

トンネル坑口上部に存在する岩塊の安定性評価

Stability Evaluation of the Rock Blocks Existing in the Upper Part of Tunnel Entrance

山内 淑人¹・蔣 宇静²・棚橋 由彦²

Yoshito Yamauchi, Yujing Jiang and Yoshihiko Tanabashi

¹正会員 工修 財団法人 地域地盤環境研究所 九州地盤環境研究所 (〒810-0074 福岡市中央区大手門3-5-1)

E-mail: yamauchi@jkyushu.geor.or.jp

²正会員 工博 長崎大学工学部 環境システム工学系 社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

On the occasion of the stability evaluation to the unstable rock blocks in rock cliff which exist in the upper part of a tunnel entrance, many judgments based on the displacement behavior of the rock blocks are made. It is known that the time from the generation of the displacement to the collapse of the rock block is very short. Therefore, it is hard to catch a sign of collapse. The authors measured the dynamic characteristic of the rock blocks by the seismometers as well as the vertical displacement measurement of the rock blocks by the displacement meters. As a result, it was confirmed that the dynamic characteristics of the rock blocks change before the displacement occurs.

Key Words: stability evaluation, rock block, dynamic characteristics, collapse, crack

1. はじめに

急傾斜を有する岩盤斜面に存在するオーバーハング状の岩塊の崩壊は、滑落（滑動や崩落）によるものが多い。1996年2月10日に発生した北海道豊浜トンネル崩落事故では、トンネル上部に存在した巨大な岩塊が滑落し、トンネル覆工を貫き、走行中の自家用車とバスを直撃し、20名の尊い命が失われた。

この事故以後、道路トンネルにおける斜面点検が行われ、早期に対策を図る必要のある箇所が56,700ヶ所、また日常点検や定期点検により管理する必要がある監視強化箇所が145,500ヶ所も存在することが判明している¹⁾。これらの危険と判断された岩塊に対して、変位に基づいた岩塊の安定性評価が通常行われている²⁾。しかし、変位の発生から岩塊の滑落までの時間が短いことから、十分に安全を確保されているとは言い難い。従って、変位に変わる定量的な安定性評価手法の確立が必要とされている。

オーバーハング状の岩塊の滑落は、岩盤斜面と岩塊を固着している部分における亀裂状態の変化によって発生する。

本研究では、岩盤斜面と岩塊を固着している部分の亀裂状態変化が、岩塊の動的特性に変化を与える可能性があると考えた。そこで、トンネル坑口の安全確保のための岩盤斜面切取工事に際し、工事開始前から岩塊滑落までの期間において、変位計による岩塊の鉛直変位に加えて、地震計を用いた岩塊の動的

挙動のモニタリングを実施し、人工的ではあるが滑落直前までの岩塊の動的特性を評価した。

2. 研究対象の岩塊の概要

対象となる岩塊を有する斜面は、Fig.1に示すように錦江湾奥部の始良カルデラを構成する上野原台地の西端部に位置する。建設予定の道路トンネルは、この斜面の直下にその坑口が計画されていた。

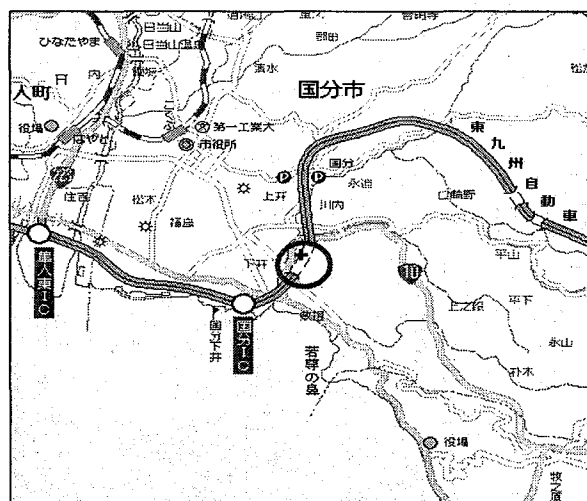


Fig.1 Construction Site

トンネル坑口上部に存在する岩盤斜面は、柱状節理が発達した安山岩で構成されており、高低差50m・傾斜角70°以上である。また、Fig.2に見られ

るように、多数の亀裂で、数 10～数 100 トンの岩塊に分割されており、さらに岩塊の下部には、過去における滑落跡が存在し、岩塊自体は、オーバーハングを呈している。

当初計画時点では、景観維持に配慮し現状を保持したままトンネルを施工する予定であった。しかし、北海道豊浜トンネルでの崩落事故を契機に、全国においてトンネル坑口部に対する点検が行われ、当現場のトンネル坑口部においても供用後の安全管理上問題があるとして、崖面を 1 : 0.5 の勾配で切り取り、安定形状とする計画に変更となった。Fig. 2 中に切り取状況の概念図を示す。

