

震動時におけるロックボルトおよびロックアンカーの 力学的挙動

DYNAMIC RESPONSE OF ROCKANCHORS AND ROCKBOLTS DURING SHAKING

大和田洋一*, 大洞光央**, アイダン・オメル***

Yoichi OWADA, Mitsuo DAIDO, Ömer AYDAN

Rock structures such as underground powerhouses, tunnels, dams undergo various loading conditions during their construction and service lives. Particularly dynamic loads involve blasting, vehicle traffic and vibrations induced by power generation. As time goes by, support system may deteriorate as a result of corrosion, micro cracking and motions along rock discontinuities in rock masses. The main purpose of this experimental study is to clarify the response of rockbolts and rock anchors through model tests subjected to cyclic loads by a shaking table. The model rockbolts tested in the model tests were mechanically anchored rockbolts and fully grouted rockbolts. The model experiments described in this note clearly demonstrated that the dynamic loads may cause additional stretching on support systems utilizing rockbolts and rock anchors due to the permanent deformation along rock discontinuities as a result of active sliding and active toppling type of motions. Therefore, further considerations on the assessment of short and long term on support systems utilizing the rockbolts and rock anchors as part of the total system are felt to be necessary.

Keywords: rockbolt, rock anchor, vibration, axial force, discontinuity, underground opening, rock mass

1. はじめに

岩盤構造物は建設中あるいは利用中において地震、交通、発電、発破に伴った震動を受けることが多く、利用中に支保部材の破壊などが発生することが推測される。しかし、現在までこの問題に関しての研究は行われていない。構造物の維持管理に関連して、支保部材として利用されるロックボルトやロックアンカーの繰り返し震動下での力学挙動は大変重要であり、そのメカニズムについて実験的や解析的な検討が必要であろう。本研究で、ロックボルトやロックアンカーを両端固定型と全面付着型の二通りで補強した不連続性岩盤モデルを作成し、震動台を用いて動的な実験を行いロックボルトの震動時の力学挙動を計測した。本論文では、この実験の概要と試験結果および両端固定型モデルに対する解析的な検討・比較について報告する。

2. 実験背景

ロックボルトやロックアンカーは岩盤構造物の支保部材として広く一般的に利用されている。岩盤は自然

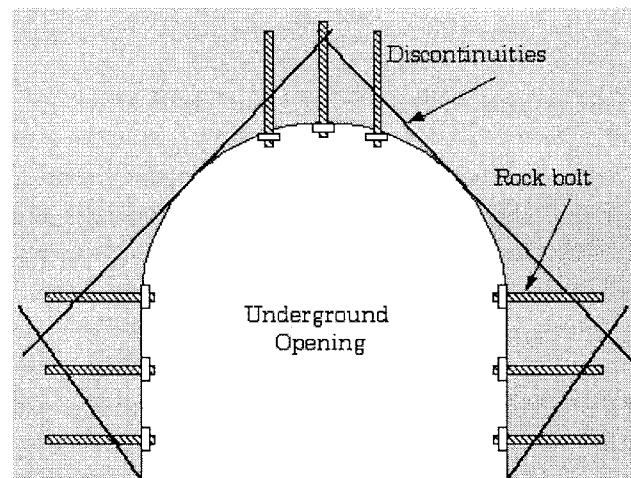
* 博士課程前期 東海大学大学院 海洋工学専攻

** 学生会員 博士課程後期 東海大学大学院 海洋工学専攻

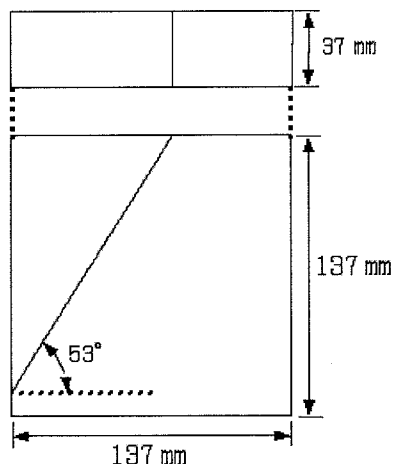
*** 正会員 工学博士 東海大学 海洋学部 海洋土木工学

に不連続面を有することが多く、不連続性岩盤においてロックボルトやロックアンカーは最も適した補強部材である (Aydan,1989)。図—1 に示すように不連続性岩盤に覆われた地下空洞の場合では側壁や天端からの岩盤ブロック落下やすべりを防止するためロックボルトやロックアンカーは利用される。しかし、岩盤構造物は建設中あるいは利用中に地震、交通、発電、発破などによる震動を長期間にわたって受ける。

