

一面せん断試験による岩盤不連続面のせん断強度特性 と弾性波伝播挙動

谷本親伯¹・宮田健治朗²・川崎 了³・北村義宜⁴・鈴木淳也⁵

¹正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: tanimoto@ga.eng.osaka-u.ac.jp

²学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

³正会員 博(工) 大阪大学学内講師 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
(現: 正会員 博(工) 北海道大学助教授 大学院工学研究科環境資源工学専攻)

⁴学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

⁵学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

本研究では、自然の不連続面と同じ形状を有する人工供試体を作成し、拘束圧一定条件とダイレイタンシー拘束条件の2つの異なる条件において一面せん断試験を行い、せん断試験と同時に弾性波伝播挙動を測定した。すなわち、計測データから弾性波速度および第一波振幅値の算出を行い、せん断破壊の進展状態と振幅値の相関関係を考察した。また、不連続面の表面形状が弾性波伝播挙動に与える影響を調べるためにラフネスの定量化も行った。これらの基礎実験の結果から、弾性波ジオトモグラフィーを適用した場合の結果解析に当り、弾性波伝播特性によって岩盤の緩み領域を評価することができるものと考えられる。

Key Words: jointed rock, loosened zone, seismic wave propagation, constant dilatancy, amplitude, shear behavior, joint roughness

1. はじめに

トンネル、ダム、大深度地下空洞といった岩盤を対象とする土木構造物を設計する際に、事前調査として弾性波探査が用いられることが多い。これらの手法は、弾性波速度のみをもって岩盤の評価を行っており、実際の地山状況を十分に理解するまでに至っていない。

これに対して、弾性波のエネルギー変化に関するものとして、弾性波の第一波振幅値に着目した事例が報告されている^{1), 2), 3)}。透過弾性波の第一波振幅値⁴⁾は、不連続面の状況(接触面積・開口幅・風化の程度)を透過弾性波速度よりも鋭敏に知ることができ、また、原位置においても弾性波の第一波振幅値に着目した弾性波探査は適用実績があり、速度分布を示す弾性波探査に加えて第一波振幅値の減衰ジオトモグラフィーを実施することにより、より有意な地盤の情報を得ることができると考える。

一方、岩盤を対象とする土木構造物の設計・施工を行う際には、その経済性、安全性が重要な問題となってくる。一般に、岩盤掘削にともない応力変化が生じその結果として、岩盤ブロックが不連続面に沿って変位と強度劣化を起こす「緩み領域」⁵⁾が進展する。この緩み領域の進展の程度を正確に予測することができ

ば、工事中の安全性を確認できるだけでなく、設計通りに工事が進んでいるかどうかを把握することができる。これにより、工期の短縮、工費の削減が可能になる。こういった理由から緩み領域の把握・評価は岩盤掘削において重要な問題であるが、岩盤の不連続性・不均質性により充分解明されていないのが現状である。

岩盤の緩み領域が進展する1つの要因として、不連続面のせん断破壊の進行が挙げられる。岩盤不連続面に沿って起こる「せん断破壊」の進行の程度と岩盤の「緩み領域」の進展の程度の相関関係を明らかにすることは、緩み領域の把握・評価につながり、設計・施工に活用することが出来る。

そこで本研究では、不連続性岩盤のせん断破壊に伴う緩み領域の進展の程度を弾性波を用いて評価するための基礎的検討を実施した。すなわち、せん断状態にある岩盤不連続面の状況を弾性波を用いて評価する際には、一面せん断過程における弾性波測定を行う必要があると考え、一面せん断状態における弾性波測定を行うことができる試験装置⁶⁾を用いて、一面せん断状態における弾性波測定を行い、その結果をもとに岩盤不連続面のせん断特性および弾性波伝播挙動について考察した。

2. 岩盤の緩み領域と試験条件

(1) 岩盤の緩み領域について

一般に、岩盤の掘削に伴い応力変化が生じて、掘削により新たに発生した自由面近傍において岩盤ブロックが不連続面に沿って変位を起こして、いわゆる、「緩み領域」が広がる。岩盤の「緩み」という表現は、現場の実務家の間では便利なものとして多用されているが、統一された定義がないのが現状である。