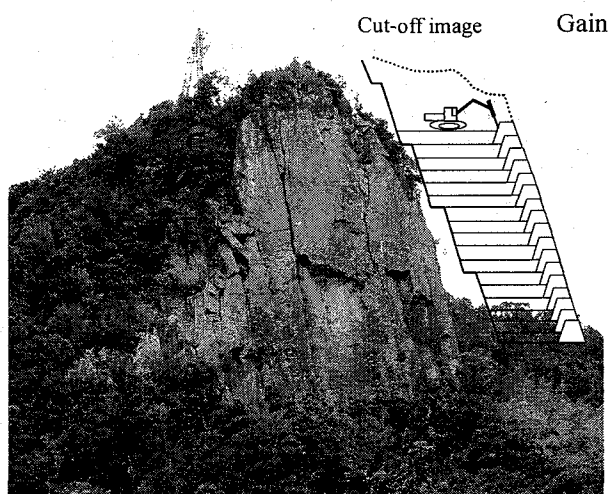


Fig.2 Condition of rock cliff and Cut-off image

切り取り工事は、油圧式くさび割岩機等を用いて実施され、切り取られた岩は、バケットに投入され、ゴンドラにより崖下部の処理場まで降ろされた。

3. 計測

岩塊の滑落は、岩塊と岩盤斜面を固着させている部分の変化によって発生する。つまり、何らかの外的な要因（例えば、工事や地震による振動や温度変化など）により、固着されている部分に微小な亀裂が発生する。この微小な亀裂が累積・伸長することにより、変位が発生し、岩塊は滑落するものと考えられる。Fig. 3 に滑落の発生イメージを示す。

計測に用いた変位計と地震計の仕様を Table 1, 2 また地震計の振動特性を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 において、横軸は Frequency (周波数: Hz) を示す。左側の縦軸は、Gain (利得) を示し、Frequency property (周波数特性) が 0.07 ~ 100 Hz の範囲で Gain (利得) ≈ 1 となり、発生している振動と同じものが、地震計で測定されることを示す。また、右側の縦軸は、Acceleration (加速度: gal) を示し、3 Hz までは、図中に示される一定の傾きを有した直線ま

だが、Measurement range (測定範囲) となり、3 Hz 以上では、2000 gal が測定限界であることを示している。

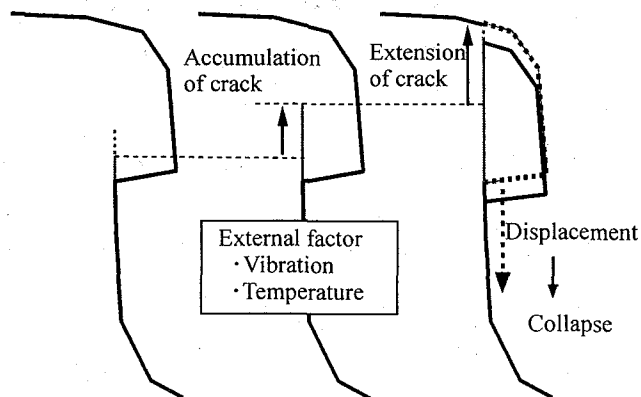


Fig.3 Image of collapse

Table 1 Characteristics of the displacement meters

Measurement range	10 mm
Resolution	0.01 mm
Tolerable temperature range	-10 ~ +60 °C

Table 2 Characteristics of the seismometers

Measurement	3 perpendicular components
Frequency characteristics	0.07 ~ 100 Hz
Size	165 × 175 × 108 mm
Weight	2 kg

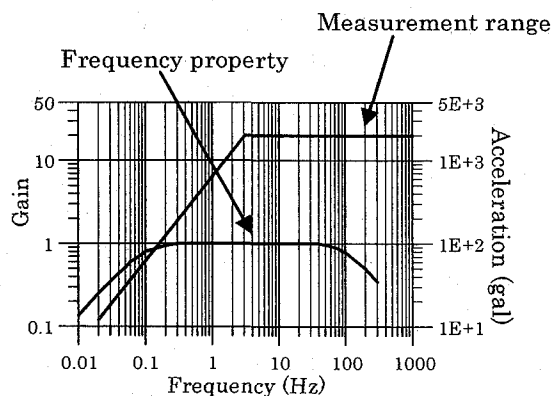


Fig.4 Dynamic property of seismometer

さらに計測が長期間にわたって実施されるため、変位に温度特性が影響することが懸念されたので、変位計設置位置近傍に、補正用の温度計を設置した。各計器の設置位置を Fig. 5 に示す。

高感度変位計は、工事開始前に実施された岩盤斜面の状態調査において、過去における滑落痕と考えられるオーバーハング部と岩塊背面における亀裂の存在から、定性的に不安定であると評価された 4 つ

の岩塊 (L1,L2,L3 及び L4) に設置した。変位計は、微小な変位の検出が必要とされたので、計測範囲 10mm, 測定精度 0.01mm を有する高感度変位計を用いた。また、3 成分地震計は、その 4 つの中でも、岩塊の大きさから、特に不安定であると評価された 2 つの岩塊 (Block-A,B) と、安定していると考えられる崖下部の基盤岩部の 3 ヶ所 (S1,S2 及び S3) に設置し、不安定岩塊と安定岩盤部の動的特性の比較を行った。

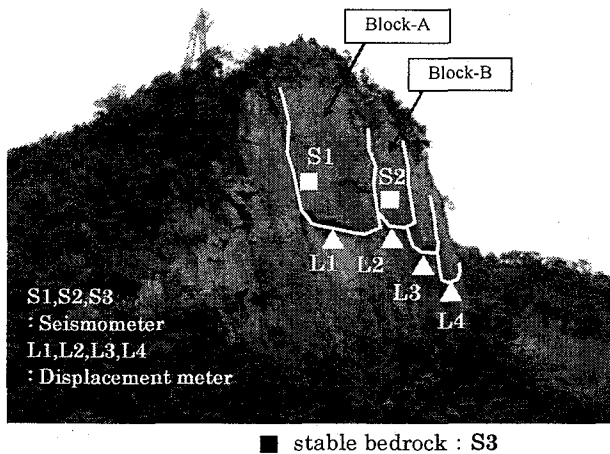


Fig.5 Position of the instruments

変位計と温度計の測定は、基本的には 10 分毎に実施したが、人工的な崩落時には 1 分毎に変更して詳細な変化状況のモニタリングを行った。

3 成分地震計は、ケーブルで接続された崖上部計測中継室の専用データ収録器により計測を管理した。測定されたデータは、NTT 通信回線を用いて現場事務所の地震計管理コンピュータに転送した。

