「海―自然と文化」東海大学紀要海洋学部　第３巻第１号　9-18頁（2005）
Journal of The School of Marine Science and Technology, Vol.3 No.1 pp. 9-18, 2005

震動時における全面付着型ロックボルトの力学的挙動

大和田洋一*1・アイダン・オメル*2

Dynamic Response of Fully Grouted Rockbolts During Shaking

Yoichi OWADA and Ömer AYDAN

Abstract

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 fully grouted rockbolts. The model experiments described in this article 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.

１．はじめに

現在多くの地下発電所が供用年数を迎えようとしている．この問題に対し，環境問題などによる建設現場の減少や経済性の面から新規に発電所を建設するのではなく既設の発電所を補修して供用年数を延ばすことが考えられている．そこで，維持・管理計画を立てるために岩盤構造物に対する長期的な安定性の評価が必要となる．今回，地下発電所などに代表される岩盤構造物に対し長期安定性に影響を与えると考えられる因子の一つとして，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に着目した．

Figure 1 に示すように不連続岩盤内に掘削さ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供用中に地震，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りや落下する現象（Figure 2）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，一度動いた岩盤ブロックはもとの位置には戻らないため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．しかし，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い．構造物の維持管理を考える上で支保部材として利用されるロックボルトの繰り返し震動下における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る．

本研究で，全面付着型ロックボルト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を報告し，実岩盤構造物におけるその意味合いについて論じる．

2005年５月16日受理
＊1　東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻（Tokai University, Graduate School of Marine Science and Technology）
＊2　東海大学海洋学部海洋土木工学科（Tokai University, Department of Marine Civil Engineering, Shizuoka, Japan）