そのような岩盤構造物において繰り返し振動が加わり、不連続面を有する岩体中のブロックが滑る現象が起こるとすると、不連続面を補強しているロックボルトの軸力が変化し、破断に至る危険性が考えられる。さらに、一度滑った岩盤ブロックはもとの位置には戻らないのでロックボルトの軸力は長期的に増大し、破断に至るという過程が考えられる。現在までロックボルトのこのような力学挙動を検討された例はなく、本研究でそのメカニズムを実験的および解析的に解明することを目的とする。



図—1 不連続面を有する岩体中の空洞



図—2 模型の寸法

3. 両端固定型ロックボルトモデル

ロックボルトの軸力に対して振動の与える影響を検証するため模型実験を行った。不連続性岩盤は木製ブロックを使用して右図(図—2)の通りにモデル化した。不連続面のせん断試験より求めた摩擦角は $24-26^\circ$ の間で変化した。ロックボルトはばねによってモデル化する。ばねの長さは 30 mm の物を使用した。

この模型を振動台に載せて振動を与えて実験を行った。この模型はばねの両端を固定することにより両端固定型のモデルとして実験を行う。

図—3 において、レーザー変位計 (No. 01) では動く側ブロックの変位応答を計測し、レーザー変位計 (No. 02) ではブロック全体の加速度を求めるための変位応答を計測する。

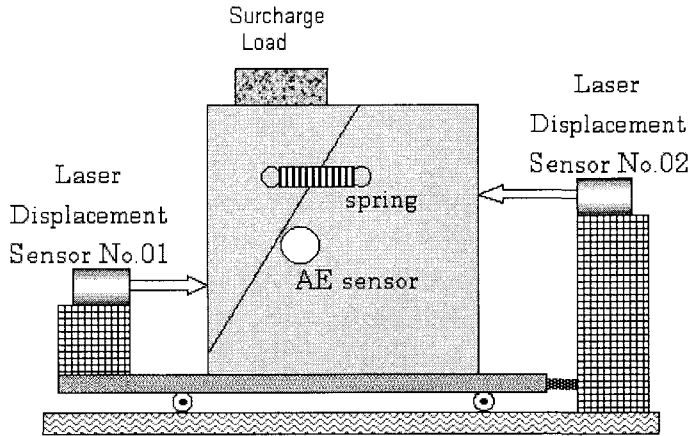
さらに不連続面直下に AE センサーを設置し AE 応答についても同時に計測した。また、動く側のブロックに作用する荷重を増加させるため、図—3 のようなブロック上部に岩石ブロックを乗せた。

4. 両端固定型ロックボルトの軸力の算出モデル

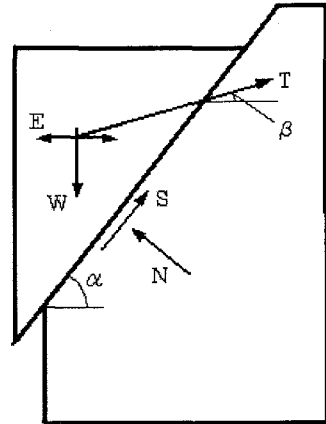
すべりが発生した場合、模型は力学的に図—4 に示すようにモデル化できる。図中の記号は W がブロックの重量、 T がばねの軸力、 E が振動荷重、 N がすべり面に採用する垂直反力、 S がせん断力、さらに α が水平面と滑り面の間の角度、 β が水平面とばねの間の角度である。さらに実験で用いたばねの荷重—変位関係は図—5 で示され、その関係は次式で近似できる。

$$T = 57\delta^{0.5} \quad (1)$$

ここで T はばねの張力で単位は gf、



図—3 実験装置



図—4 力学モデル

δ は変位で単位は mm となっている。今回の実験では 滑るブロックの重量が 69.7gf、ブロック上の岩石ブロックの重量が 172.7gf であり、ばねで支えないと滑る状態である。限界状態にあるブロックに作用するロックボルトの軸力は次式で与えられる。

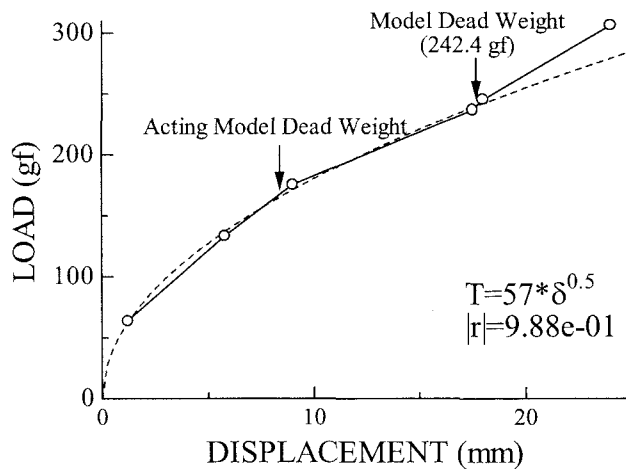
$$\frac{T}{W_t} = \tan(\alpha \pm \phi), \quad (W_t = W + W_s) \quad (2)$$