地震計の測定は、基本的には 1 時間毎に 60 秒間を 100 Hz のサンプリング間隔で実施した。

計測は、1999 年 9 月から 12 月を、工事開始に先立つ事前計測期間として実施し、変位と温度の関係を評価した。この温度特性の評価結果に基づいて、2000 年 1 月から 12 月までの期間における、工事施工に伴う岩塊挙動の測定を行った。

4. 計測結果

今回の計測の特徴は、主として以下の 3 点である。

- ・変位と動的特性の計測を同時に実施したこと。
- ・動的特性において、安定岩塊と不安定岩塊の比較を行ったこと。
- ・工事開始前から人工的な滑落直前までの期間の測定を実施したことにより、工事による外的な要因の付加に伴う、岩盤挙動の変化状況を測定したこと。

以下に岩塊の鉛直変位測定結果と動的特性測定結果について述べる。

4.1 岩塊の鉛直変位測定結果

Fig.6 に、2000 年 1 月から 12 月までの、L1,L2,L3 及び L4 における岩塊鉛直変位の測定結果と切取高さとの離隔を示す。

230 日目までは特に目立った変化を生じていないが、230 日目以降では、L1 の変位に変化が生じ始めた。それぞれの岩塊は、切取高さの接近により急速に変位が増大し、その後も岩塊の沈下傾向が続いたため、危険であると判断し、油圧ブレーカーを用いて、人工的に崩落させた。(Fig.7 参照)

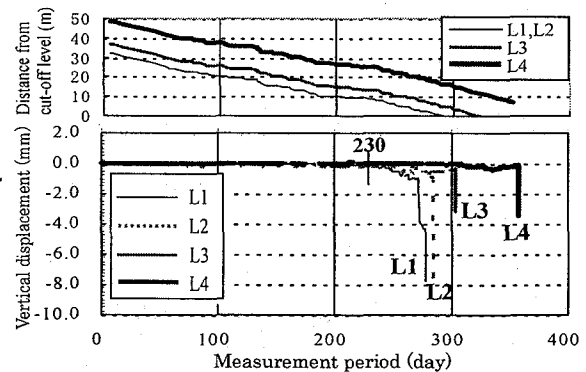


Fig.6 Changes of the vertical displacements in each displacement meter

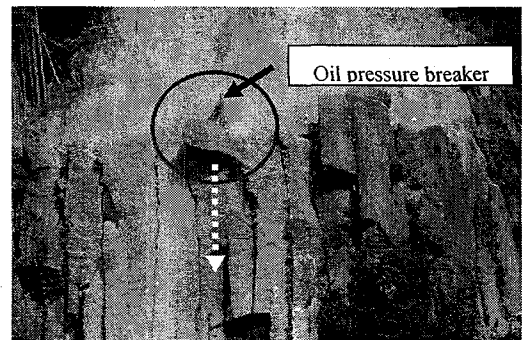


Fig.7 Artificial collapse by oil pressure breaker

4.2 岩塊の動的挙動測定結果

3 成分地震計による S1,S2 及び S3 における測定波形 (加速度) をそれぞれ Fig.8 (a,b,c) に示す。地震計では、Fig.9 に示す 3 つの直交する方向の測定を実施した。

測定は、1 時間毎に実施したが、昼間の測定データは、切取工事施工に伴う振動が発生するため、今回の評価に用いたデータは、午前 0 時における測定データのみを採用した。図に示す測定データは、工事開始前に測定されたものである。

今回の研究では、常時微動を計測している。この常時微動は、地盤中を伝播する人工的または自然現象による種々の振動によって発生する微小な地盤振動である。Fig.8 (a,b,c) から、崖部のふもと (安定岩塊部: S3) で観測された波形と類似した波が、崖上部の不安定岩塊部 (S1,S2) においても観測されていることがわかる。

