

土木構造物における3次元解析、動的解析、非線形解析など 解析技術適用の事例とその効果

ロックシェッドの立体モデルへの適用

(株)フォーラムエイト 東京本社技術サポート Gr 長 中川 信男

1. はじめに

現在、構造解析の主流は2次元解析である。これは、計算機環境の時代的背景に大きく依存している。3次元解析手法はFEMも含め古くから存在していたが、計算時間やモデル化の手間から実務では2次元解析が多用されていた。しかし、ここ数年、計算機性能の飛躍的な向上と、3次元モデルジェネレータの機能充実に伴い、安価で簡便に3次元解析が行えるようになってきた。

本稿では、箱型式ラーメン構造のロックシェッドへの適用例を紹介する。通常、2次元弾性解析による許容応力度法で設計されるが、今回は、背面斜面の地下水位が高く、地震時に背面斜面も一体となって挙動することが危惧されたため、3次元非線形動的解析まで実施するものである。

解析には、弊社3次元非線形解析ソフト「UC-win/Frames(3D) Ver.1.07」を用いる。

2 ロックシェッドの立体モデルへの適用

1) 解析対象

解析対象は、図-1に示す箱型式ラーメン構造の

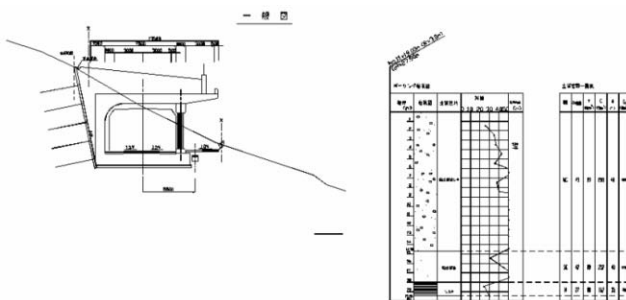


図-1 ロックシェッド一般図

RCロックシェッドである。図に示すように、ロックシェッドの背面斜面の地下水位が高く、降雨後、高地下水位時に地震が発生した場合、斜面全体が崩壊する可能性が考えられる。

本解析の目的は、前述の理由により背面斜面が地震時に崩壊した際、背面斜面の土塊も一体となってロックシェッドに作用した場合の挙動を検証することである。

2) 解析モデル

解析対象のロックシェッドは、全体で7ブロックある内の起点側2ブロックを対象とし、道路軸方向にR=500mの曲線構造となっている。崩壊する可能性のある斜面は吹付けコンクリートとロックボルト補強材で補強されている(図-2)。また、使用材質は