+ は上向の動き、- は下向の動きを表す。式(2)はブロックが上向に動くときは 下向へ動くときの約 10 倍の荷重が必要なことを意味しており、基盤の振動によってブロックが上向に滑ることはほとんどないと考えられる。

もし滑るブロック自体の変形が無視できるならば、ばねの軸力はブロックの剛体運動より求められる。すなわち次のようなブロックの変位の関数として得られる。

$$\delta_s = l - l_0 = \sqrt{(l_0 + \delta_h)^2 + \delta_v^2} - l_0 \quad (3)$$

l_0, δ_h, δ_v は、それぞれ ばねの初期長さ、ブロックの水平変位と鉛直変位である。



図—5 ばねの加重-変位関係

5. 両端固定型モデルの実験結果

図—6 と図—7 は模型に採用させた加速度に対する模型の応答結果である。基盤の最大加速度は実験 1 では 390gal、実験 2 では 590gal となっている。

実験結果から AE の累計、変位、ボルトの軸力とも加速度の値が増加するにしたがって大きくなっていくことが見受けられる。基盤の加速度の増加に伴い各パラメーターも増加し、加速度が一定に落ち着くと各パラメーターも収束する傾向が見られる。また当然の結果ながら繰り返し荷重が作用した後にボルトが伸びて軸力が増しボルトが破断しない限りブロックの滑りに抵抗するための役割を果たしている。この実験の結果は支保工が供用期間中に種々の繰り返し荷重によって破壊する可能性を示している。

6. 両端固定型の理論的モデル

不連続面に平行な方向を s 、垂直な方向を n として極限解析法により釣り合い式を導くと次のようになる。

$$\sum F_s = W_i \sin \alpha + E \cos \alpha - T \cos(\alpha - \beta) - S = m \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (4)$$

$$\sum F_n = W_i \cos \alpha + E \sin \alpha - T \sin(\alpha - \beta) - N = m \frac{d^2 n}{dt^2} \quad (5)$$

ここで滑っているときの n 方向の慣性項が無視でき、さらに滑り面に作用する抵抗が摩擦のみであるとすれば次の式が得られる。

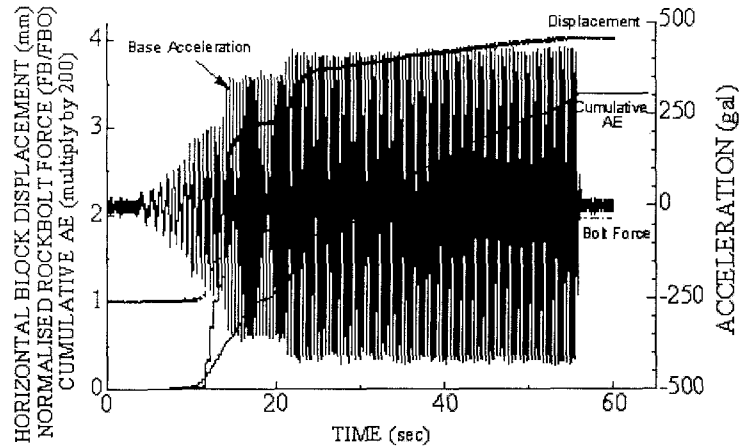
$$\left| \frac{S}{N} \right| = \tan(\phi) \quad (6)$$

これらをもとに次の滑っている岩体の剛体運動を次式で表すことができる。

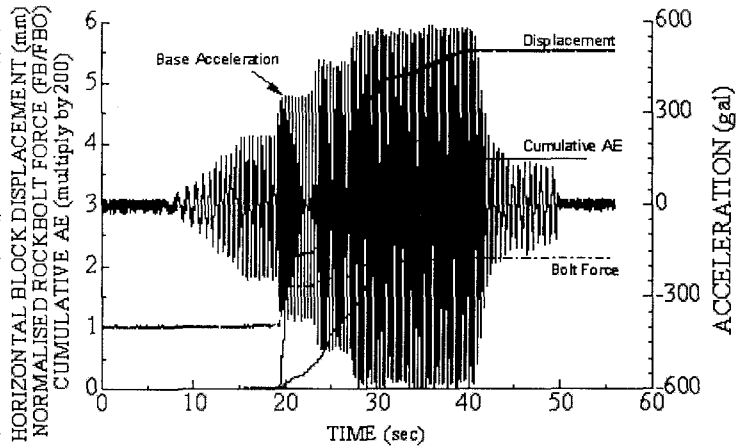
$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = A \quad (7)$$

