

非破壊探査法によるキーブロックの安定性評価システムに関する基礎的研究

A FUNDAMENTAL RESEARCH ON THE ASSESSMENT SYSTEM OF KEYBLOCK STABILITY BY USING NON-DESTRUCTIVE TESTING METHOD

永井哲夫*・孫 建生*・塩月隆久**・池尻 健***

Tetsuo NAGAI, Jian-Sheng SUN, Takahisa SHIOTSUKI, Takeshi IKEJIRI

Block Theory is available to estimate the position and scale of keyblocks in rock masses and evaluate their stability for supporting to protect surrounding rock mass from progressive failure. However, in engineering practice, it is not enough for engineers to evaluate them by utilizing Block Theory because of lack of accuracy for geometrical data.

In order to solve this problem, the authors propose the assessment system of keyblock stability by using non-destructive testing method. In this paper, we demonstrate its applicability to rock engineering based on the results of two model tests. Consequently, it is quite effective to keyblock stability problems.

Keywords : keyblock, non-destructive testing method, stability assessment, block size, model test

1. はじめに

節理や亀裂などの不連続面を有する岩盤において斜面や空洞を掘削する場合、掘削面に露出している1つの岩塊が自由面に移動して、岩盤の大きな崩落現象を誘発することがある。このような岩塊はキーブロックと呼ばれ、調査・試験により得られる不連続面の幾何学および力学的データをもとにそれを見つけ出し、安定させるために必要な支持力の大きさおよび方向を決定する方法(ブロック理論)が提唱されている¹⁾。そして、その実用化を目的として、不連続面に関する調査データの処理からキーブロックの有無の判定および安定化に必要な支持力の検討まで一連の手順がコンピュータを援用してシステム化されている(キーブロックシステム)²⁾。ところが、実務への適用を考えると、不連続面の幾何学的データに関する調査技術が十分に確立されていないことから、このような優れた理論を持ってしても十分な評価は難しいのが現状である。

そこで著者らは、以上のような間接的評価法の問題点を補うため、独自に構築した新しい非破壊探査システムにより、キーブロックの形状および寸法の推定からキーブロックとその周辺岩盤との境界面の力学特性の評価までを直接的に行う方法を検討している³⁾。本文では、岩塊や塊状コンクリートなどを対象として、その形状および寸法の推定に関する基礎的な実験を実施し、本方法の有効性ならびに将来性について考察を行う。

*	正会員	博士(学術)	(株)青木建設	研究所	土木研究室
**	正会員	博士(工学)	(株)青木建設	研究所	土木研究室
***	正会員		(株)青木建設	研究所	土木研究室

2. 問題の設定

本研究で対象とするのは、図-1に示すようにキーブロックが自由面側に移動することにより、その周辺岩盤の安定性が損なわれる場合である。つまり、岩塊①がすべり破壊することにより、岩塊②および岩塊③がつぎつぎとすべりや回転を生じながら崩落し（複合破壊モードを呈し）、破壊が周辺岩盤へと進んでいく。このような進行性破壊は、キーブロックに対して支保を施すなどの安定化対策を講じることにより防ぐことができると考えられる。

以上のことから、このような進行性破壊を呈する岩盤の安定性を評価し、必要に応じて適切な対策工を施すためには、次に示すような2つの問題を何らかの方法で解決しなければならないことが分かる。

「キーブロックの形状および寸法的確な把握」

「キーブロックと周辺岩盤との境界面の力学特性に対する的確な評価」

前述のブロック理論は、おもに前者に関して数学的手法の“位相幾何学”および“集合論”などを駆使することにより、その問題の解決を試みるものである。この方法では、入力データとなる不連続面の幾何学的情報の精度がその解析結果を左右するにもかかわらず、現状の調査技術では十分なデータを得ることが困難であるため、実務への適用においては十分な評価は難しい。