- ・ロックシェッド

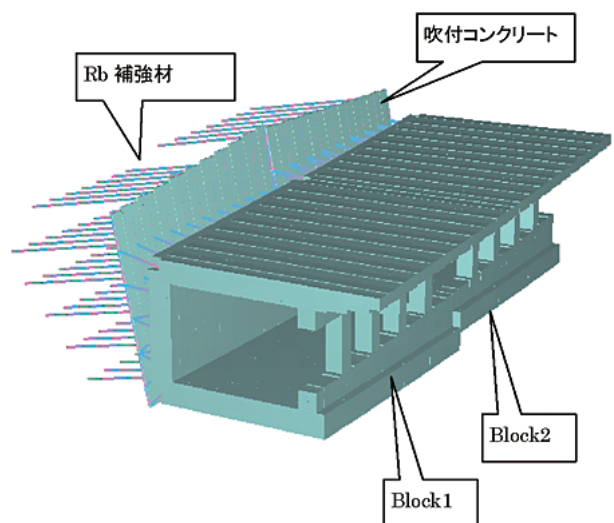


図-2 ロックシェッドモデル全体図

コンクリート：24MPa

鉄 筋：SD345

・吹付けコンクリート

コンクリート：21MPa

・ロックボルト補強材

鋼 材：SM490

を用いる。

a. モデルの設定方針

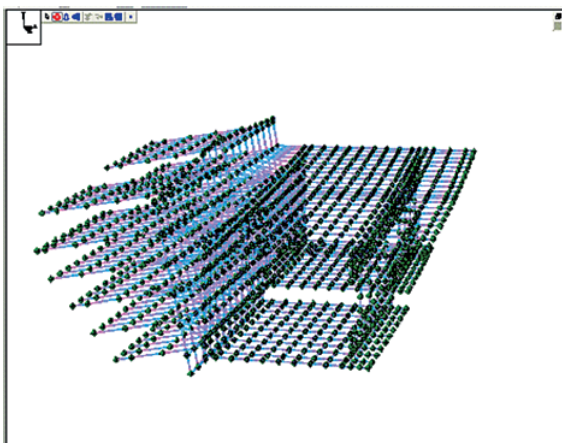
対象構造物は、前述のように地下水位が高く、地震時に背面斜面も一体となって挙動することが予想されるため、地震時の地下水がロックシェッドに及ぼす影響や、背面斜面による地震時土圧の設定に注意する必要がある。

まず、地震時の地下水がロックシェッドに及ぼす影響については、背面斜面とロックシェッド間に挟まれた区間にたまる地下水が、長方形水槽に働く動水圧と同じようにロックシェッドに働くと仮定し、その作用を質量によってモデル化する。質量への換算は、Housner の近似式を用いる。

背面斜面の地震時土圧については、主動崩壊角より上面の土砂重量が背面斜面の地震時土圧として働くと仮定し、同じようにこの土塊を質量でモデル化する。斜面にレベル2地震動クラスの地震が発生した場合、斜面地盤はある加速度に達したとき地盤が破壊し、それ以上の加速度が加わっても破壊線に囲まれた土塊は大きくならないことが各種実験等でも証明されており、この考え方を参考にしたものである。

また、頂版、側壁、底版の版構造については、道路軸方向および道路軸直角方向それぞれに部材を設けることにより、版の3次元挙動を擬似的に表現する。

以上の考え方に基づき作成した骨組みモデル図

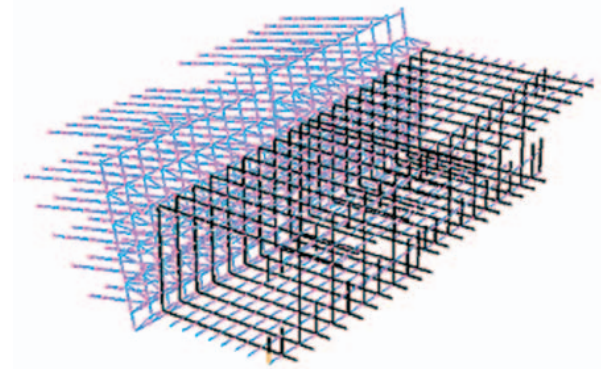


図－3 骨組みモデル図

を、図－3に示す。

b. 線形部材と非線形部材

本解析では道路軸直角方向のロックシェッドの挙動に着目したため、道路軸直角面の全てのロックシェッド躯体の部材をファイバー要素とする。それ以外の道路軸方向のロックシェッド部材、吹付けコンクリート部材、ロックボルト補強材は線形部材とする（図－4）。