ここで

$$A = W_i(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi) + E(\cos \alpha \tan \phi) - T(\cos(\alpha - \beta) + \sin(\alpha - \beta) \tan \phi) \quad (8)$$



図—6 基盤の加速度、ボルト軸力、ブロック変位、AE 応答



図—7 基盤の加速度、ボルト軸力、ブロック変位、AE 応答

振動荷重 E は滑っている岩盤ブロックの質量に比例すると、次のような形で基盤の振動と関連付けられる。

$$E = \frac{a_g(t)}{g} W_i \quad (9)$$

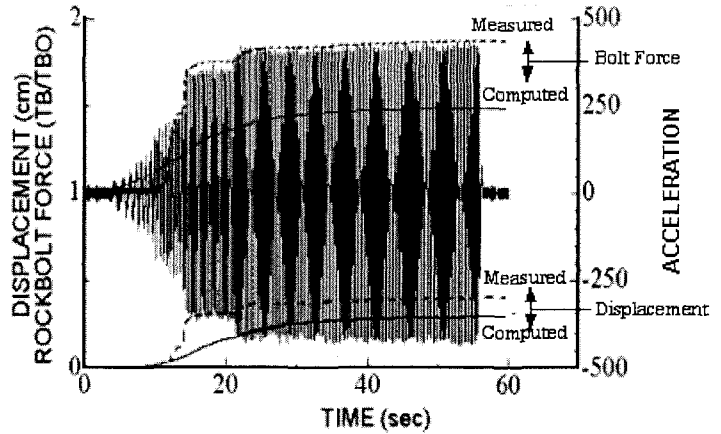
ここで a_g, g はそれぞれ基盤の加速度と重力加速度である。

7. 両端固定型における理論的モデルと実験結果の比較

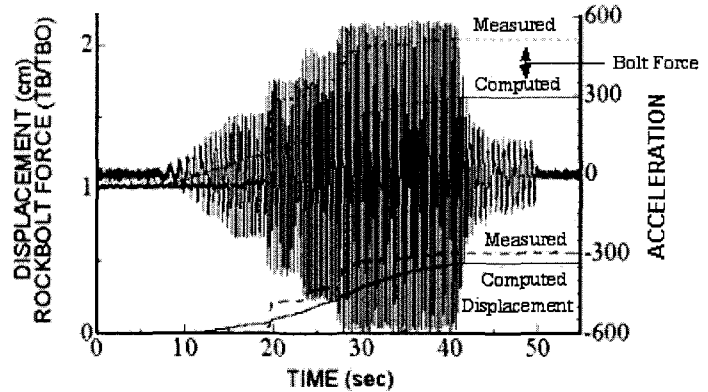
ここで理論的モデルと実験結果について比較し考察行う。図—8 と図—9 は摩擦角を 26° として計算した結果と実験結果を示したものである。この比較結果を見ると、計算結果の方が時間的に若干早く振動の影響が出ているものの計算と実験で傾向および数値的によく似た結果を得ることができた。計算結果の方が先に振動の影響を表した理由として、現実の滑り面では理論的モデルでは捉えきれなかった複雑な摩擦の影響が存在しているからであると推測される。しかしながら、この影響による値の差は実験結果からもわかるように実際の使用に際して大きな支障になるほどのものではなく、今回の理論的モデルでの支保工の動的応答のモデル化は工学的にも有用であると思われる。

8. 全面付着型ロックボルトモデルと実験

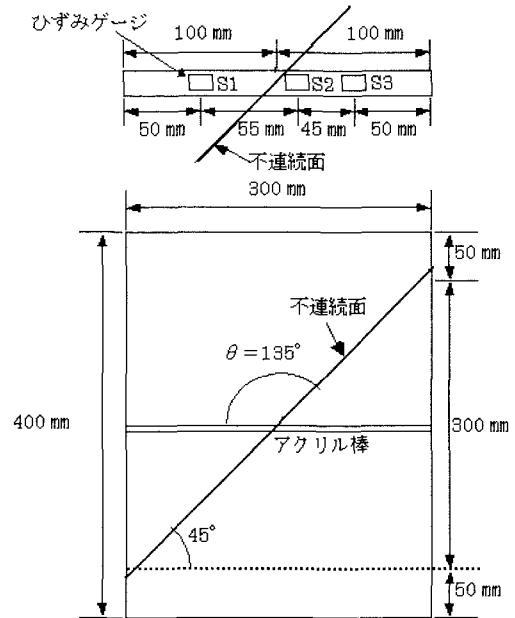
両端固定型のロックボルトをモデルとした前回の実験に対して、ロックボルトを全面付着型にした場合についての検討を行うため新たなモデルを作成し実験を行った(図—10)。本実験では、モルタルを利用して岩盤モデルを作成し、ロックボルトに関してはひずみゲージを取り付けたアクリル棒で作成した。また、不連続面に対するロックボルトの打設角度 θ の違いによる力学挙動の相違を検討するために不連続面に対してアクリル棒を 45° 90° 135° で設置し実験を行った。ここでは不連続面に対して $\theta = 135^\circ$