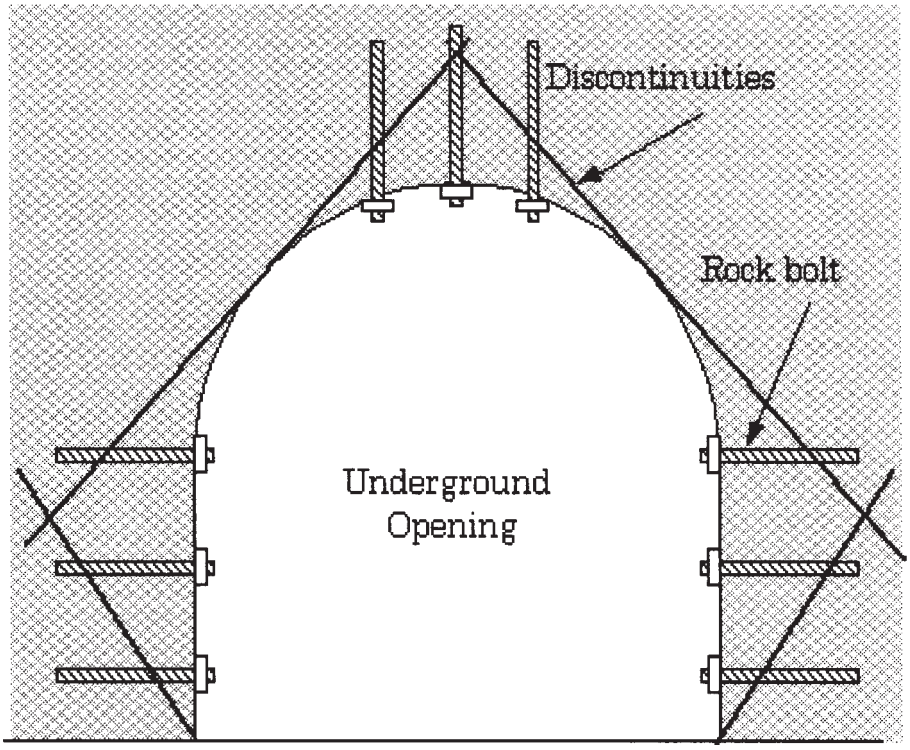

Figure 1　Underground opening excavated in discontinuous rock mass

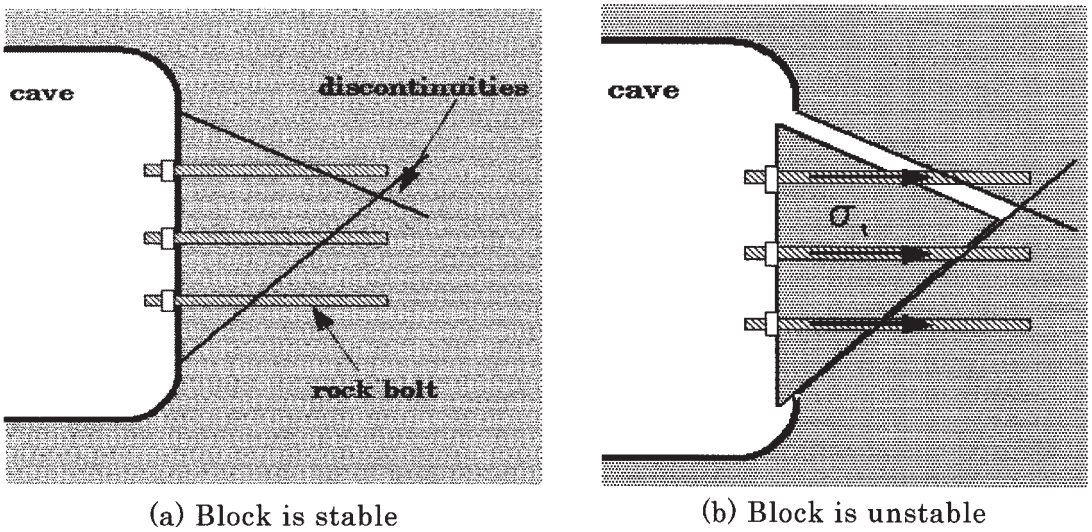

Figure 2　Illustration of the motions of an unstable block resulting from discontinuities around an underground cavern

2．実験概要

2.1　実験器具と実験方法

ロックボルトを全面付着型モデルとして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（Figure 3）．計測項目は，振動台および供試体の加速度，供試体の変位およびロックボルトのひずみである．それぞれのセンサーを WE7000 計測ステーションに接続し，ノートパソコンを利用して作動および計測結果の記録を行った．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 Figures 4～6 に示すようにアクリル棒にひずみゲージを外付けし，専用のパテによる防水加工を施した．また，アクリル棒はモルタル作成時に埋め込み，岩盤モデルと一体になるように固着させた．ひずみゲージの配置は曲げひずみの発生しないアクリル棒の中立軸方向に一列に配置し，純粋な軸ひずみを計測するものとした．