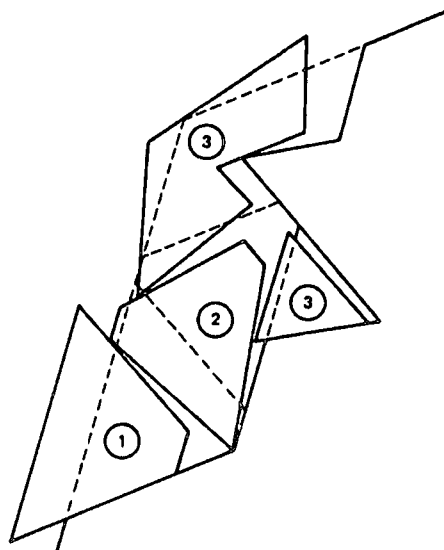


図-1 岩盤の進行性破壊¹⁾

3. 本研究のアプローチ

本研究では、前述の2つの問題の中で前者に関する検討を行う。ここでは、簡単のために図-2に示すような2次元の岩盤斜面におけるキーブロック ($\Delta R_1R_2R_3$) を対象に本研究のアプローチについて説明する。

いま、問題は $\Delta R_1R_2R_3$ の形状および寸法を求めるということになるが、点 R_1 および点 R_2 に関しては自由面に現れる不連続面のトレースとして把握することが可能であることから、岩盤内の辺 R_1R_3 および辺 R_2R_3 の位置および長さを求めるという問題に帰着する。それに対して本研究では、自由面に設置した測点 P_i を基点とするベクトル P_iQ_{ij} について、それぞれの大きさおよび方向を求めることにより点 Q_{ij} の各位置を推定し、さらには各辺の位置および長さを求めるという方法を考えている。

そこで、このような考え方を実現させる有効な手段として非破壊探査法が挙げられる。これには、音速、放射線、電磁波および磁気などを利用する種々の方法⁴⁾がある。

本研究では、著者らが衝撃弾性波の高周波成分の伝播特性を利用して構築した独自の非破壊探査システムをもとに、キーブロックの形状および寸法のよりの確な把握が可能かどうかを実験的に検討する。

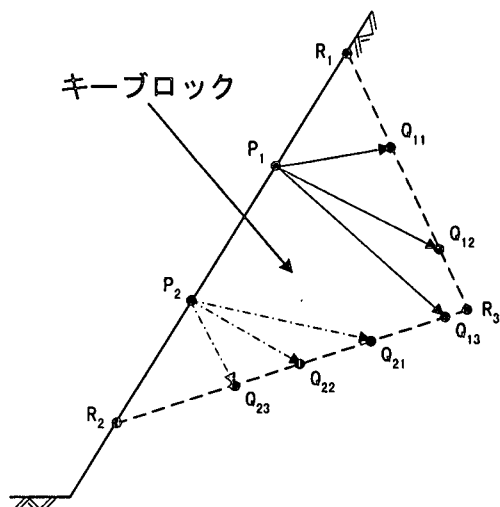


図-2 本研究のアプローチの概念図

4. 非破壊探査システム

本研究で用いた非破壊探査システムは、図-3に示すように衝撃を与える起振部とAEセンサ、プリ・アンプ、メイン・アンプおよびオシロスコープから成る受振部により構成されている。