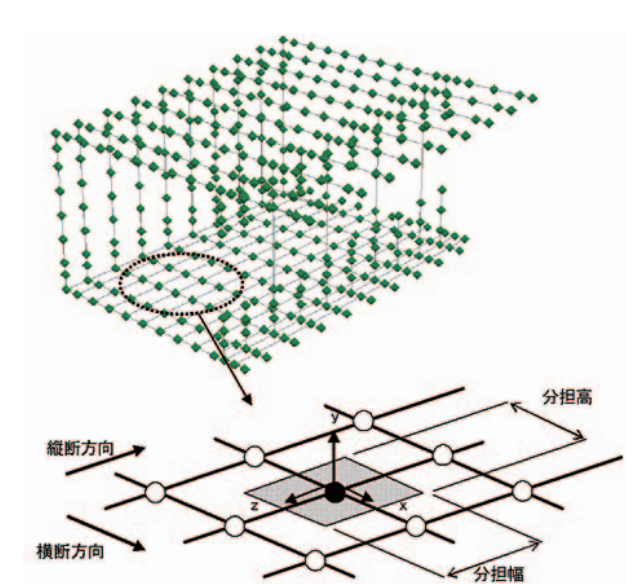


図－4 線形部材と非線形部材（黒線部分が非線形部材）

c. 支点条件

本解析では底版およびロックボルト補強材の支点に、ばねを設定する。

底版の地盤ばねは、図－5に示すように、各節点の分担高と分担幅と地盤のばね定数より、以下の算出式から求める。



図－5 底版の地盤ばね算定図

$$K_{sb} = K_v/3$$

$$A_b = \text{分担幅} \times \text{分担高}$$

$$K_x = K_z = K_{sb} \times A_b = K_v/3 \times \text{分担幅} \times \text{分担高}$$

$$K_y = K_v \times \text{分担幅} \times \text{分担高}$$

$$\theta_x = K_v \times I_x = K_v \times (\text{分担高} \times \text{分担幅}^3/12)$$

$\theta_y = 0$ (フリー)

$\theta_z = K_v \times I_z = K_v \times (\text{分担幅} \times \text{分担高}^3 / 12)$

また、ロックボルト補強材の地盤ばねは、図-6に示すように、各節点の隣接する節点との中間位置の間隔と地盤のばね定数より、以下の算出式から求める。

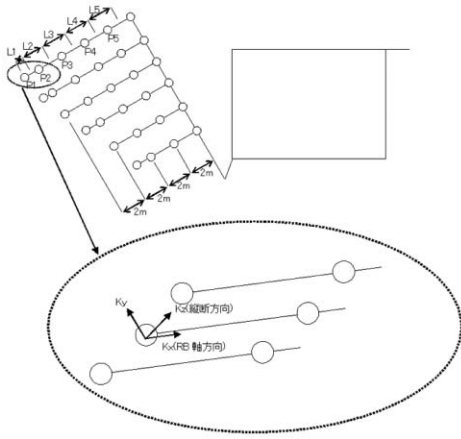


図-6 ロックボルトの地盤ばね算定図

$$K_x = K_z = K_v / 3 \times D \times L_n$$

K_y = 固定

回転成分はフリー

d. 背面斜面とロックシェッド間のモデル化

背面土とロックシェッド間は剛部材で結合する。なお、その両端はピン結合とし、剛部材の結合により発生するロックシェッドに対する曲げモーメントの影響を極力小さくするようモデル化する(図-7)。

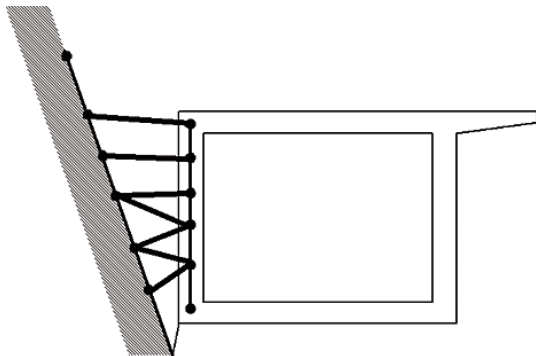


図-7 背面斜面とロックシェッドの結合モデル

e. 荷重の設定

ロックシェッドにかかる荷重は、表-1に示す9種類を定義した。この内、背面土圧、浮力、水圧、輪荷重は常時状態にのみ作用し、地震時には作用しない荷重とし、動水圧+地震時土圧、斜面背面地震時土圧+吹付けコンクリート壁圧は地震時のみ作用する荷重、ロックシェッド自重と上載荷重は、常時および地震時ともに作用する荷重として定義する。

以下に、荷重の算出方法の概要を示す。

表-1 载荷荷重一覧表

荷重	定義方法	初期荷重として動荷	動的・地震時に慣性力として作用する
ロックシェッド自重	断面形状から自動計算	○	○
背面土圧	基本荷重	○	×
上載荷重	質点	○	○
浮力	基本荷重	○	×
水圧	基本荷重	○	×
輪荷重	基本荷重	○	×
函内荷重	質点	○	○
動水圧+地震時土圧	質点	×	○
斜面背面地震時土圧+吹付けコンクリート壁圧	質点	×	○

ロックシェッド躯体部分の死荷重については、断面積と断面の材料から決定する。なお、本解析では道路軸直角方向のロックシェッドの挙動に着目したため、ロックシェッドの横断面部材のみに死荷重を載荷し、道路軸方向の部材には死荷重を載荷しないようにしている(図-8)。