今回の実験では，不連続面に対するロックボルトの打設

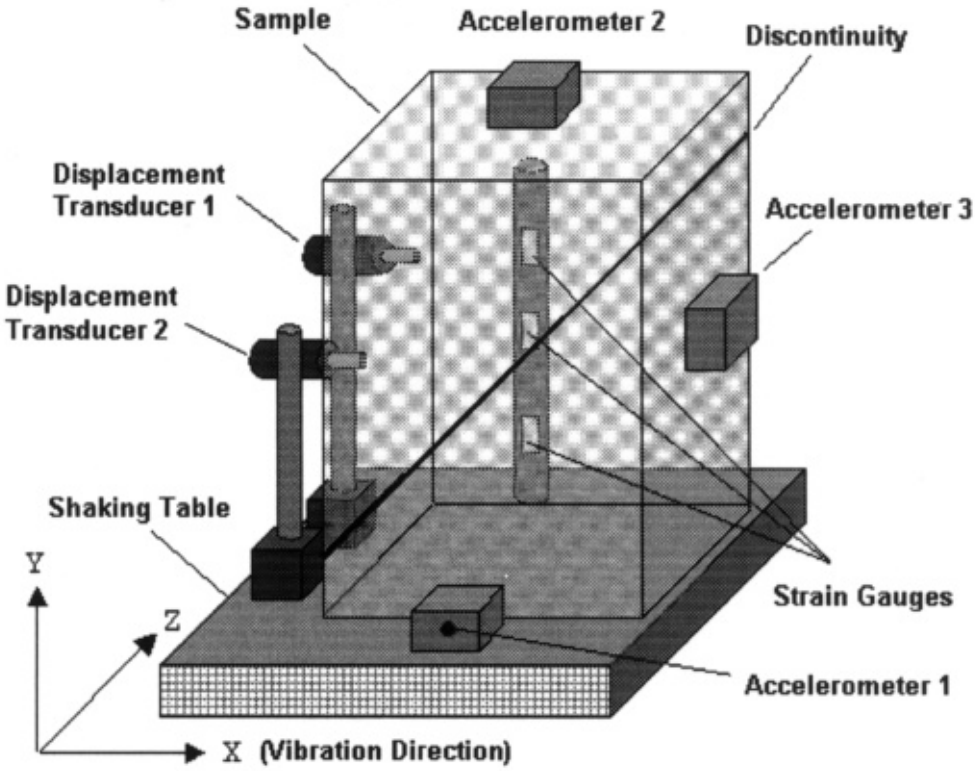

Figure 3　Illustration of the model and locations of sensors

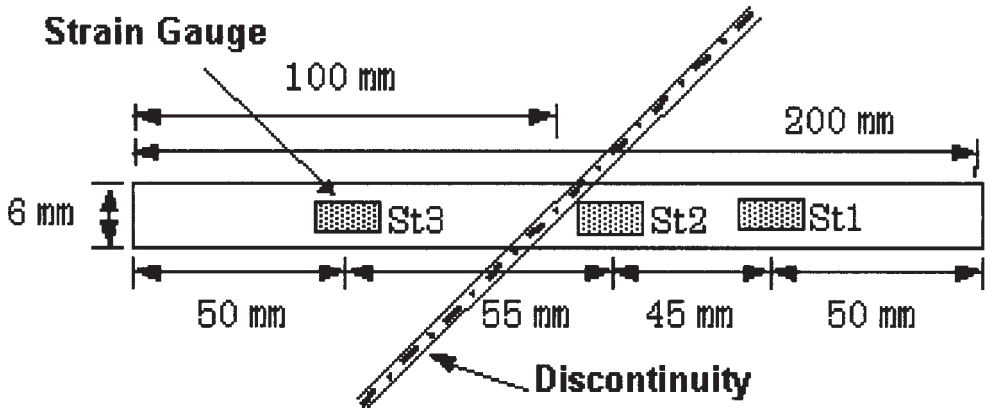

Figure 4　Locations of strain gauges on model rockbolt crossing a discontinuity

角度 θ の違いによる力学挙動の相違を検討するため，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．

2.2　ロックボルト材と不連続面の特性

本実験でロックボルトモデルとして直径 6mm 長さ 300 mm のアクリル棒を使用した．アクリル棒の引張り試験を実施し，その弾性係数を求めた．引張り試験より求めた弾性係数は 4.1GPa であった．

モデル岩盤における不連続面の摩擦特性を求めるため，傾斜実験を行った．傾斜実験より求めた不連続面の摩擦角は31° と35° の変化し，その平均値は約 33° であった．

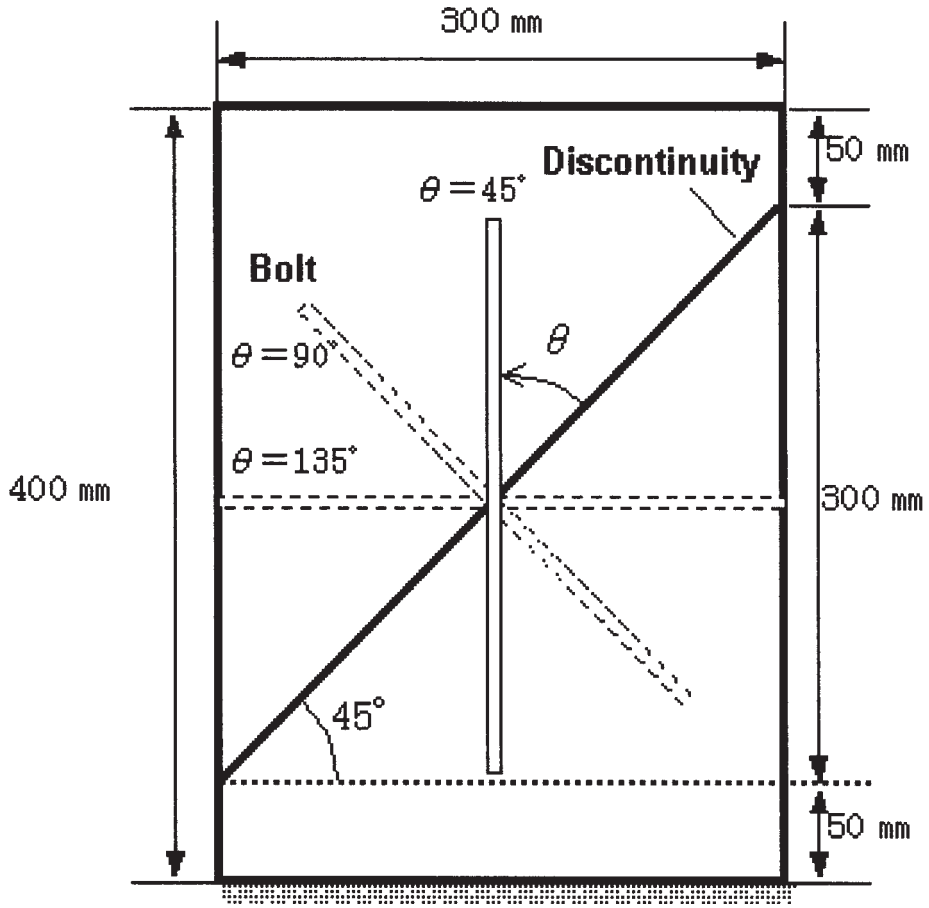

Figure 5　A rock mass model reinforced by a rockbolt with different installation angle