この岩盤の緩み領域が進展する要因の1つとして、岩盤不連続面のせん断破壊が挙げられる。不連続面のせん断特性については、Barton⁷⁾やPatton⁸⁾ら国内外の数多くの研究者によって様々な研究・解析が行われてきた。これらの研究は不連続面のせん断特性の把握に大きく貢献してきたが、これらの研究で行われてきた一面せん断試験のほとんどは、せん断試験中の垂直拘束圧を一定に保った試験条件下で行われてきた。一方、不連続面のせん断破壊に伴って進行する岩盤の緩み領域を把握するためには、従来のような垂直拘束圧一定条件下のせん断特性だけでなく、ダイレイタンスーを一定に拘束した条件下におけるせん断特性に着目する必要があると考えられる。すなわち、トンネル掘削時の緩み現象は、拘束圧一定条件よりも拘束変位一定条件に近い場合も想定される(図-1参照)。その主な理由は、岩石基質部分の剛性と岩盤不連続面のそれとに大きな相違があるためである。ただし、この剛性については別論文で扱うこととする。

(2) 垂直拘束圧一定せん断破壊時に進展する緩み領域

岩盤斜面崩落の場合、例えば岩盤ブロックは不連続面に沿ってダイレイタンスーの拘束を受けない状態でせん断破壊を起こすことがある。つまり、岩盤ブロックの重量に依存するある一定の垂直拘束圧下でせん断破壊が進行する。また、トンネルなどの地下空間において、岩盤掘削直後の支保が設置されていない状態では、地山強度比(一軸圧縮強度と初期応力との比)⁹⁾が小さく、非弾性領域が広範囲に存在するために拘束圧が小さくなる。よって、岩盤ブロックは自由な変形を許した状態で不連続面に沿ってせん断変位が進行すると考えられ、この状態は拘束圧一定とダイレイタンスー拘束条件の中間である。図-2に示すように、垂直拘束圧一定せん断試験が進行するとせん断変位に伴いせん断応力が増加しピークせん断強度に達した後、せん断応力は低下する。つまり、不連続面に沿って岩盤ブロックがせん断破壊を起こし、崩落・抜け落ちといった現象が発生する。すなわち、不連続面のせん断応力がピークせん断強度に達した後、せん断応力は低下し、設計・施工における大きな問題となってくる。

そこで本研究では、不連続面を有する人工供試体を対象として、垂直拘束圧一定せん断試験時に進行する不連続面の緩み領域をせん断応力に着目して把握・評価しようとした。

(3) ダイレイタンスー拘束せん断破壊時に進展する緩み領域

トンネルなどの地下空間において、岩盤掘削後に応力変化が起こり地山が変形するので、支保工(吹き付けコンクリート、ロックボルト、H型钢など)によって地山の変形を抑えている。その支保工によって地山が剛に固定されている状態では、岩盤ブロックが不連続面に沿ってせん断変位を起こす際に、ダイレイタンスーが拘束された状態でせん断破壊が進行すると考えられる。図-3に示すように、周りの地山によって岩盤ブロックがダイレイタンスーの拘束をほとんど受けない状態と、変位拘束を大きく受ける状態とでは、発生するピークせん断強度は大きく異なる。つまり、ダイレイタンスーの拘束をほとんど受けない岩盤は、不連続面のせん断抵抗が小さいために、せん断破壊に伴う岩盤ブロックの崩落の危険性がある。

そこで本研究では、不連続面を有する人工供試体を対象として、ダイレイタンスー拘束せん断試験時に進展する不連続面の緩み領域をダイレイタンスーの量に着目して評価しようとした。

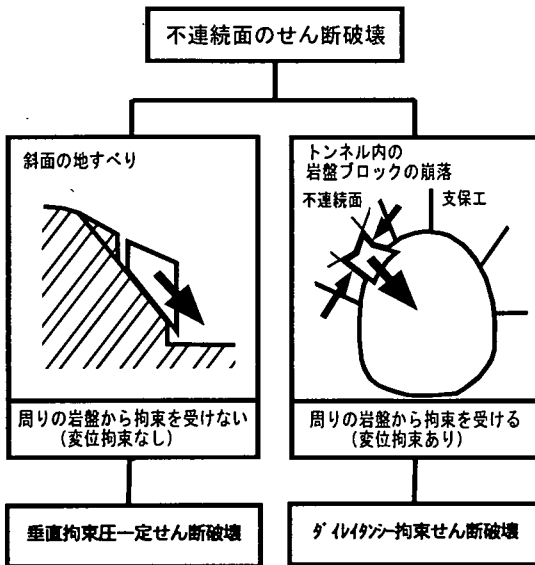


図-1 せん断破壊の種類

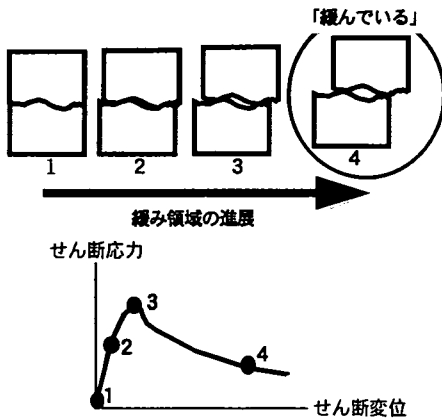


図-2 せん断応力-せん断変位関係
(垂直拘束圧一定条件下)