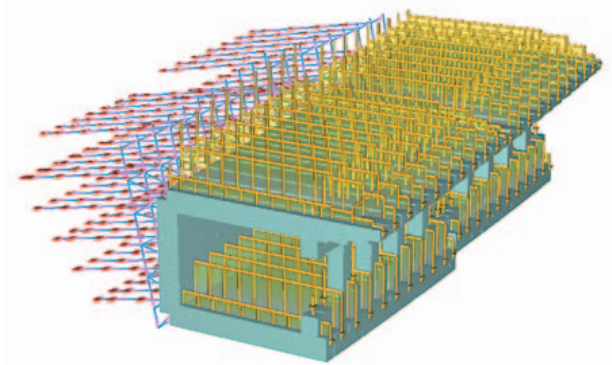


図-8 ロックシェッド自重荷重図

背面土圧、水圧についても、ロックシェッドの横断面部材のみに荷重を載荷する。図-9および図-10に示すように荷重を側壁の鉛直部材に部材分布荷重として載荷する。

浮力、輪荷重についても、ロックシェッドの横断面部材のみに荷重を載荷する。図-11および図-12に示すように底版の横断方向部材に部材分布荷重として載荷する。

上載荷重、函内荷重については、節点の質量として扱う。各節点の質量は、分担高と分担幅と平均深さ(上載荷重は分担高範囲の平均深さ、函内荷重は分担幅範囲の平均深さ)をもとに、