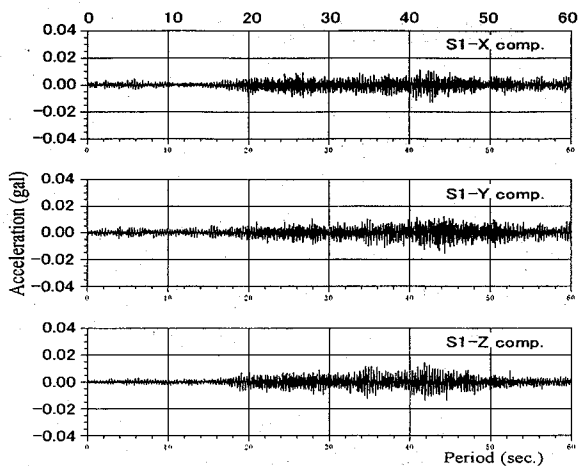


Fig.8(a) Seismic waves measured at S1

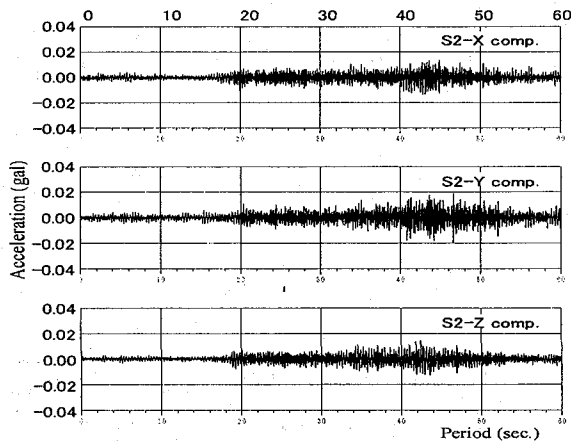


Fig.8(b) Seismic waves measured at S2

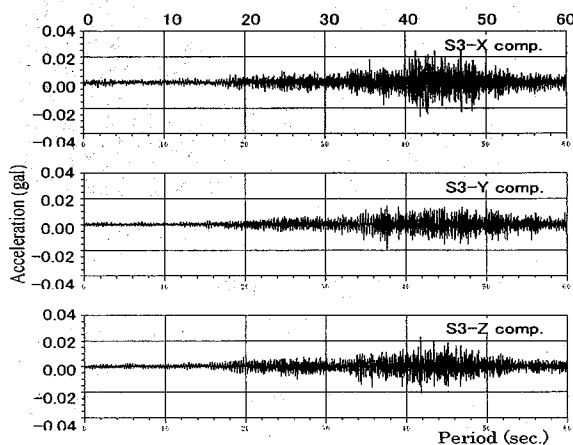


Fig.8(c) Seismic waves measured at S3

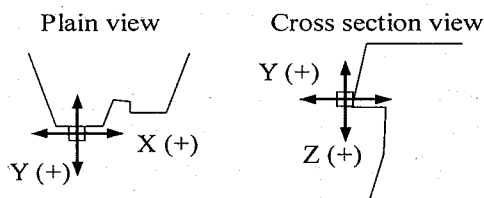


Fig.9 Measured components

このことは、本研究での安定岩盤部 (S3) と不安定岩塊部 (S1,S2) における動的特性を比較すること

において、必要な条件である同じ振動の捕捉を満足していることを示している。

桜島の火山活動研究センターの観測結果から、火山性ガスや溶岩の流動に伴う振動が C 型微動と呼ばれ、Fig.10 に示すような紡錘形であることが知られている。今回の計測地点が、鹿児島県錦江湾奥部であり、約 5km 離れた錦江湾内で、火山性ガスが常時海底から噴出している場所が存在していることから、測定された波形も、この C 型微動を捉えたものと考えられる。

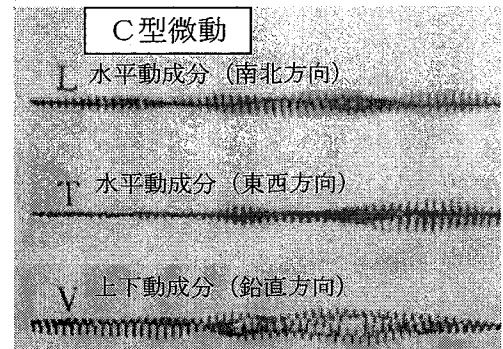


Fig.10 Example of C type tremor
(Sakurajima Volcano Research Center)

切取工事による振動等の外的要因により、岩塊と岩盤斜面を固着している部分の亀裂状態に変化が発生した場合、Fig.11 に示すような、ピーク周波数やフーリエスペクトル値に変化が発生するものと想定した。

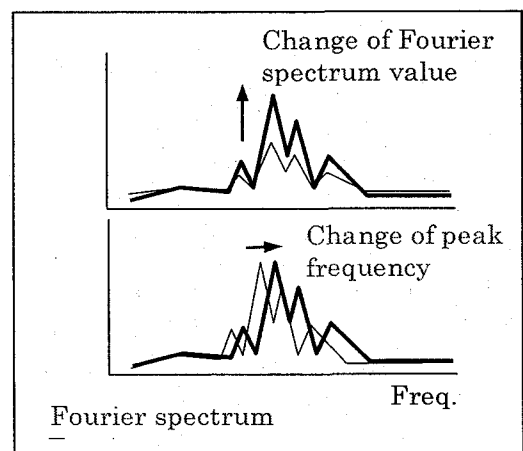


Fig.11 Idea of the change in the dynamic property

測定された加速度波形に対する、高速フーリエ変換(F.F.T.)による周波数特性の解析結果を Fig.12(a) : X 成分, Fig.12(b) : Y 成分及び Fig.12(c) : Z 成分に示す。

図中に示すように、工事開始前では、すべての測定データにおいて、3Hz 付近にピークが見られた。これは C 型微動のスペクトルが、基本周波数 (1~2Hz) とその整数倍にピークを有するために生じているものと考えられる。

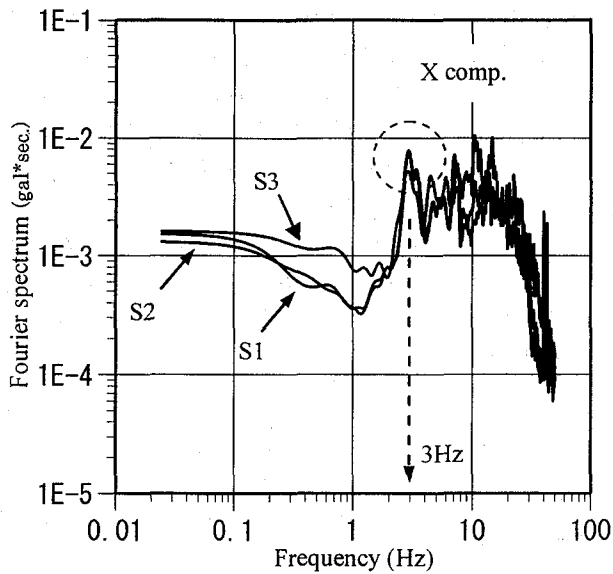


Fig.12(a) Results of F.F.T. (X comp.)

