照査を行うとする。詳しい式の展開は、文献29)に示されている。ここでは、考え方のみを述べる。

1) まず、メタルライナー設置場所を決定する。

2) メタルライナー設置計画場所に流出すると想定される岩石の重量 W_i 、衝突速度 V_i 、ライナー面に対する衝突角度 θ および岩石の個数 n を決定する。岩石の速度は、想定される土石流の先端部の速度と同一とする。また、衝突角度 θ は設置場所の条件により一定の値になると思われるので、全岩石について同一とする。

3) 岩石の持つ運動エネルギーを考慮して、過去の例などを参考にメタルライナー定着構造の部材、構造を決

定する。その際には、アンカーボルトと十字リブ前面のモルタルとの荷重分担率が50:50となるようにすると良い。

4) 決定されたライナー設置場所において、浮き上がり挙動の有無を判断する。

- (a) 設置場所が水通し部または水路床の場合 ==> 9)へ
- (b) 上記以外の場合 ==> 5)へ

5) 弾性時の定着部の力のつり合いモデルにより、ライナーが浮き上がる衝突点 x の最大範囲 x_c を算定する。

6) 衝突点 x と5)で算定された範囲 x_c を比較する。

- (a) 衝突点 x が5)で算定された範囲内($x < x_c$)の場合 ==> 7)へ
- (b) 衝突点 x が5)で算定された範囲外($x > x_c$)の場合 ==> 10)へ

7) (a) 弾性時の定着部の力のつり合いモデルにより、ライナーが浮き上がる場合の弾性限界荷重 P_0 を算定する。

(b) 岩石の衝突により発生する衝撃力のライナー面平行方向成分 P_{IH} を、2.2.2で述べた衝突角度 θ と水平衝撃力 P_H の関係をを用いて算定する。

8) 7)で算定された弾性限界荷重 P_0 と岩石の衝突により発生する衝撃力のライナー面平行方向成分 P_{IH} とを比較する。

- (a) $P_0 < P_{IH}$ の場合 (浮き上がり挙動) ==> 9)へ
- (b) $P_0 > P_{IH}$ の場合 (浮き上がらない) ==> 10)へ

9) ライナーが浮き上がり挙動を示す場合において、以下のそれぞれについて算定モデルから決定する。

(a) 弾性限界衝撃エネルギー吸収能 E_0 。

弾性限界荷重 P_0 とHERTZの理論解に係数 k_H を乗じたものを等しいとして、次のように算定する。

$$P_0 = k_H \cdot n^{2/5} \left\{ \frac{5(m_0 v_0^2)}{4} \right\}^{3/5} \quad (21)$$

$$E_0 = \frac{1}{2} (m_0 v_0^2) \quad (22)$$

式21)から、 $m_0 v_0^2$ を計算して式22)に代入する。

$$E_0 = \frac{2}{5} \left(\frac{P_0}{k_H \cdot n^{2/5}} \right)^{5/3} \quad (23)$$

P_0 : モデルより計算された弾性限界荷重

E_0 : 定着構造の弾性限界エネルギー

k_H : 衝撃力算定係数 (ここでは0.45とする)

n : HERTZの理論解における係数

m_0 : 衝突物の質量

v_0 : 衝突物の衝突速度

(b) 累積吸収エネルギー E_A とライナー面平行方向塑性変

位 δ_H の関係

過去の衝撃実験の結果などから、3.3.2で述べたように累積吸収エネルギー E_A とライナー面水平方向塑性変位 δ_H の関係を定式化する。

$$E_A = \alpha \delta_H + \beta \quad (24)$$

E_A : 累積吸収エネルギー
 δ_H : ライナー面平行方向塑性変位
 α, β : 係数

(c) 許容ライナー面平行方向変位 δ_{Hc}

3.2.1 述べたモデルにより算定する。

10) ライナーが浮き上がり挙動を示さない場合において、以下のそれぞれについて算定モデルから決定する。

(a) 弾性限界衝撃エネルギー吸収能 E_0

弾性限界荷重 P_0 と HERTZ の理論解に係数 k_1 を乗じたものを等しいとして、浮き上がる場合と同様に算定する。

(b) 累積吸収エネルギー E_A とライナー面平行方向塑性変位 δ_H の関係

過去の衝撃実験の結果などから、3.3.3で述べたように累積吸収エネルギー E_A とライナー面水平方向塑性変位 δ_H の関係を定式化する。

$$E_A = \alpha \delta_H + \beta \quad (25)$$

E_A : 累積吸収エネルギー
 δ_H : ライナー面平行方向塑性変位
 α, β : 係数

(c) 許容ライナー面平行方向変位 δ_{Hc}

3.2.2で述べたように、この場合の許容ライナー面平行方向変位 δ_{Hc} にはアンカーボルトの径を用いる。

11) 定式化した累積吸収エネルギー E_A とライナー面平行方向塑性変位 δ_H の関係 (図-12) から、許容ライナー面平行方向塑性変位 δ_{Hc} に対応する累積衝撃エネルギー吸収能 E_{Ac} を決定する。