節点質量 = 分担幅 × 分担高 × 深さ × γ / 9.8
として算出する(図-13)。

動水圧+地震時土圧も節点質量でモデル化する。各節点の質量は、分担高と分担幅をもとに、図-14および図-15に示す算出式で算出する。

斜面背面地震時土圧についても、節点質量でモデ

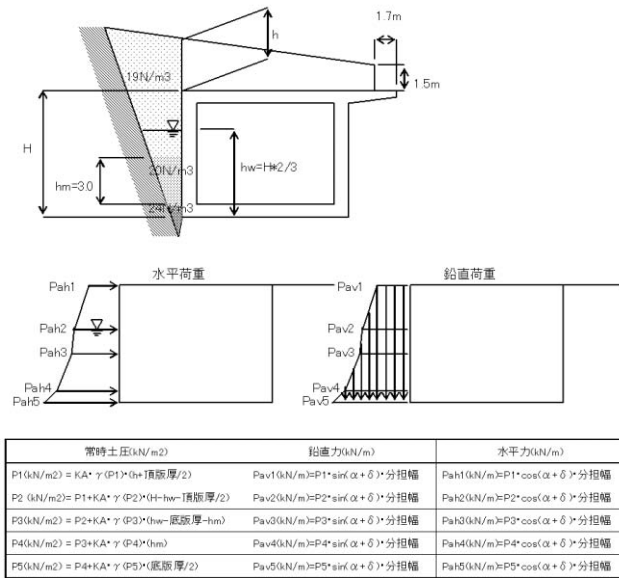


図-9 背面土圧算出図

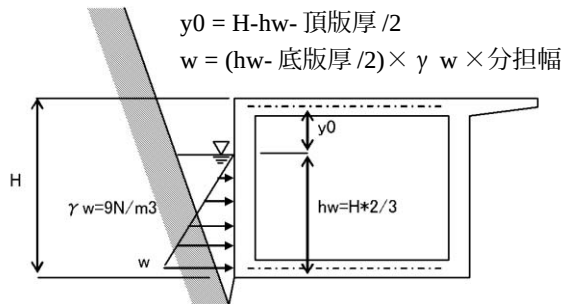


図-10 水压算出図

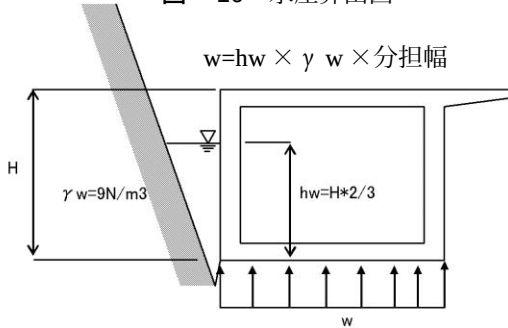


図-11 浮力算出図

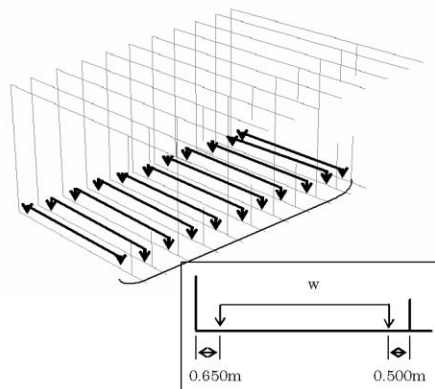


図-12 輪荷重算出図

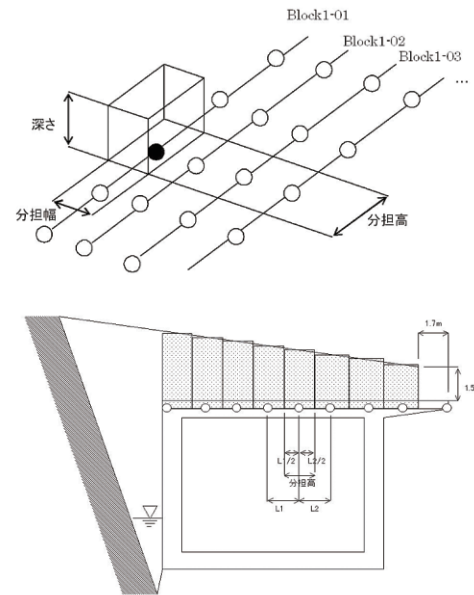


図-13 上载荷重、函内荷重算出図

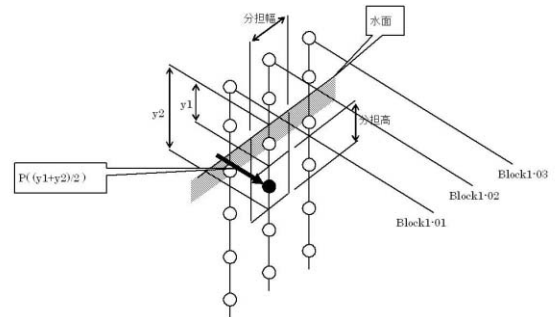
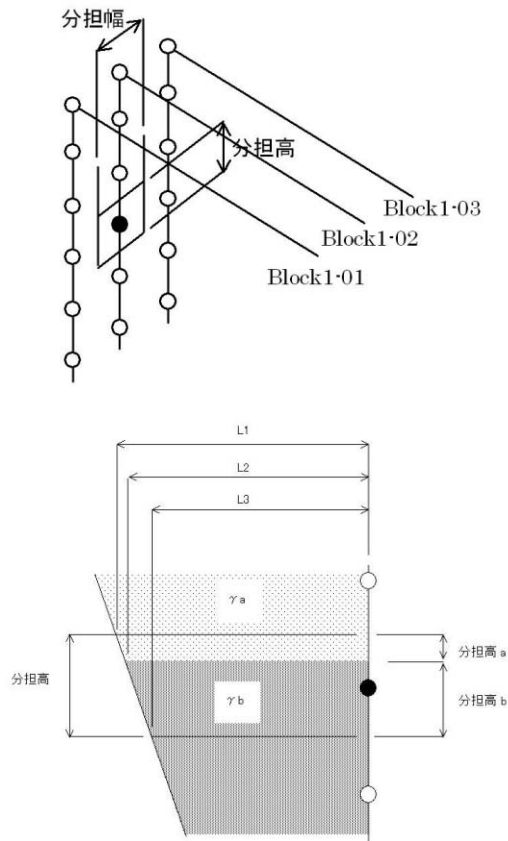


図-14 動水圧算出図

$$\text{節点質量} = \text{分担幅} \times \text{分担高} \times P(y1+y2)/2 / 9.8$$



$$\text{節点質量} = ((L1+L2)/2 \times \text{分担高} a \times \gamma a + (L2+L3)/2 \times \text{分担高} b \times \gamma b) / 9.8$$