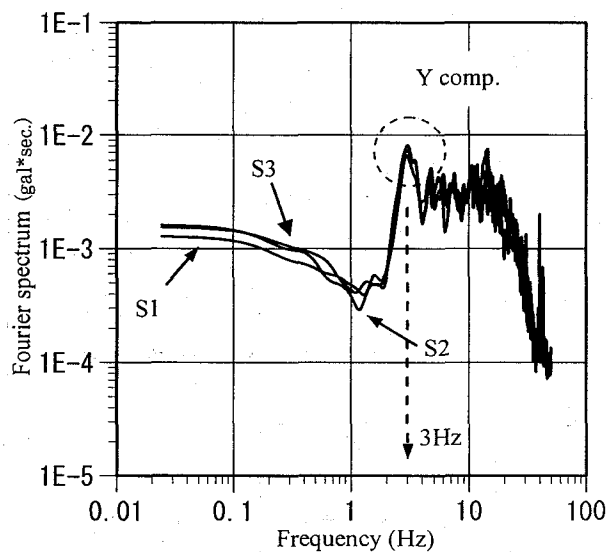


Fig.12(b) Results of F.F.T. (Y comp.)

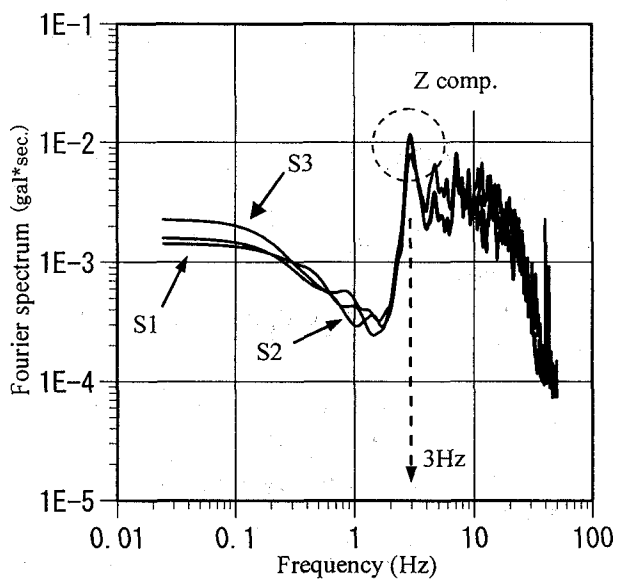


Fig.12(c) Results of F.F.T. (Z comp.)

今回の計測は、岩塊切取工事に際しての安全管理のために実施されているので、毎日の管理を行うことが必要である。従って、常時 S1,S2,S3 の X,Y,Z の3成分の計測結果でピークを有している3Hzに着目し、このピーク周波数が、切取工事に伴う亀裂状態の変化により、3Hz から変化するがどうかについて検討した。

次に、振幅特性に着目した結果を、Fig. 13(a, b, c, d)に示す。

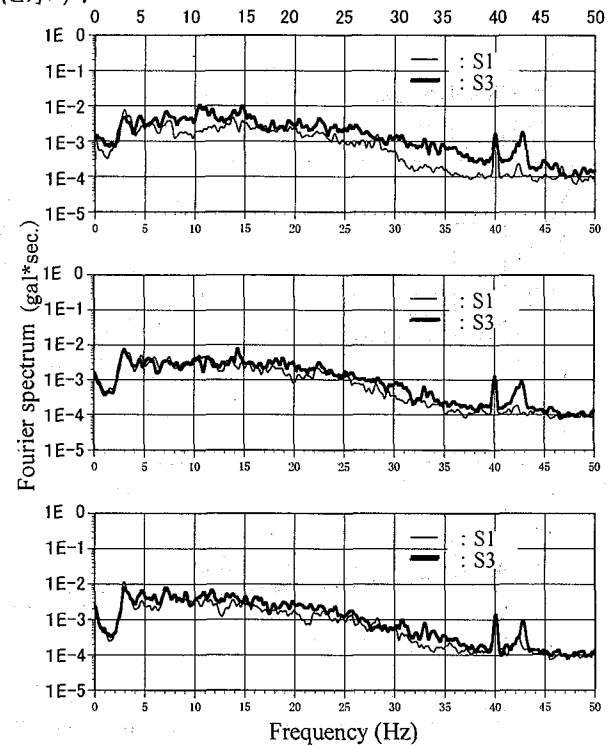


Fig. 13(a) Spectrum before construction start (S1,S3)

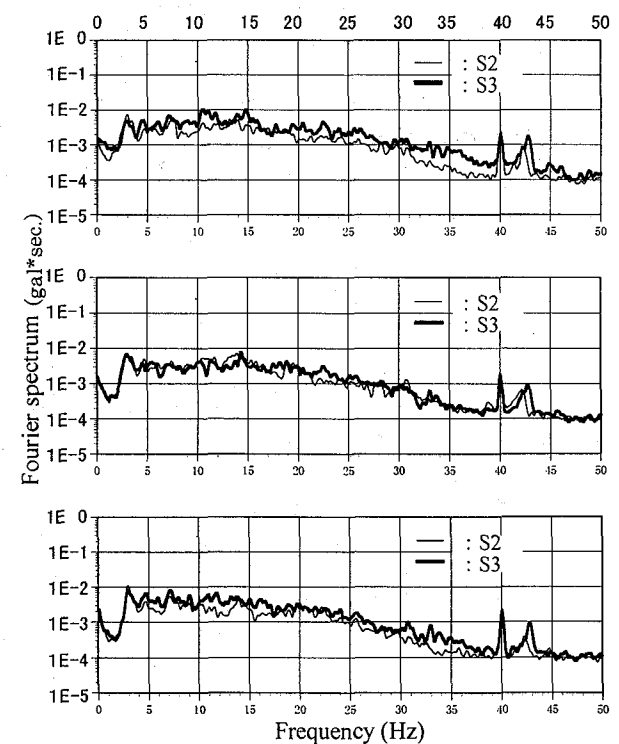


Fig. 13(b) Spectrum before construction start (S2,S3)