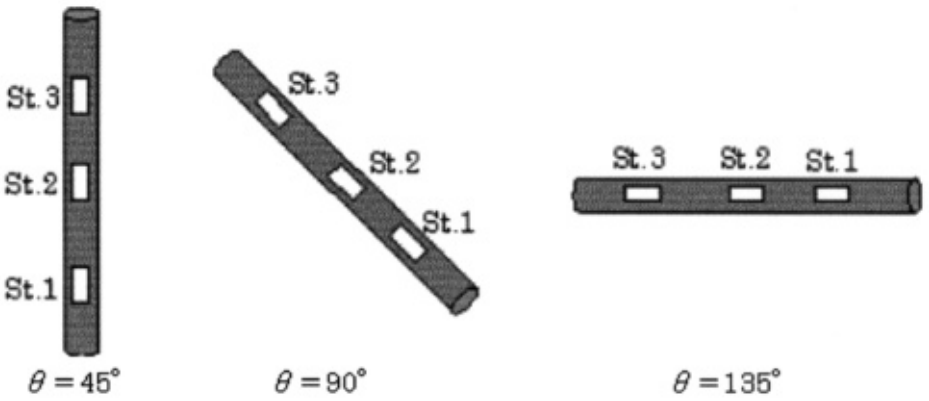

Figure 6　Locations of strain gauges for different installation angle of rockbolts

3．実験結果と考察

不連続面に対するロックボルト・ロックアンカーの打設角度 $\theta=45^\circ$，90°，135° での実験結果に対する一列をFigure 7～9に示す．まず，全体的なひずみの応答を見ると，ひずみは振動台における加速度の振幅が上昇するに従ってひずみの値に偏りが見受けられる．これは，上部岩盤ブロックが上方向よりも下方向，つまり重力方向にずれやすいため，ロックボルトに作用する軸ひずみが大きくなっていることを示している．各観測点における軸ひずみの最大値を比較すると，st2 つまり不連続面に最も近い軸ひずみが最大であ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が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している．軸ひずみの非対称的な応答に対して，考えられるもう一つの要

