（Ⅰ－5） 鋼製ロックシェッドの衝撃応答解析に関する一考察

防衛大学校　学生員○別府万寿博
同　上　　学生員　伊藤一雄
同　上　　正　員　石川信隆

1．緒言

わが国は、地形が急峻で地震や雨も多いため地滑り、雪崩とともに落石に対しても厳しい環境にあり、毎年多くの落石災害が発生している。 落石により交通の安全性が損なわれる可能性が大きく、安全性確保のためにロックシェッドが多く建設されている。

本研究は、鋼製ロックシェッドの安全性照査を目的として，曲げと軸力およびせん断力を考慮した剛性マトリクスとニューマークβ法を用いることにより衝撃応答解析を行ったもので、ここでは主として斜材の影響について考察したものである。

2．曲げと軸力およびせん断力を考慮した衝撃弾塑性解析[1)]

2・1　剛性マトリックスの誘導

（1）力のつり合い条件

いま図－1に示すような鋼製ロックシェッドを，図－2に示すようにいくつかの要素モデルに分割し，その要素両端に曲げ，軸力，せん断の塑性ばねをもち，はり要素自身は曲げと軸力，せん断の弾性変形を行うものとする。このとき構造全体の力のつり合い条件式は次式のようになる。

$$\mathbf{C}^T\mathbf{Q}=\mathbf{F} \qquad (1)$$

ただし、$\mathbf{Q}$：内力ベクトルで曲げモーメント，軸力，せん断力を示す；$\mathbf{F}$：内力$\mathbf{Q}$（曲げ，せん断，軸力）とつり合う外力ベクトル；$\mathbf{C}$：外変位$\mathbf{u}$と内変形$\mathbf{q}$を適合させるマトッリクス

（2）変形適合条件式

式(1)に反傾定理を適用することにより変形適合条件式が得られ、弾性時と塑性時における内変形$\mathbf{q}$を区別して考慮すると次式が得られる。

$$\mathbf{C}\mathbf{u}=\mathbf{q}=\mathbf{q}^e+\mathbf{q}^p \qquad (2)$$

ただし、$\mathbf{q}^e=\mathbf{k}^{-1}\mathbf{Q}$（弾性変形），$\mathbf{q}^p=\mathbf{N}\boldsymbol{\lambda}$（塑性変形），$\mathbf{q}$：内変形ベクトルで，曲げ回転角，軸変形，せん断変形を示す；$\mathbf{u}$：節点変位ベクトル；$\mathbf{k}^{-1}$：要素の弾性集合柔性マトリックス

（3）降伏条件式

$$\boldsymbol{\Phi}=\mathbf{N}^T\mathbf{Q}-\mathbf{R}\leq\mathbf{0} \qquad (3)$$

ここに、$\mathbf{N}$：降伏条件式に対する外向き単位法線マトリックス，　$\mathbf{R}$：塑性容量で，原点から降伏点までの距離を示す。いま鋼材の曲げ（M）と軸力（N）および曲げ（M）せん断（S）を考慮した降伏条件式