図-15 地震時土圧算出図

ル化する。ただし、斜面の地震時土圧については前述したように主動崩壊角より上面の土砂重量が背面斜面の地震時土圧として働くとし、各節点の分担高と分担幅をもとに、図-16に示す算出式で質量を求める。

$$\text{質量} = \gamma \times (L1+L2) \times \text{分担高} / 2 \times \text{分担幅}$$

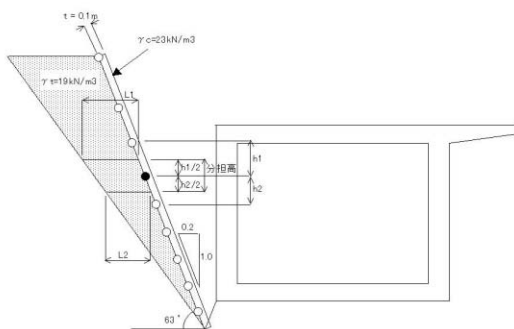


図-16 斜面背面地震時土圧算出図

f. 減衰係数算出用振動数

以上のようにして作成した解析モデルは、背面土と一体化したモデルであるため、固有値解析の結果には背面土のモードも混在する。そのため、動的解

析で使用する減衰係数算出用振動数は、モード図より道路軸直角方向のロックシェッドのモードとなる7次モードの振動数3.593Hzを用いて解析した(図-17)。

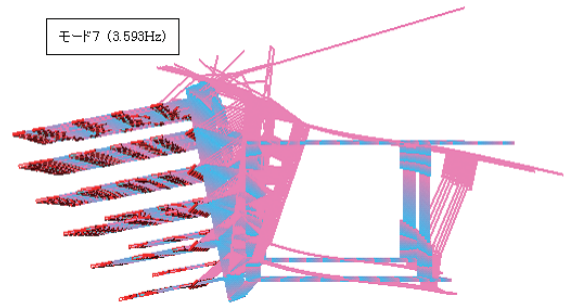


図-17 7次モード図

3) 解析結果

上述の方法でモデル化した3次元ロックシェッドモデルに、兵庫県南部地震で採取された神戸海洋気象台N-S波を道路軸直角方向に加震した結果を以下に示す。

図-18に曲げモーメント図を示す。図より曲げモーメントの出方は各横断面方向ともほぼ同じ傾向と値を示している。曲げモーメントの値は厳密には起点側から終点側に徐々に大きくなっていくが、これはロックシェッド高さが高くなることによるものである。

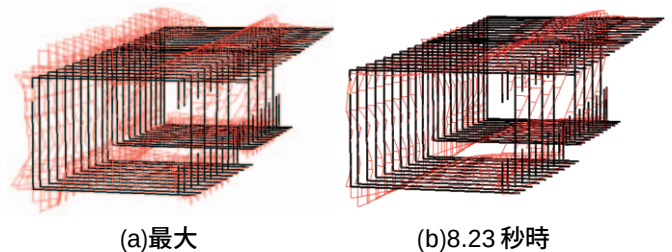


図-18 曲げモーメント図

図-19、図-20に、断面に生じた最大ひずみをもとにしたロックシェッド全体の損傷状況図と、変形図を示す。図より、2ブロックとも柱位置での上梁は全て終端ひずみを越えていることがわかる。さらに、終点側のNo.2ブロックでは、下梁についても終端ひずみを越えている。表-2に終端ひずみを越えている柱位置での上下梁断面の詳細な損傷状況図を示す。

表より、2軸曲げの作用している状態が、No.1ブロックよりNo.2ブロックの方が顕著であることがわかる。これは、ロックシェッドが曲線構造であることと、背面斜面の吹付けコンクリート構造が直線構造であることに起因する。No.1ブロックでは吹付け

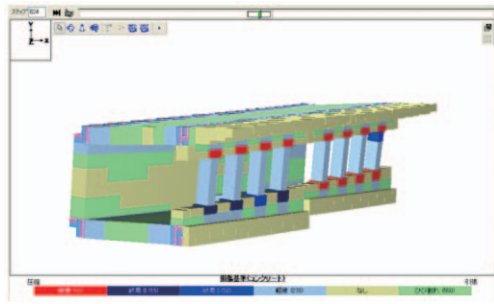


図-19 損傷状況および変位図(8.23 秒時)