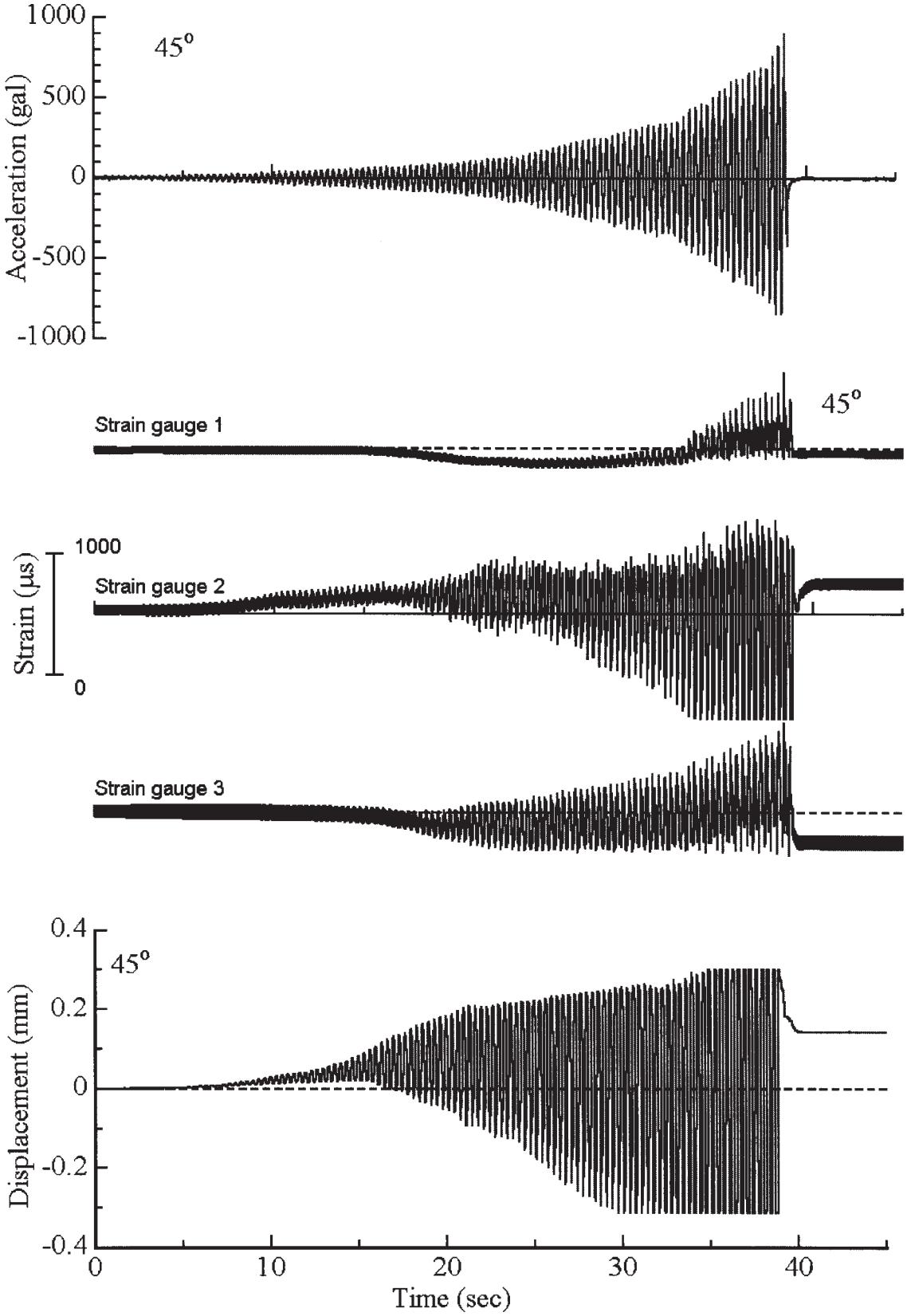

Figure 7 Responses of base acceleration, axial strains and displacement ($\theta = 45^\circ$)