12) 次式により定着構造に入力されるエネルギーの総和 E_t を算定する。

$$E_t = \sum (E_i - E_0) \quad (E_i > E_0) \quad (26)$$

E_t : 定着構造に入力されるエネルギーの総和
 E_i : i 番目の岩石が衝突前に持っているエネルギー
 E_0 : 弾性限界エネルギー

13) メタルライナー定着構造に入力される総エネルギー

E_t と、定着構造の累積エネルギー吸収能 E_{Ac} とを比較する。

(a) $E_{Ac} > E_t$ のとき : 適格

(b) $E_{Ac} < E_t$ のとき : 定着構造を再検討する必要あり

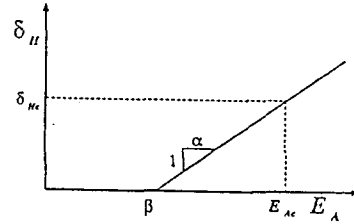


図-12 累積衝撃吸収エネルギーとライナー面平行方向塑性変位関係簡略図

4. 結論

本研究では、岩石がメタルライナーにぶつかったときの衝撃力を算定するため、実験結果と HERTZ の理論値および非線形動的応答プログラム JDYNA3D による数値解析結果の比較を行った。そして、その結果を利用して、定着部のエネルギー吸収能に着目した設計法を提案した。以上により得られた主な結論を以下に示す。

1) HERTZ の接触理論を衝突問題に適用した場合、得られた衝撃力に実験から求めた補正係数を乗ずることにより、設計に用いることができることを示した。また、衝撃力の時刻歴もある程度推定できることを明らかにした。

2) DYNA3D による数値解析から得られた衝撃力は、実験結果とよく一致した。

3) DYNA3D による数値解析により、重錘が斜め方向から衝突した場合のライナー面垂直衝撃力と水平衝撃力を求め、水平衝撃力を衝突角度の関数として表すことができた。また、この結果を参考にして設計に用いる水平衝撃力算定式を示した。

4) 簡易モデルにより、ライナーへの衝突箇所の場合分けとそのときのライナー面水平方向衝撃力とから崩壊挙動を判定し、弾性限界荷重を求めた。また、累積吸収エネルギーと塑性変位の関係を定式化することで定着構造の限界吸収エネルギーを求め、これを用いた設計指針を提案した。

なお、本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究 (C) (課題番号 06650516) を受けて行ったものである。

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れきの衝撃模型実験に関する一考察, 構造工学論文集 Vol. 35A, 1989. 3, pp. 1095-1104.
- 2) 芦田和男 : 土石流概論, 新砂防 Vol. 44 No. 6 (179), 1992. 3, pp. 41-47.

- 3) 砂防・地すべり技術センター：鋼製砂防構造物設計便覧，昭和62年。
- 4) 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，昭和62年4月。
- 5) 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，pp. 17-22。
- 6) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，1985。
- 7) S. P. Timoshenko, J. N. Goodier: Theory of Elasticity, McGraw-Hill Bookcompany, 1951。
- 8) J. A. Zukas, T. Nicholas, H. F. Swift, L. B. Greszczuk and D. R. Curran: Impact Dynamics, A Willy Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, 1982。
- 9) 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。
- 10) W. Goldsmith: Impact(The Theory and Physical Behavior of Colling Solids), Edward Arnold, 1960。
- 11) 中野修，西弘明，菅田紀之，安藤智啓：緩衝構造の緩衝特性に関する数値解析的検討，土木学会北海道支部論文報告集，平成4年。
- 12) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，1994。
- 13) 園田恵一郎：落石覆工の設計法についての一提案，構造工学論文集 Vol. 39A, 1993. 3。
- 14) 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, 1993. 3，pp. 1539-1552。
- 15) 片岡誠：メタルライナー取付構造の耐衝撃特性およびエネルギー吸収能に関する研究，名古屋大学工学部土木工学科修士論文，1993。
- 16) 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。
- 17) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，1986. 10。
- 18) 日本総研編：JMESH USER'S MANUAL Vol. 1-3, 1992。
- 19) 日本総研編：JDYNA3D USER'S MANUAL, 1985. 6。
- 20) 日本総研編：JPOST USER'S MANUAL, 1992。
- 21) 伊藤義人，片岡誠，川口雅樹，草田昭一：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，構造工学論文集，Vol. 40A, 1994. 3。
- 22) 日本機械学会：機械工学便覧，1968。
- 23) M. Y. H. Bangash: Impact and Explosion, Blackwell Scientific Publications, 1993。
- 24) 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. 1，pp. 11-20。
- 25) 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。
- 26) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985。
- 27) 土木学会：国鉄構造物設計標準解説，1983。
- 28) 伊藤義人ら：コンクリート面を防護する種々のメタルライナーの衝撃実験，構造工学論文集，Vol. 41, 1995. 3。
- 29) 宇佐美勉，伊藤義人，増田進一，川口雅樹：衝撃力の実験的・理論的評価とメタルライナー定着構造の設計法に関する研究（報告書），平成6年3月。

(1994年9月14日受付)