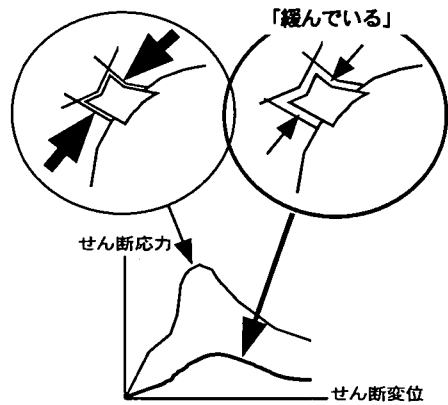


図-3 せん断応力-せん断変位関係
(ダイレイタンス拘束条件下)

3. ラフネスの定量化

(1) 供試体

本研究で用いた供試体は、ボーリングコアから採取された自然状態のジョイントから同じ形状のレプリカを複製し、底面 5.2cm×4.2cm、高さ 11cm の不連続面を有する直方体供試体を作成した。供試体は人工材料を使用し、また自然の泥岩および砂岩を模擬することを考えて石膏とモルタル 2 種類を用意した。石膏はニューハイストーン（吉野石膏製）で、配合比は石膏：水=1:0.24 である。一方、モルタルは早強セメント（大阪住友セメント製）で配合比は①セメント：標準砂：水=1:1:0.5（モルタル1）、②セメント：標準砂：水=2:1:0.75（モルタル2）である。なお、石膏とモルタル1および2の物性値を表-1に示す。

(2) ラフネスの定量化

不連続面の表面形状は、非接触型レーザー式表面形状測定装置¹⁰⁾（TOK-3DPR）を用いて計測した。この装置は可動部、計測部、制御部によって構成され、計測されたデータはアンプを介してコンピュータに記録される。可動部は、鋳鉄製の防振台上にXYステージ（LTS-100XY（1）：シグマ光機製）を固定し、ステージの上には供試体を堅固にかつ再現性をもって固定可能な可動アジャスタを設置している。計測にはレーザー変位計（LB-045：キーエンス製）を用いる。この変位計は、焦点距離が40mm±5mmで、分解能は最小4μmで、垂直方向の測定可能な範囲は±5mmである。これらは、防振台の上に堅固に固定されているため、測定の際には振動が全く認められず振動による測定誤差は無い。

測定間隔や測定測点の間隔をコンピュータに入力す

表-1 石膏およびモルタルの物性値

	石膏	モルタル1	モルタル2
qu (MPa)	10.1	14.0	23.7
Vp (km/s)	1.9	3.6	3.9
湿潤密度 (g/cm ³)	1.85	2.61	2.79

(モルタルの物性値は水中養生 21 日後に測定)

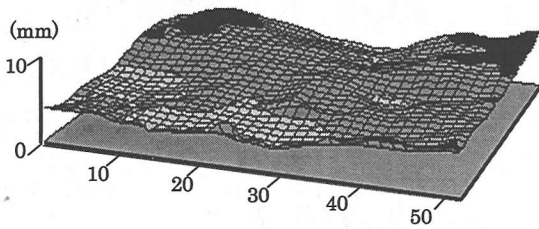
ることにより、自動的に不連続面の表面形状を測定できる。制御装置には、AS-NET（シグマ光機製）を用いている。これにより、XYステージを0.001mmの移動精度で稼働させることが可能である。

本研究では4種類のラフネス（ラフネスA、B、C、D）の計測を行った。ここでの計測はせん断方向に沿って測線を80本設定し、1本の測線上に256点の測点を測定した。つまり、測線間隔は0.5mm、測点間隔は0.2mmでラフネスの測定を行った。計測されたラフネスのうち、ラフネスAおよびラフネスCの鳥瞰図を図-4に示す。計測された4種類の自然のラフネスを筆者らが提案するMs値^{10)、11)、12)}を用いて定量化を行った。Ms値は、ラフネスの正弦波の重ね合わせと考えると、FFTによるスペクトル解析¹³⁾を行い、得られたパワースペクトルの強度と重心周波数によって決定されるものである。Ms値の測定結果を表-2に示す。

