

金沢大学工学部 正会員 ○池本 敏和  
金沢大学工学部 正会員 北浦 勝

### 1. はじめに

城郭の石積みなど数百年経つ構造物の中には改修の必要性の出てきているものがある。石積みは耐久性に優れている反面、その工法は経験に頼らざるを得ず、科学的な考察がなされていないのが現状である。これまで著者らは、剛体ばねモデルを用いて石積みの静的・動的挙動のシミュレーションを行なってきた。しかしながら、石積みの基礎となる地盤を考慮していないなどの問題があった。本文では、石積みの基礎部を構成する地盤を考えるとともに石積みの耐震安定性について検討を行なう。

### 2. 解析方法

解析には剛体ばねモデル<sup>1)</sup>(川井モデル)を用いる。このモデルは要素自身を剛体と仮定し、各要素境界面上にばねを設けるもので、要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用いて、エネルギーを評価する。その結果、増分計算を行なうことにより、破壊線を決定することができ、不連続体に対する解析が可能となる。

動的解析の方程式は

$$F = K \cdot u + C \cdot \dot{u} + M \cdot \ddot{u}$$

となる。ここで  $C$  は減衰行列、 $M$  は質量行列、 $\cdot$  は時間微分を表す。また解析には Newmark  $\beta$  法を用いた。

解析モデルとして、Fig.1のような石積みを想定する。塗りつぶした要素は石、斜線部は地盤、その他は石の裏に込める小石や砂礫の集合要素とする。これらの要素は解析の都合上要素の面積は変化しないものとする。横方向から土圧の分布荷重を境界要素ごとに集中して作用させる。このような荷重  $P_0$  が作用した状態を初期状態とし、さらに EL CENTRO 地震波 (NS 成分) を約 10 秒間作用させる。破壊条件にはモール・クーロンの条件を用いる。また材料定数を Table 1 のように定める。ここに  $E$  は

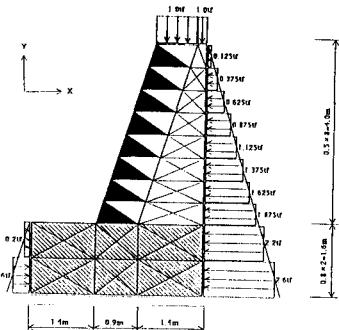
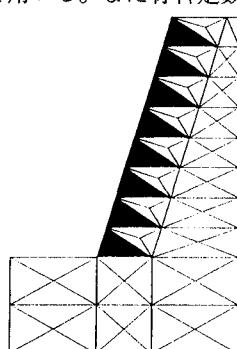


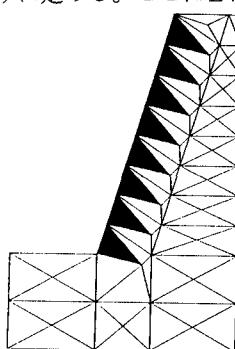
Fig.1 Static load due to soil.

Table 1 Parameters of analytical model.

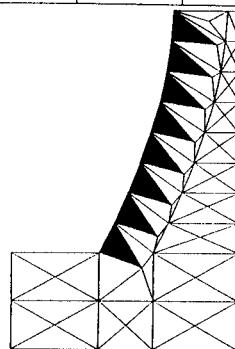
	Stone	Ground	Back-filling soil
Young's modulus ( $E$ )	$2.0 \times 10^3 \text{ t f/in}^2$	$3.0 \times 10^3 \text{ t f/in}^2$	$1.0 \times 10^3 \text{ t f/in}^2$
Unit weight ( $\gamma$ )	$2.5 \text{ t f/in}^3$	$1.8 \text{ t f/in}^3$	$1.8 \text{ t f/in}^3$
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.3	0.4	0.3
Angle of internal friction ( $\phi$ )	$10^\circ$	$30^\circ$	$30^\circ$
Cohesion ( $C$ )	$0.0 \text{ t f/in}$	$3.0 \text{ t f/in}$	$2.0 \text{ t f/in}$



Model(S)



Model(D)  
Fig.2 Analytical model of stone masonry.