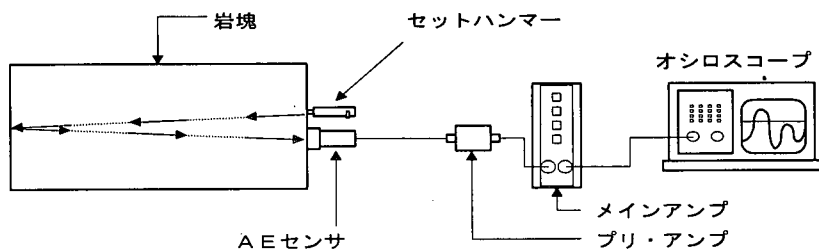


図-3 本研究で用いた非破壊探査システムおよび測定原理の概念図

本システムの特徴として、従来の衝撃弾性波探査システムよりも高周波の成分を受振できるようにするため、AEセンサを用いて受振した波形にHPF (High Pass Filter) 処理を施していることが挙げられる。これにより、図-4に示すように構造物の端部における反射波を明確に再現性を持って捉えることができるようになっている。この図では、比較のために従来のシステムによる探査結果を合わせて示してある。この比較実験では、AEセンサまたは2種類の加速度センサによりそれぞれ受振を行い、コンクリート製アーチリブモデル ($2.0 \times 0.5 \times 2.0\text{m}$) の寸法を推定している。なお、加速度センサを用いた場合は受振した波形にフィルター処理を施していない。これらの実験結果から、本システムによると端部における反射波を明確に受振でき、構造物の寸法を的確に推定できること、従来のシステムではこれらのことがほとんどできないことが分かる。

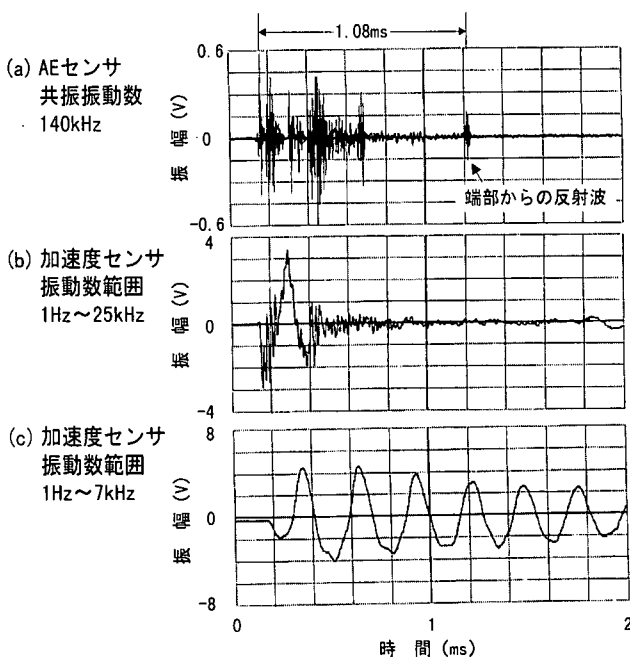


図-4 本システムと従来システムの比較

5. 実験概要

ここでは、キープブロックを節理や亀裂などの不連続面と掘削面（自由面）により分離された岩塊であると仮定して取り扱う。そして、前々章で示したような問題に対する本非破壊探査システムの有効性を検討する目的で、岩塊や塊状コンクリートを対象としておもに寸法の推定に関する実験を行う。

一般には、図-2に示すように境界面に対する衝撃弾性波の入射角は直角ではなく、鋭角または鈍角になっている。そこで本研究では、簡単のために、まずこの入射角が直角に近い場合の岩塊をもとに寸法の推定に関して実験を行い、つづいて入射角が鋭角の場合の塊状コンクリートをもとに同様の実験を実施する。

5.1 寸法の推定に関する実験：その1（境界面における入射角がほぼ直角の場合）

境界面に対する衝撃弾性波の入射角がほぼ直角の場合を対象として、図-5に示すような稲田花崗岩の岩塊の寸法を本システムによる非破壊探査結果から推定した。具体的には、図-5に示す①面、②面または③面にそれぞれA Eセンサをほぼ鉛直に設置し（①面にNo.1、②面にNo.2およびNo.3、③面にNo.4の基点をそれぞれ設けている）、その近傍で各面にほぼ鉛直方向にセットハンマーにより衝撃を与える。そして、向かい側の面からの反射波の伝播時間をオシロスコープで読み取り、別途求めておいた岩塊の弾性波速度を掛け合わせることで、衝撃を与えた方向の岩塊寸法を推定する。このようにして得られた推定値とあらかじめスケールで求めておいた実測値の比較・検討を行う。ここでは、あらかじめ測定しておいた①面に鉛直な方向の岩塊寸法を本システムにより得られた同方向の伝播時間で除して、これを岩塊の弾性波速度（ $=4.58\text{km/s}$ ）と見なしている。