Fig. 13(a)と(b)は、それぞれ、工事開始前における各周波数に対する S1 と S3, S2 と S3 のフーリエスペクトル値を比較したものである。

工事開始前では、Fig. 13(a)と(b)に示されるように不安定岩塊(S1及びS2)のフーリエスペクトル値は、ほぼすべての周波数において、安定岩盤部(S3)の値に比べて小さいことがわかる。

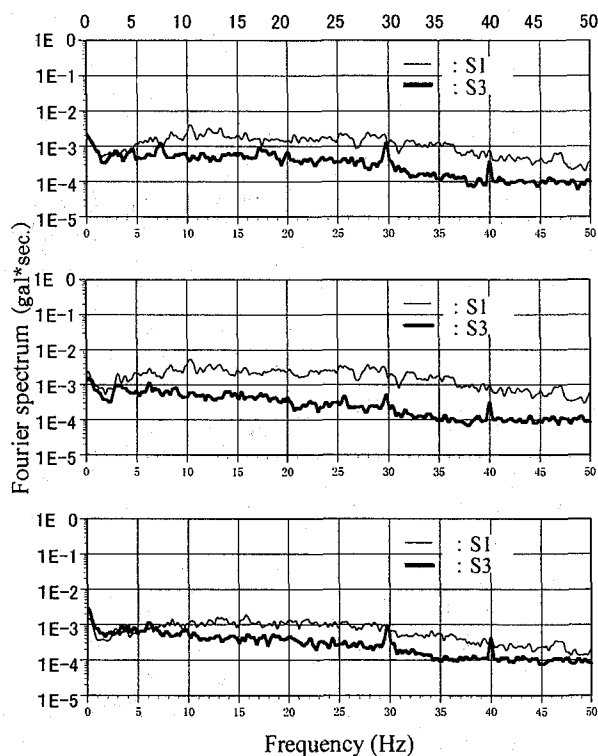


Fig. 13(c) Spectrum just before the collapse (S1,S3)

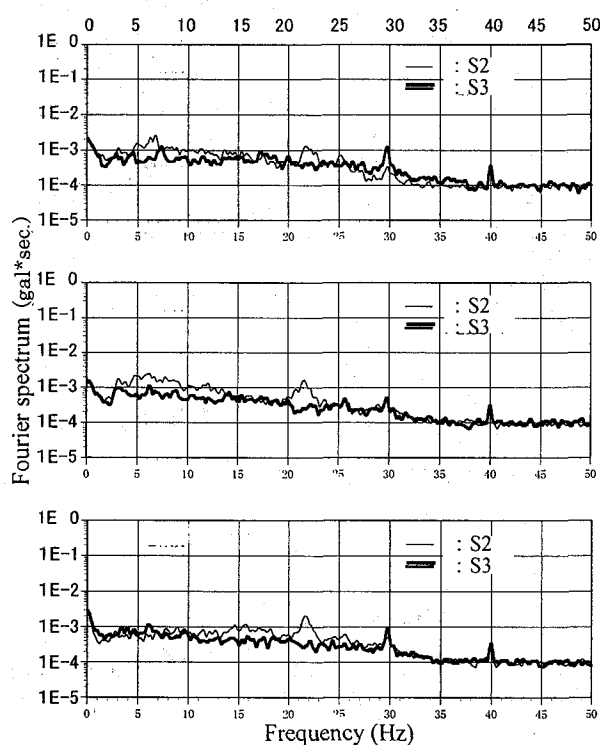


Fig. 13(d) Spectrum just before the collapse (S2,S3)

Fig. 13(c)と(d)は、それぞれ、人工的滑落直前における、各周波数に対する S1 と S3, S2 と S3 のフーリエスペクトル値を比較したものである。

人工的な岩塊滑落直前では、Fig. 13(c)と(d)に示すように、不安定岩塊(S1)では、ほぼすべての周波数において安定岩盤部(S3)の値より大きくなっており、また、不安定岩塊(S2)でも安定岩盤部(S3)の値よりも大きくなっているものが多いことから、S3 に入力した波が増幅されて S1 及び S2 に伝播していることが判明した³⁾。