図—8 計算結果と実験結果の比較 Exp. 1



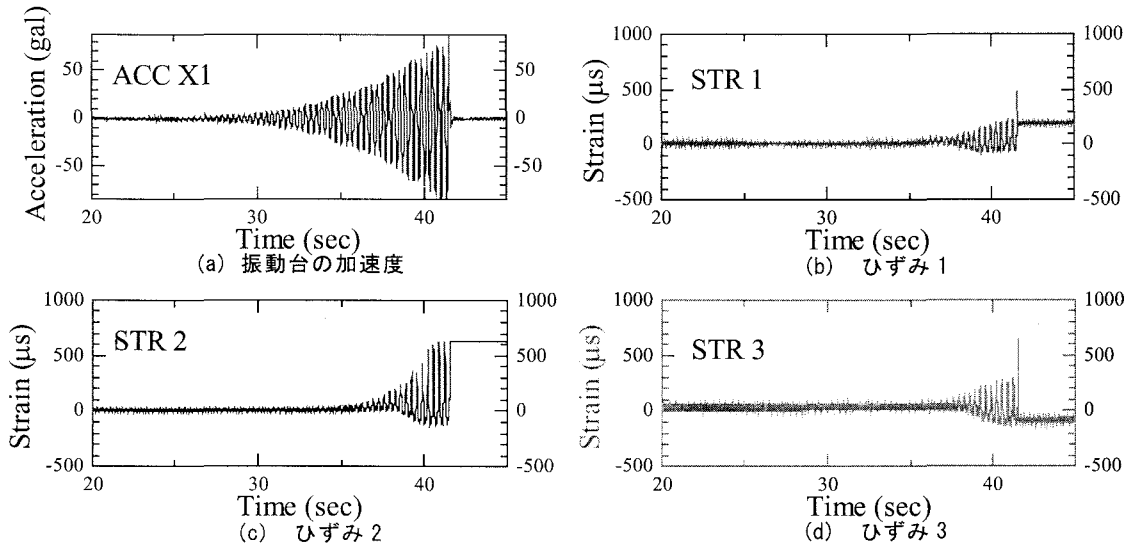
図—9 計算結果と実験結果の比較 Exp. 2



図—10 全面付着型モデル概念図

で設置したモデルの実験結果を紹介する。図—11 はロックボルトの不連続面に対する打設角度 $\theta = 135^\circ$ の場合における実験結果である。

まず、計測された最大ひずみ応答を見ると、正負の値に差があることがわかる。これは、上部岩盤ブロックが下方方向にずれを生じた際、ロックボルトに作用する力が大きくなっていることを示している。一方、上部岩盤ブロックが上方方向に振動力が作用した際にはロックボルトの軸ひずみが小さくなっている。次に、各位置における軸ひずみの最大値を比較する。不連続面近傍の軸ひずみが最大となり、不連続面から離れるとその値が小さくなっている。この結果は、ロックボルトで補強された不連続面のせん断された際に見られる応答 (Aydan, 1989) と同様である。また、不連続面から同距離で設置されたひずみゲージ 1 および 3 の軸ひずみはほぼ同様な値を示す。



図—11 全面付着型モデルでの加速度とひずみの応答

9. まとめ

本論文ではロックボルトやロックアンカーの繰り返し震動下での力学挙動を検証するため、ロックボルトを両端固定型と全面付着型の二通りで補強した不連続性岩盤モデルを作成し振動実験およびその解析を行った。その結果、振動に伴ってロックボルトやロックアンカーの軸力の増加が発生することが明らかになった。また、両端固定型ロックボルトに対して理論的モデルを作成し振動実験で得た結果と比較・検討を行った。その結果、計算と実験で傾向および数値的によく似た結果を得ることができた。

参考文献

Aydan, Ö. (1989): The stabilisation of rock engineering structures by rockbolts. 名古屋大学博士論文.