Model(X)

弾性係数、 $\nu$ はポアソン比、 $\gamma$ は単位体積重量、 $C$ は粘着力、 $\phi$ は内部摩擦角である。要素分割としては、Fig.2(S)を基準モデルとし、法勾配は同じで胴を下げるモデル(D)、法勾配を徐々に変化させたモデル(X)を解析対象とした。

### 3. 解析結果及び考察

動的解析における結果の一部をFig.3に示す。Fig.3は最上部の石の応答を示しているが、モデル(S)では全体的に相対変位が大きい。一方、モデル(D)、(X)では相対変位が小さく、比較的高い耐震性を示している。また、Fig.4に見られるように、モデル(S)ではモデル(D)、(X)に比べ、地震波入力後10秒後には斜面上部の石積みが崩れ、斜面中腹の石が飛び出そうとしていることがわかる。このことからも胴を下げる石が耐震的に優れているといえる。しかしながら、モデル(D)と(X)との間には大きな差はなく、勾配を変化させた工法の有効性については認められなかった。

### 4. おわりに

以上見たように、石の胴を下げて積む方が耐震性に優れていることがわかった。これは石積みの経験則と一致していることから、石積みの挙動メカニズムをある程度近似することができたと考えている。今後は、実験を行なうことにより、石同士の力学挙動を明らかにし、その成果を解析に取り込んでいく予定である。なお、解析にあたり元金沢大学学生・針原研二君には多大な協力をいただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献 1) 竹内則夫:地盤力学における離散化極限解析、培風館、pp.10-13、1991.

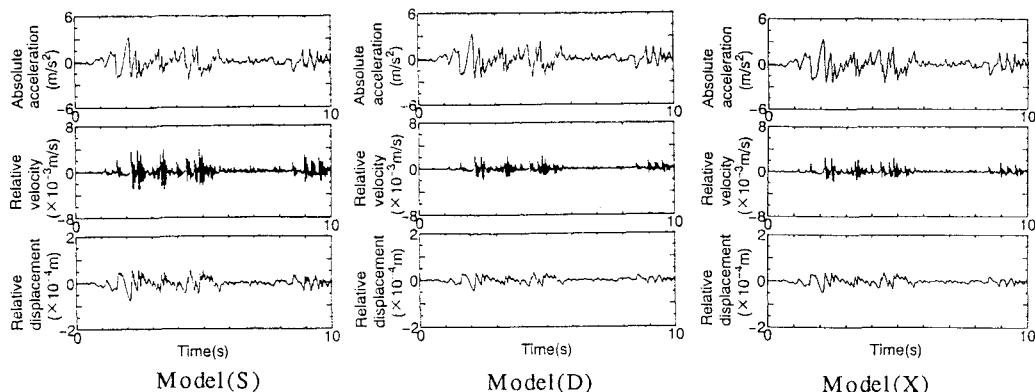


Fig.3 Time histories of absolute acceleration, relative velocity and relative displacement at the top of stones.

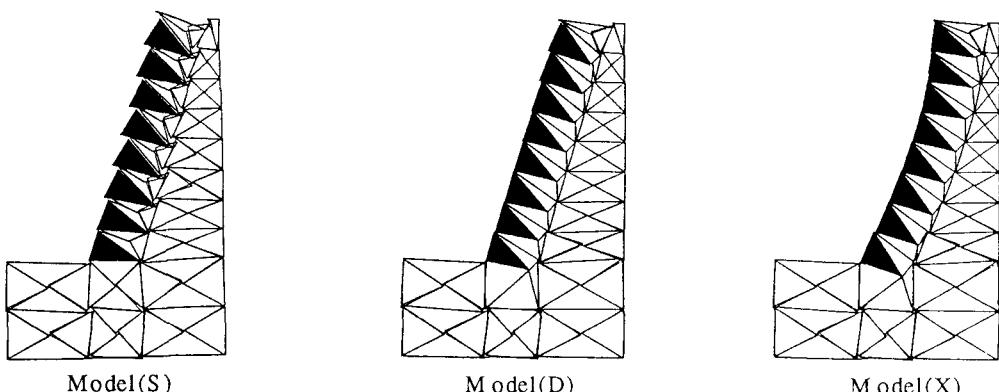


Fig.4 Deformation modes of models after 10 seconds.