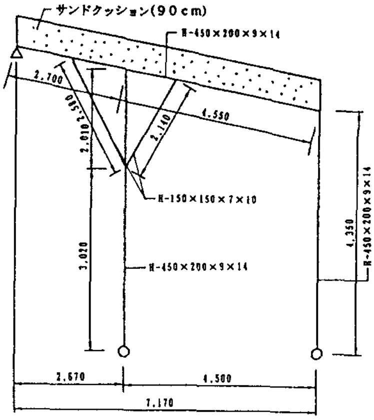

図-1　解析に用いた鋼製ロックシェッド

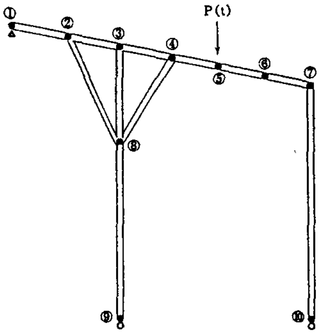

図-2　モデル化したロックシェッド

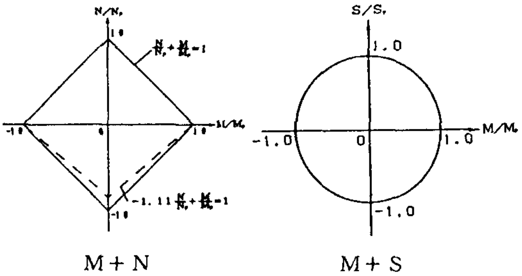

図-3　降伏条件

は図-3のようになる。ただし，図中点線は座屈を考慮した場合を示す。

（4）塑性変形発生条件

ある部材が降伏したときに塑性変形が発生するが，そのときの条件式は次式で表される。

$\Phi^T \lambda = 0$　　　　　　　　　　（4）

以上の式(1)～(4)を用いると構造全体の剛性マトリックスがそれぞれ次のように誘導される[1]。

（a）弾性時：$\mathbb{K}_e = \mathbb{C}^T \mathbb{k} \mathbb{C}$　　　　（5）

（b）塑性時：$\mathbb{K}_p = \mathbb{C}^T \mathbb{k} \mathbb{C} - (\mathbb{C}^T \mathbb{k} \tilde{\mathbb{N}})(\tilde{\mathbb{N}}^T \mathbb{k} \tilde{\mathbb{N}})^{-1} (\tilde{\mathbb{N}}^T \mathbb{k} \mathbb{C})$　（6）

ここで$\tilde{\mathbb{N}}$は式(3)，(4)において$\Phi i = 0$となる降伏条件式に対応する$\mathbb{N}$ベクトルだけを抽出したものである。

2・2　衝撃応答解析

はり要素モデルの運動方程式は次式で表される。

$\mathbb{M}\ddot{\mathbb{u}} + \mathbb{C}\dot{\mathbb{u}} + \mathbb{K}\mathbb{u} = \mathbb{P}$　　　　（7）

ただし、$\mathbb{M}$：質量マトリックス；$\mathbb{C}$：減衰係数マトリックス；$\mathbb{K}$：構造全体剛性マトリックスで，式(5)の$\mathbb{K}_e$または式(6)の$\mathbb{K}_p$を用いる；$\mathbb{P}$：外力マトリックス；$\mathbb{u}$：節点変位ベクトル

式(7)の解法に当たっては運動方程式をニューマークのβ法($\beta = 1/6$)を用いた。

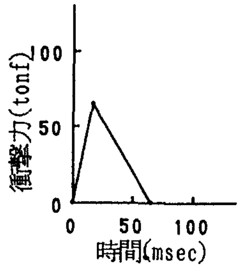

図-4　衝撃力の時間分布

3．数値計算例

まず、図－1に示すような鋼製ロックシェッドを対象とし、図－2に示すようにモデル化して解析を行った。

なお，サンドクッションの死荷重の影響は質量マトリックス中に取り込み，慣性力として考慮した。また，荷重$\mathbb{P}(t)$は山砂を用いたサンドクッションの上に重錘重量3tfが高さ10mから落下したときの図－4に示すような衝撃荷重を用いた。

計算結果の一例として節点④および⑤について，斜材がある場合とない場合の変位～時間関係を図－5に示した。これより載荷中65msまでは変位にほとんど差はないが，これを過ぎると斜材がある方の最大変位が小さくなることがわかった。特に節点⑤はその影響が顕著であり，約18％の低減が認められた。振動の周期についても斜材がある方の剛性が大きくなるために短くなることがわかった。

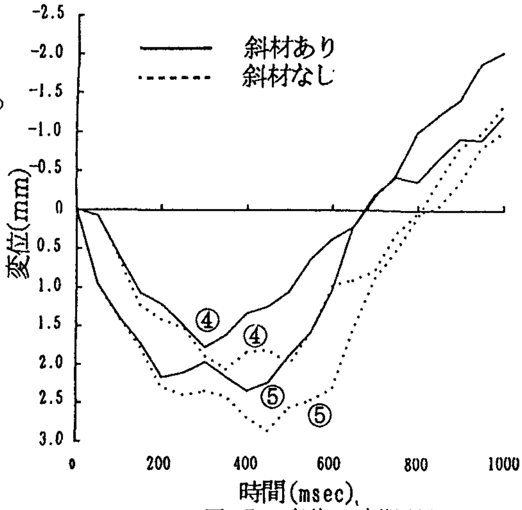

図-5　変位～時間関係

4．結論

ここでは鋼製ロックシェッドに落石がサンドクッションを介して落下した場合の斜材の影響について考察を行ったが，これより斜材がある方がないものに比べて載荷点変位で約18％小さくなっており，斜材の影響が大きいことがわかった。

参考文献：

1)石川，和田，香月，星川：局部変形とはりのせん断変形を考慮した鋼管方持ばりの衝撃弾塑性応答解析，構造工学における数値解析シンポジウム論文集，第13巻，pp.515～520，平成元年7月

2)園田，佐藤，石川：落石覆工のエネルギー分担エネルギー分担率に関する一考察，落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，1991年3月