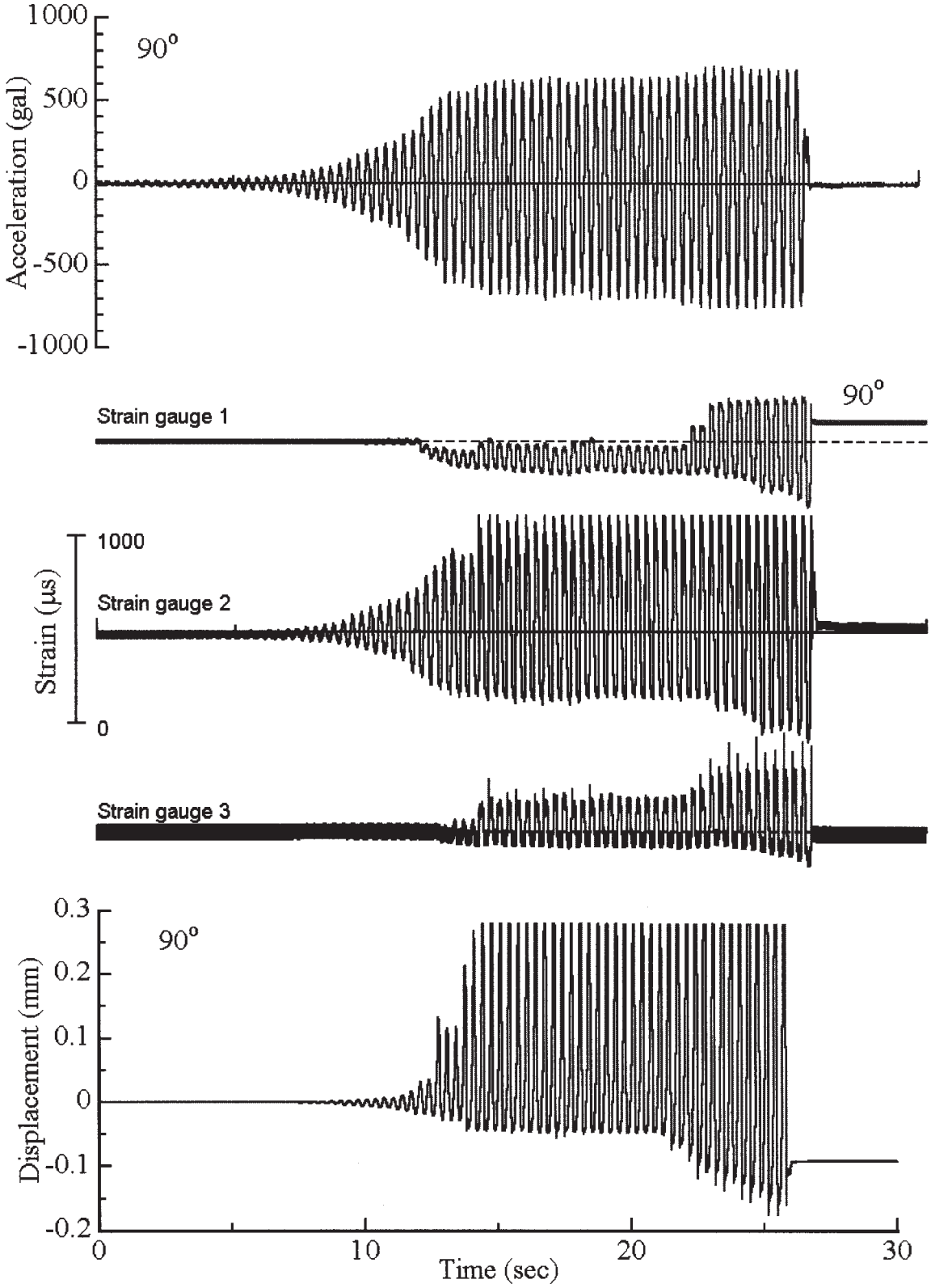

Figure 8 Responses of base acceleration, axial strains and displacement ($\theta = 90°$)