なお、実験においては、受振する反射波の周波数、打撃の強さ、A Eセンサの岩塊端面からの距離およびその設置面の状況などを変化させて、それらの影響についても考察している。

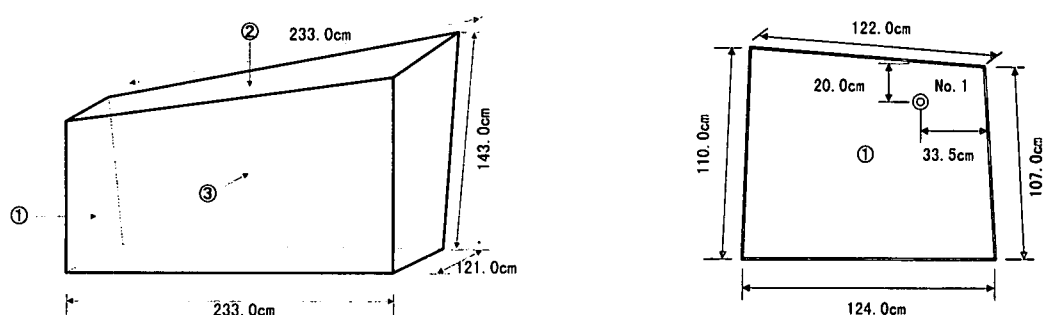


図-5 実験に用いた岩塊の形状および寸法

5.2 寸法の推定に関する実験：その2（境界面における入射角が鋭角の場合）

境界面に対する衝撃弾性波の入射角が鋭角の場合を対象として、図-6に示すような既存の無筋マスコンクリート供試体（ $3.1 \times 3.0 \times 1.2\text{m}$ ）の寸法を本システムによる非破壊探査結果から推定した。具体的には、図-6に示す供試体の隅部にA Eセンサをほぼ鉛直に設置し、その近傍でこの面にほぼ鉛直方向にセットハンマーにより衝撃を与える。そして、向かい側の隅部付近の端面からの反射波の伝播時間をオシロスコープで読み取り、あとは前節の場合と同様にして推定値を求め実測値と比較・検討する。ここでは、あらかじめ測定しておいた供試体の長辺と平行方向の寸法を本システムにより得られた同方向の伝播時間で除して、これを供試体の弾性波速度（ $=3.92\text{km/s}$ ）と見なしている。なお、実験に用いた供試体の一軸圧縮強度は 20MPa 程度であった。