5. 評価

測定結果から、周波数特性と振幅特性に着目した評価を実施した。

5.1 周波数特性評価結果

Fig. 14(a,b)に、S1 及び S2 で測定された加速度波形に現れている 3Hz 付近のピーク周波数の経時変化を示す。

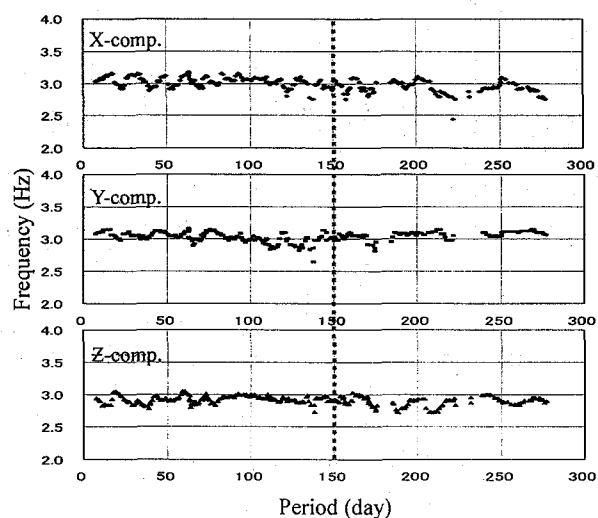


Fig. 14(a) Change of spectrum around 3Hz at S1

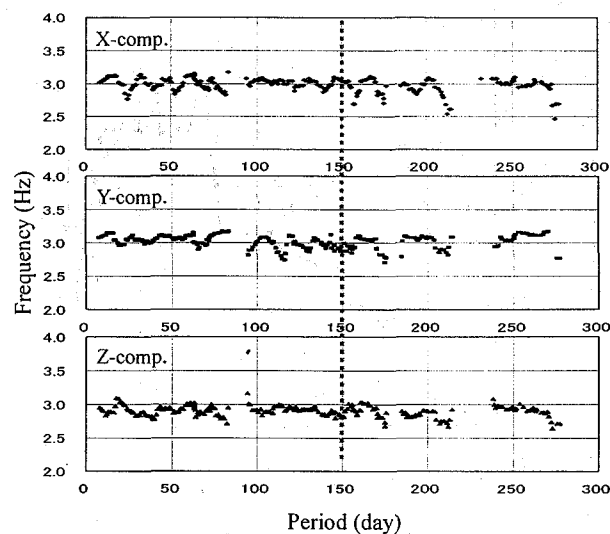


Fig. 14(b) Change of spectrum around 3Hz at S2

S1,S2 に現れている 3Hz のピーク周波数は, X,Y,Z の各成分とも, それぞれほぼ同様の分布をしている。両図において, 150 日目くらいから, データ分布に若干の違いがあるように見えるが, これらのデータには, 季節変動を含んでいるものと考えられるので, 特徴的な変化が生じているとは思えない。

5.2 振幅特性の評価

安定岩盤部 (S3) と不安定岩塊部 (S1 と S2) における振幅特性の比較を行うにあたって, Fig. 15 に示すように, 各周波数におけるフーリエスペクトル値の差の総和 (FStotal) を考えた。FStotal は, 以下の式で定義される。

$$FStotal = \sum^{50Hz} \{FS_{S1,S2}(Hz) - FS_{S3}(Hz)\}$$

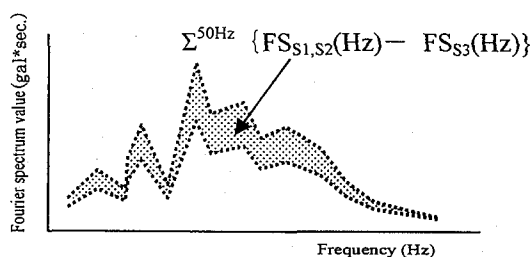


Fig. 15 Image of comparison of the amplitude characteristic

サンプリング周波数が 100Hz の波形に対して, 高速フーリエ変換を行った場合, 変換後の周波数領域のデータは 50Hz を境にして左右対称となるので, 50Hz までの解析結果を用いた。

岩塊の動的特性の変化を考えた場合, 岩塊自体のゆれが変わることが想定でき, この場合に岩塊での測定波形のフーリエスペクトル値に変化が生じるものと考えた。また, どの周波数に変化が生じるかについては特定できないため, すべての周波数のフーリエスペクトルについて, 不安定岩塊部と安定岩盤部の差をとり, それらを総和することにより, 岩塊部固有のエネルギーとみなし, このエネルギーの変化が, 岩塊自体のゆれの変化であると考えた。

測定が長期にわたる場合, 季節変動についても考慮する必要がある。この季節変動は, 不安定岩塊部と安定岩盤部との差として評価することにより, 除去することができる。

Fig. 16(a,b)に, S1 及び S2 で測定された加速度波形から算出された, 各周波数におけるフーリエスペクトル値の差の総和 FStotal(S1) と FStotal(S2)の経時変化を示す。これらの経時変化は, X,Y,Z 成分とも 150 日目までは, 若干の変動を生じているがほぼ 0 付近で分布する傾向を示している。しかし, 150 日以降において, すべての成分で, 右上がりの傾向を有していることが判明した。このことにより, 鉛直変位の変化に比べて 80 日先立って, 動的特性が変化

していることがわかる。

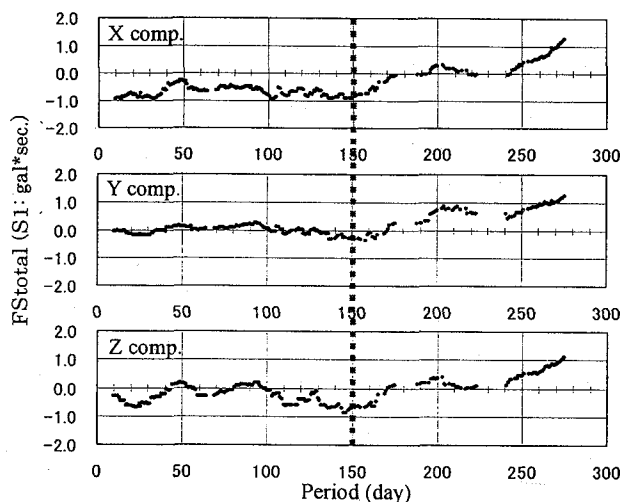


Fig.16(a) Change in the total of the difference of the Fourier spectrum values of S1 and S3