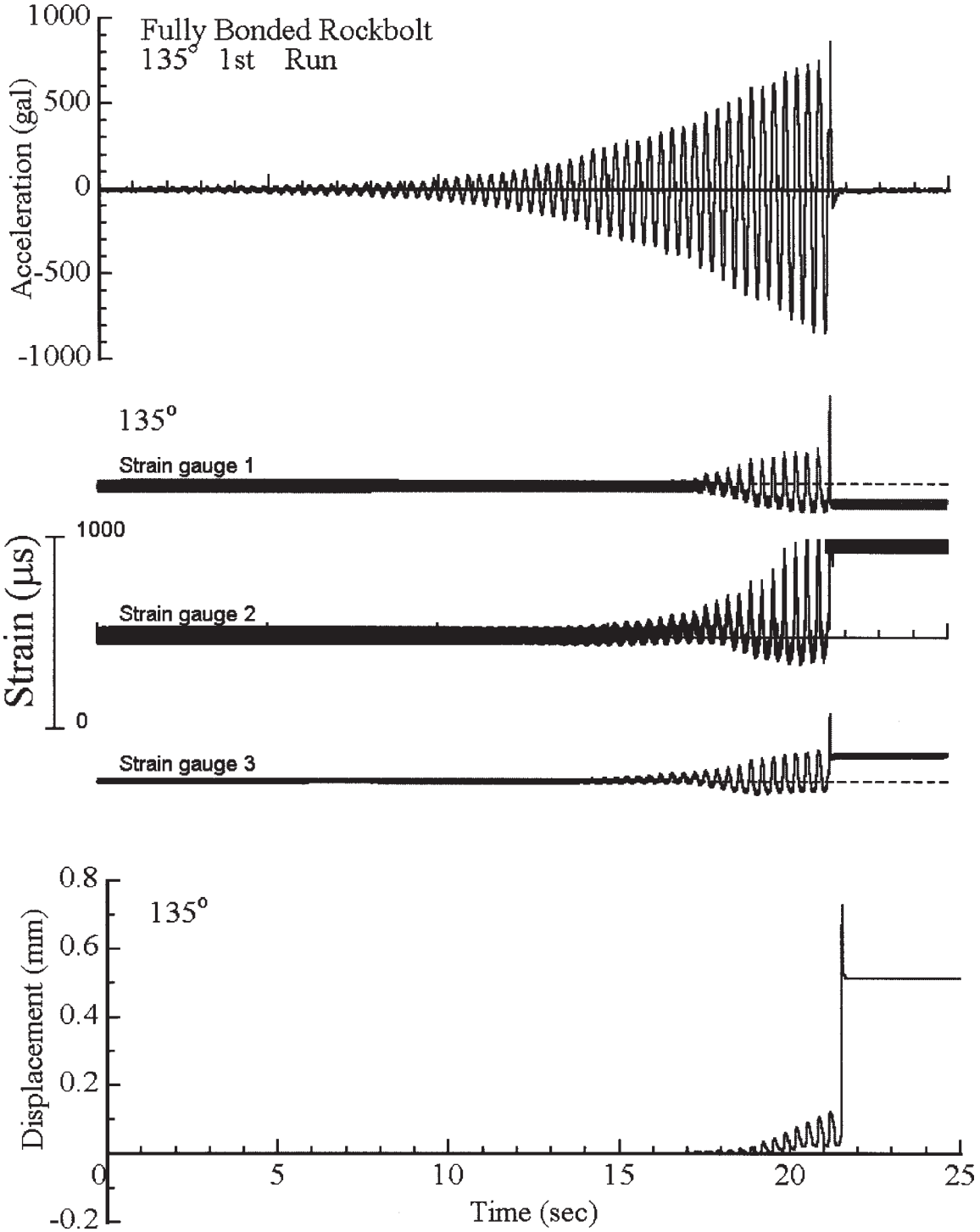

Figure 9 Responses of base acceleration, axial strains and displacement (θ=135°)

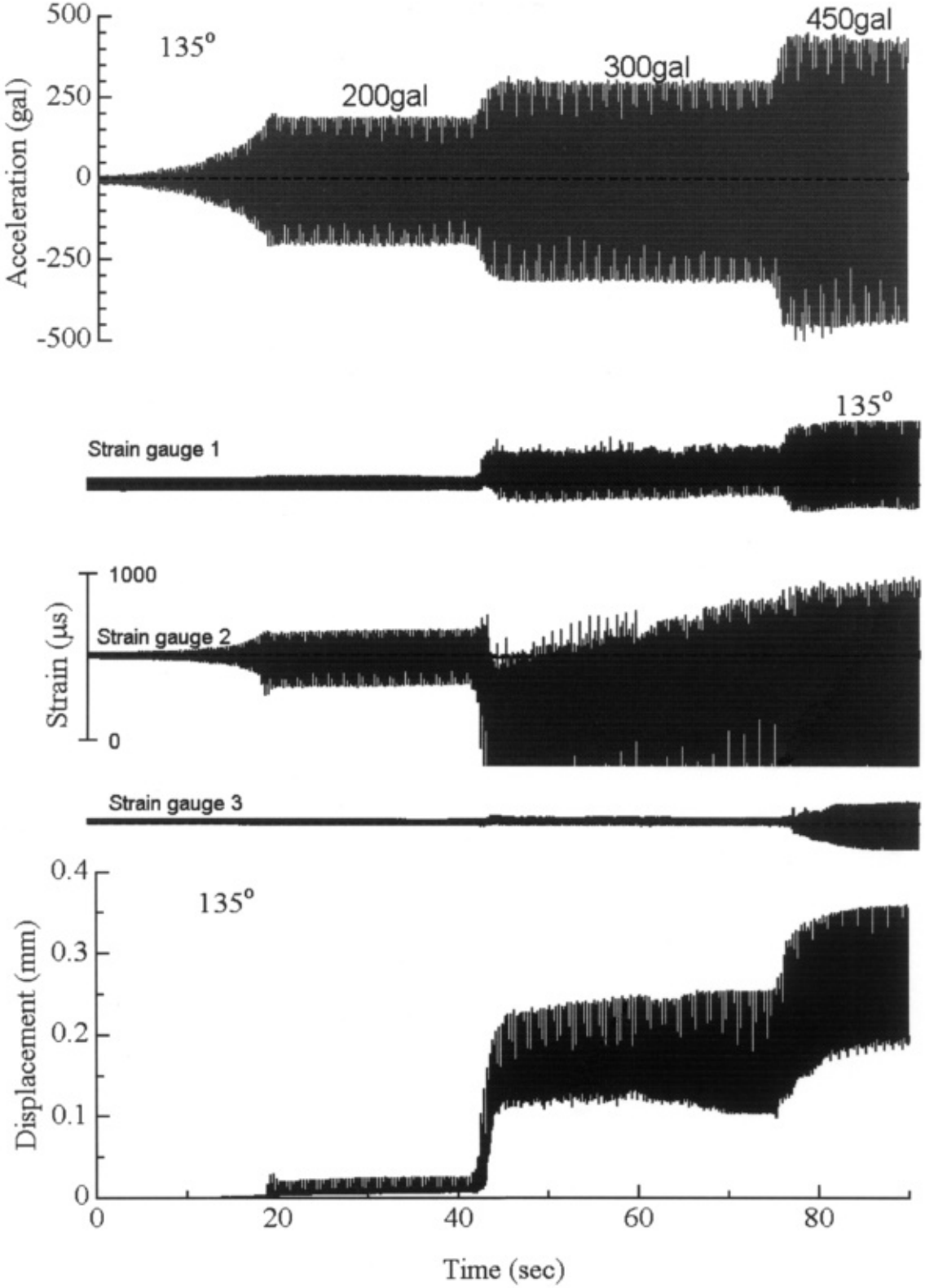

Figure 10 Responses of base acceleration, axial strains and displacement for step-wise increments of base acceleration（$\theta=135^{\circ}$）