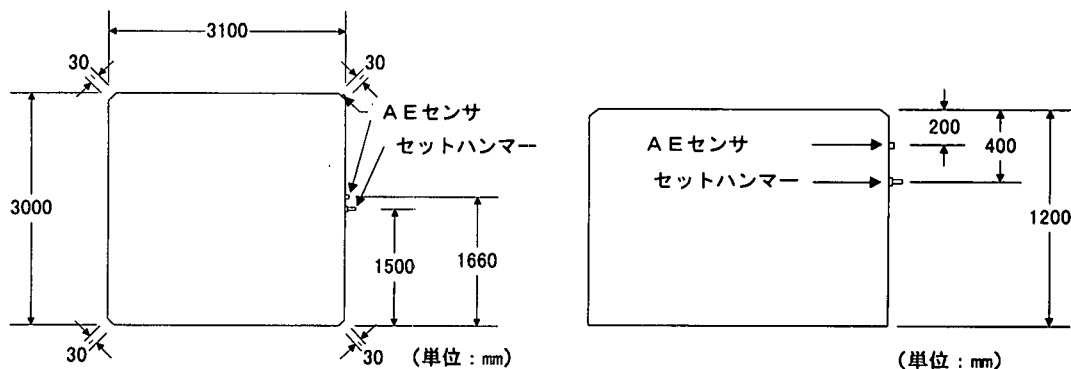


図-6 実験に用いたマスコンクリートの形状および寸法

6. 実験結果および考察

6.1 寸法の推定に関する実験：その1

いま、本システムにより推定した値を実測値と対応させてまとめると図-7のようになる。この図から、両者は非常によい対応を示していることが分かる。

また、本システムによる探査結果の再現性を検証するため、同一箇所でも5回繰り返し実験を行った。その結果、図-8に示すように反射波の検出の度合いおよび伝播時間にほとんど変化はないことが分かる。

以上のことから、境界面における入射角がほぼ直角の場合、本システムにより再現性を持って岩塊寸法の推定が可能であると考えられる。

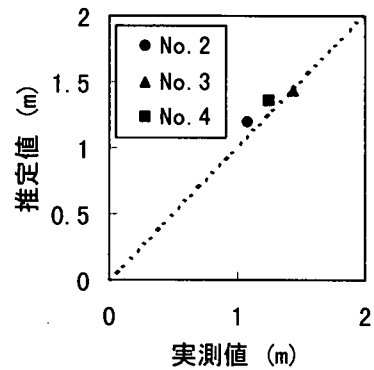
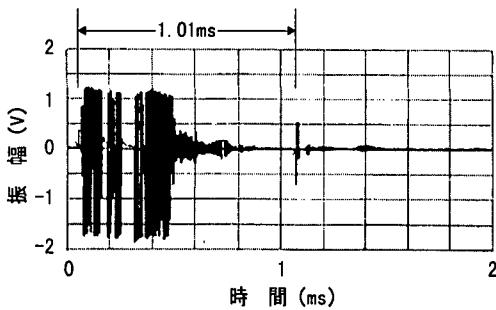
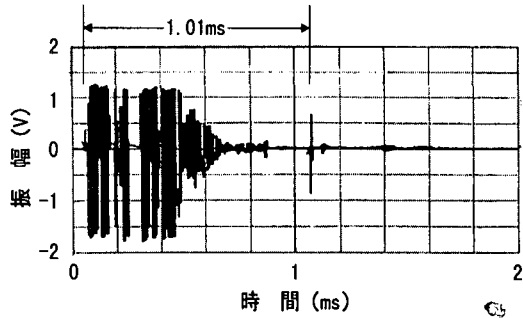


図-7 岩塊寸法の実測値と推定値



(a) 繰り返し1回目 (探査点No.1)



(b) 繰り返し5回目 (探査点No.1)

図-8 本システムによる探査結果の再現性

6.2 寸法の推定に関する実験：その2

まず、供試体の長辺と平行方向に衝撃弾性波を与えて、その方向の反射波の伝播時間をオシロスコープで読み取った結果を図-9に示す。この図および供試体の長辺の長さから弾性波速度が3.92km/sと求められる。

次に、対角方向に衝撃弾性波を与えて反射波の伝播時間をオシロスコープで読み取った結果を図-10に示す。これをもとに供試体の対角距離を推定すると4.53mとなり、実測値の4.31mとほぼよい対応を示していることが分かる。この場合、衝撃弾性波が反射する境界面における入射角は鋭角になっているにもかかわらず、基点において対角方向の反射波をうまく捉えることができておりと考えられる。その要因として、衝撃弾性波やAEセンサの指向性が挙げられる。前者は、周波数が大きくなると指向角が小さくなり、特定の方向に波動が集中的に伝播するというもので、後者は、特定の方向にのみよく反応して波動を受振するというものである。ここでは、前者に関して若干の検討を示す。いま、金属などの均質な媒体を対象とすると、指向性の良さを示す指標である指向角は次式で表すことができる⁹⁾。

$$\sin \theta = 1.2 V_p / D f \qquad \cdots (1)$$

ここで、 θ ：指向角、 V_p ：弾性波速度、 D ：センサ直径、 f ：周波数

そこで、本システムに関するパラメータを式(1)に代入すると、弾性波速度が4.0km/sの媒体中における指向角は 53.1° とあまり小さくないことが分かる。このことから、前者が要因である可能性は小さく、後者の寄与が大きいことが推測される。ただし、これに関しては今後さらに検討が必要である。