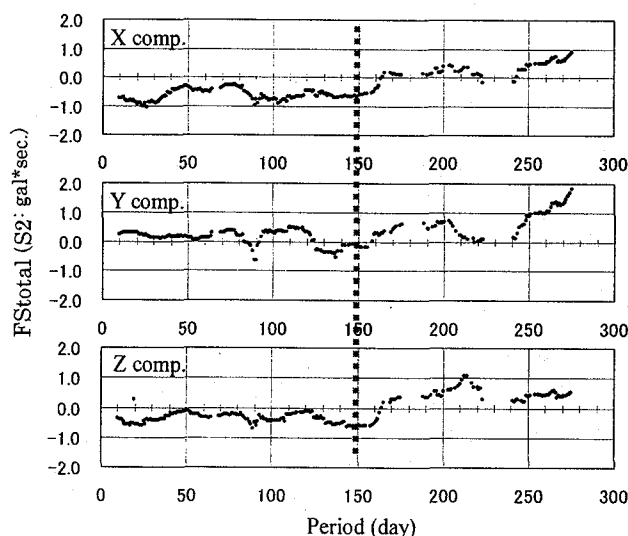


Fig.16(b) Change in the total of the difference of the Fourier spectrum values of S2 and S3

図中に見られるデータの欠測は, 小落石による断線等によるものである。

Fig. 16 から次のことが推定できる。岩塊と岩盤斜面が固着し, 1つのブロックと考えられる場合, 岩盤部と岩塊部において同じような振動が測定されるはずである。この場合, FStotal の値は, ほぼ 0 程度となる。これが, 150 日目までの状況を示しているものと考えられる。しかし, 切取工事により岩塊と岩盤部を固着している部分が次第に減少するにつれて, 岩塊は不安定になり, 岩盤部と岩塊のゆれには差が生じるはずである。150 日目以降の変化がこの状況を示している。

今回の研究においては, 亀裂の伸長に相当すると考えられる, 切取工事による岩盤部と岩塊部の固着状況の変化により, 岩塊部のゆれが大きくなることが確認された。

6. まとめと今後の課題

トンネル坑口上部に存在する不安定岩塊撤去のための岩盤斜面切取工事に際し、動的特性に着目した岩塊の計測を、工事開始前から人工的滑落直前まで実施した。一般的には、不安定と評価されている岩塊への挙動計測は実施されているが、実際に滑落にいたるまでのデータは得られていないことが多い。今回の研究では、人工的であるが、滑落までのデータを得ることができた。

この計測の特徴は、定性的に不安定と評価された岩塊であったが、結果的には150日目まで、ほぼ安定した状態を示していたことから、安定状態から切取工事によって生じた不安定状態までの、岩塊の挙動が測定できたことにある。

今回、岩塊の変位測定に加えて、岩塊自体の動的特性に着目した計測を実施した結果、以下のことが判明した。

- 1) 定性的な手法で不安定と評価された岩塊でも、実際には安定している場合があることが判明した。(切取工事を行っているにも係わらず、0.01mmの感度をもつ変位計に230日目まで、ほとんど変化が生じていない。)
- 2) 安定状態から不安定状態への変化状況が確認できた。
- 3) 変位発生に先立って、岩塊の動的特性に変化が生じることが判明した。今回の計測においては、変位発生約80日前に動的特性に変化が発生した。このことは、岩塊滑落の前兆現象を捉えたものと考えられる。
- 4) 動的特性の変化は、振幅特性において、より顕著な変化が発生していることが確認できた。

これらの結果から、岩塊の安定性を評価する1つの基準として、今回提案した各周波数におけるフーリエスペクトル値の差の総和(FStotal)

$$FStotal = \sum^{50Hz} \{FS_{\text{不安定部}}(Hz) - FS_{\text{安定部}}(Hz)\}$$

を用いた管理区分が考えられる。

本研究では、岩塊の定量的な安定性評価において

$FStotal \leq 0$: 安定

$FStotal > 0$: 不安定

と判定した。しかし、このような計測事例が少ないことから今後、効率的かつ経済的な計測計器及びシステムの開発を行い、このような計測への適用性の拡大を図る必要がある。

また、岩塊を岩盤と固着させている部分における

亀裂状態の変化を考慮した動的解析を実施し、動的特性の変化と亀裂状態の関係を明らかにすることにより、岩塊滑落のメカニズムの解明を行い、動的特性を用いた岩塊の安定性評価手法の確立への足がかりとしたい。

謝辞：今回の計測を行うに際して、新手法での計測管理を認めていただいた西日本高速道路株式会社九州支社(旧 日本道路公団 九州支社)の担当者の方々に厚く御礼申し上げます。また、計器設置・測定に際して鉄建建設株式会社九州支店ならびに徳倉建設株式会社の現場担当の方々を始め、多くの方々にご協力いただきました。また、動的特性の解析に際して、本財団の香川敬生氏、宮腰 研氏及び赤澤隆志氏からご助言をいただきました。心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1)国土交通省：平成8年度 道路防災総点検,1996
- 2)例えば櫻井春輔，川嶋幾夫，大谷達彦，松村真一郎：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文 No.493/III-27,pp.185-188, 1994
- 3)Y. Yamauchi, Y. Jiang and Y. Tanabashi: Measurement of the Dynamic Behavior of Unstable Rock Block Existing in the Rock Cliff, Proc. Of the 4th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS 2006 Singapore), Singapore, CD-ROM, No.296 (8P), Nov. 2006.