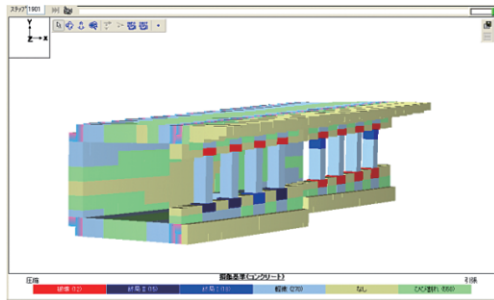


図-20 最終損傷状況および変位図(19.0 秒時)

表-2 上下梁断面の損傷状況一覧表

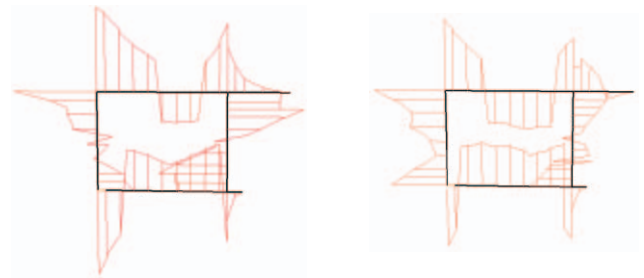
No.1ブロック		No.2ブロック	
上梁	下梁	上梁	下梁
柱1	柱1	柱1	柱1
柱2	柱2	柱2	柱2
柱3	柱3	柱3	柱3
柱4	柱4	柱4	柱4

コンクリートとロックシェットの壁面はほぼ平行な構造となっているが、No.2ブロックでは吹付けコンクリートとロックシェットの壁面は平行ではなく、ロックシェットは偏圧を受ける構造となっているためである。また、No.1ブロックよりNo.2ブロックの方が損傷が大きい理由としては、No.1ブロックよりNo.2ブロックの方がロックシェットの高さや背面斜面の高さが高いことから、より大きな地震時土圧を受けたためと思われる。

図-21に、No.2ブロック柱1の横断面について、2次元モデルによって求めた最大曲げモーメント図と、前述の3次元モデルによって求めた最大曲げモーメント図を比較する。図より、各部材に生じる

最大曲げモーメントの分布は、ほぼ同じ傾向と値を示している。

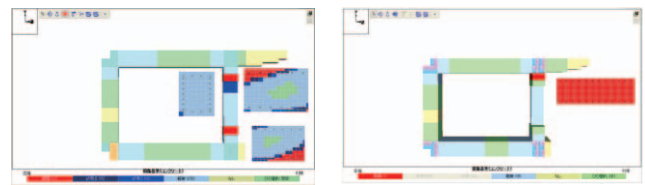
図-22に、図-21と同様に、2次元モデルと3次元モデルの損傷状況図を示す。図より、2次元モデルでは損傷箇所が上端1箇所に集中し、しかも断面全体において終端ひずみを越える結果となっている。3次元モデルでは、終端ひずみを越える部位は上下端両方になるが、両断面とも断面の一部が終端ひずみを越える結果となる。よって、2次元モデルでは、上端付近で部材が破壊し鉛直力が支持できない可能性が予想されるが、3次元モデルでは、かろうじて鉛直力を支持する性能を残していると予想される。



(a) 3次元モデル

(b) 2次元モデル

図-21 最大曲げモーメント図



(a) 3次元モデル

(b) 2次元モデル

図-22 損傷状況図

3. まとめ

ロックシェットの設計に際して、断面力図の傾向から弾性解析であれば、2次元解析でも3次元解析でも同じような結果が得られると想定され、この場合2次元解析による設計でも十分と考えられる。しかし、2次元解析では、モデル化した横断面内の部材のみが外力に抵抗することになり、実際には連続している道路軸方向へ応力の再配分が表現できない。特に、材料非線形を考慮する場合は、2次元解析によると破壊箇所に応力が集中し、過度な変形が生じやすくなる。よって、今回のような応力分配が期待出来る構造については、3次元解析により行うことがより合理的な構造設計を可能にするものと考えられる。