以上のことから、境界面における入射角が鋭角の場合においても、本システムにより岩塊寸法の推定が可能であることが分かる。そのとき、AEセンサの設置方向を工夫することにより、特定方向の寸法の推定が可能になると考えられる。

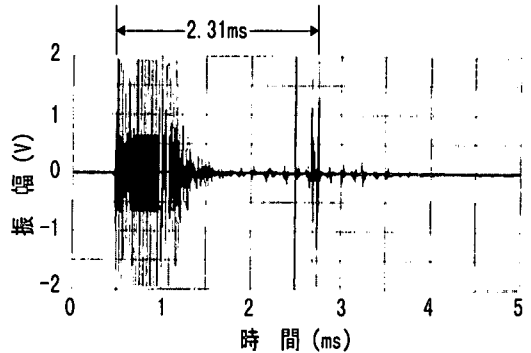
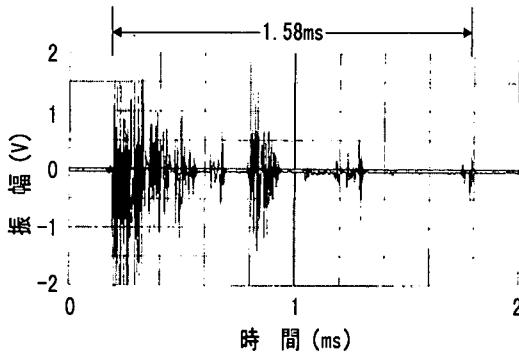


図-9 打撃方向が供試体の長辺と平行の実験結果 図-10 打撃方向が供試体の対角方向の実験結果

7. おわりに

本研究では、キーブロックとなりそうな岩塊を対象に、著者らが独自に構築した非破壊探査システムによりその形状および寸法の推定に関して実験的検討を行った。その結果、本システムによりキーブロックの形状および寸法のより正確な把握が可能であることが分かった。このことは、キーブロックのみならず転石の根入れ深さなどの評価においても本システムが有効であることを示している。一方、第2章で示した後者の問題に対しては、過去に行われた岩盤不連続面における弾性波伝播特性に関する研究成果⁹⁾と本システムを合わせることで解決が可能であると考えられる。

岩盤調査技術は、岩盤の安定性評価などに用いられる解析技術に比べて相対的に立ち遅れているのが現状であり、それが理論と実際のギャップを生む原因の一つであると考えられる。そこで、本研究のような調査技術の研究・開発は非常に重要である。今後、実務への適用を目指して本探査システムの研究を進める予定である。

【参考文献】

- 1) Goodman, R.E. and Shi, G.H. : Block theory and its application to rock engineering Prentice-Hall Inc., 1985.
- 2) 例えば、キーブロック実用化研究会：キーブロックプログラム操作説明書，システム総合研究所，1991.
- 3) 永井哲夫・孫 建生・池尻 健：非破壊探査システムを用いた岩塊寸法の推定に関する実験的検討，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第3部(A)，pp. 796-797，1996.
- 4) 魚本健人・加藤 深・広野 進：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版，1990.
- 5) 島川正憲：超音波工学－理論と実際－，工業調査会，1977.
- 6) 例えば、谷本親伯・岸田 深：一軸圧縮状態での岩盤不連続面を透過する弾性波伝播特性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 523，pp. 49-58，1995.