因はロックボルトの挿入によって不安定な岩盤ブロックがロッキング運動しているためである．

最も特徴的なことは，振動を停止時点で初期値に比べてロックボルトの軸ひずみはある有限な値を示す．このことは岩盤ブロックのずれによって変位応答からもわかるように永久変形が発生していることによるものである．一般的に打設角度の変化によってロックボルト軸ひずみとせん断ひずみ値が変化する．例えば，軸ひずみは90°の場合最も小さく，せん断ひずみの値は最大になる．一方，打設角度の45°と135°の場合，せん断ひずみは小さく，軸ひずみが大きくなる．ブロックがずれる際に，軸ひずみの性質は45°と135°の場合圧縮から引っ張りに転じる．

次に打設角度$\theta=135°$の場合で震動台の加速度を段階的に増大して行った実験結果をFigure 10に示す．岩盤ブロック変位，ボルトの軸ひずみともに震動台の加速度の増加に伴ってその値が大きくなっていくことが見受けられ，振動台の加速度が一定に落ち着くと岩盤ブロック変位，ボルトの軸ひずみを収束してゆく．また，発生する軸ひずみの値は非対称である．これは先述したように上部岩盤ブロックの滑らす力は加速度の採用方向によって異なるためである．ここで見られた傾向は，ロックアンカーの支保条件を両端固定型としたモデルの振動実験で得られた結果と同様である（大和田ら，2005）．

この節で紹介した全ての打設角度において不連続面付近の軸ひずみが最大となっていることが明確である．また，実験結果のグラフにおいて一部計測許容範囲を超えてしまった部分が発生してしまったが本質的な実験結果には影響されないと考えられる．これらの結果から，不連続面を補強しているロックボルトの破断を考えた場合，最も破断しやすい箇所は不連続面付近であることが明らかになった．

4．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，全面付着型のロックボルトで補強した不連続性岩盤モデルを作成し振動実験を行った．各観測点における軸ひずみの最大値を比較すると，不連続面に最も近い軸ひずみが最大であり不連続面から離れるとその値が小さくなっており，不連続面から同距離における軸ひずみはほぼ同様な値を示した．全体的な軸ひずみの応答を見ると，軸ひずみは加速度の振幅が上昇するに従ってその値に偏りが見受けられ，非対称的な挙動を示す．これは，上部岩盤ブロックが上方向よりも下方向，つまり重力方向にずれやすいため，ロックボルトに作用する軸ひずみが大きくなっていることを示している．不連続面を補強しているロックボルトの破断を考えた場合，最も破断しやすい箇所は不連続面付近である．

今回の実験により以上のような結果が得られ，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計測し，それに伴い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．この結果は，既設の地下発電所などで発生しているロックボルトやロックアンカーの破断する要因を説明する上で重要な情報になりうる．また，この結果は，岩盤構造物の供用年数を延ばす上でその補修計画と方法論に関して貴重な基礎データとなる．

謝　辞

本研究を行うにあたり，アイダン研究室の大学院生，卒業生の皆様には実験などで多大なご協力を頂き厚く御礼を申し上げます．

参考文献

Aydan, Ö. (1989): The stabilisation of rock engineering structures by rockbolts. 名古屋大学博士論文, 204p.

大和田洋一，大洞光央，アイダン・オメル（2005）：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．第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，519-524．

要　旨

現在，岩盤構造物の維持・管理計画を立てるために岩盤構造物に対する長期的な安定性の評価が必要とされている．今回，地下発電所などに代表される岩盤構造物に対し長期安定性に影響を与えると考えられる因子の一つとして，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に着目した．岩盤構造物に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盤内に掘削された空洞周辺で岩盤ブロックの滑り・落下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．しかし，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い．そこで，本研究において全面付着型ロックボルト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．その結果，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が計測でき，それに伴い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した．この結果は，既設の地下発電所などで発生しているロックボルトやロックアンカーの破断する要因を説明する上で貴重な情報に成り得る．