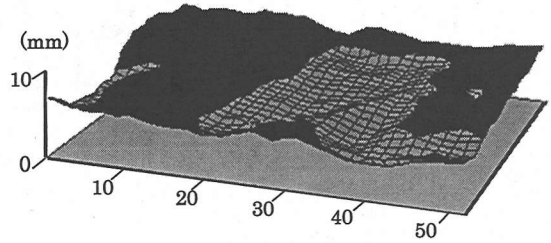
4. 一軸圧縮状態における弾性波測定

(1) 予備実験

不連続岩盤の弾性波伝播特性にもっとも影響を与える不連続面の状態として、形状を示すラフネスが知られている。波動が様々な粗さのラフネスを透過する際に、ラフネスが弾性波のP波速度（Vp）および第一波振幅値¹⁾に与える影響を知ることができれば、原位置



(a) ラフネスA



(b) ラフネスC

図-4 ラフネス鳥瞰図

表-2 Ms 値の測定結果

ラフネス	Ms 値
A	0.0013
B	0.0015
C	0.0017
D	0.0019

表-3 試験条件

材質	3種類(石膏, モルタル1, モルタル2)
ラフネス	4種類(A, B, C, D)
測定する載荷圧 (MPa)	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0

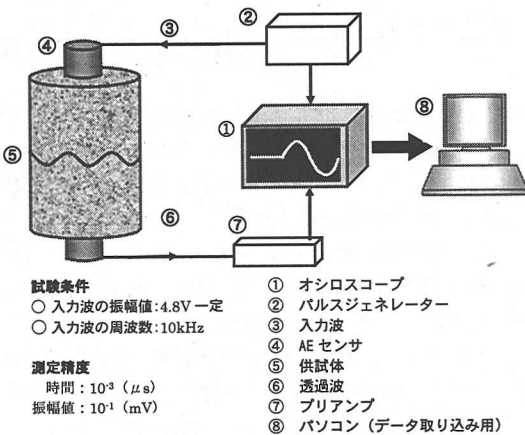


図-5 弾性波測定装置

における弾性波探査に活用することができ、工学的な弾性波探査の価値を高めることができる。そこで、本研究では基礎実験として、それぞれ異なるラフネスを透過する際に載荷圧に伴う弾性波の V_p および第一波振幅値の変化を調べる目的で、一軸圧縮状態における弾性波測定を行った。弾性波測定装置の概要を図-5に示す。供試体中の不連続面を弾性波が透過する際に、不連続面の状態が弾性波に与える影響を速度比¹⁾ (Velocity Ratio: VR) および第一波振幅比¹⁾ (First arrival Amplitude Ratio: FAR) で評価する。なお、速度比 VR および第一波振幅比 FAR は、以下のように定義される。

$$VR = V_{p1} / V_{p0} \quad (1)$$

ここに、 V_{p1} : 不連続面を含む供試体で測定された P 波速度

V_{p0} : 不連続面を含まない供試体で測定された P 波速度

$$FAR = A_1 / A_0 \quad (2)$$

ここに、 A_1 : 不連続面を含む供試体で測定された第一波振幅値

A_0 : 不連続面を含まない供試体で測定された第一波振幅値

また、本研究では供試体の物性および測定装置の仕様から判断して、入力波の周波数を 1kHz、振幅値を 4.8 V 一定で試験を行った。

(2) 測定結果

一般に、トンネル掘削に伴う支保工の効果は、等価な内圧に換算して定量的に評価することができる。掘削面(トンネル壁面)に対し支保により導入し得る内圧は、2MPa 程度が上限である^{14), 15), 16)}。本研究では現実の支保内圧に相当する載荷圧として最大 5MPa とし、0MPa から連続的に載荷していき、所定の載荷圧に達したときに弾性波測定を行い、データを記録した。なお、一軸圧縮状態における弾性波測定を行った試験条件を表-3に示す。ここでは、図-6に石膏供試体の速度比の測定結果を、図-7に石膏供試体の第一波振幅比の測定結果を示し、また、図-8に載荷圧 0.50MPa における Ms 値^{10), 11), 12)}と速度比および第一波振幅比の関係を示す。なお、図-8中の砂岩の物性値に関しては文献¹⁷⁾に示す。

これらの結果より、軟岩～中硬岩を対象とした Ms 値が 0.0013～0.0019 程度（かなり円滑な不連続面粗度に相当）のラフネスを有する人工供試体の一軸圧縮状態の弾性波伝播特性において、以下のことがわかった。

- ・一軸圧縮状態における弾性波伝播特性において、ラフネスの粗さと载荷圧の変化を第一波振幅値は鋭敏に反映したが、 V_p はほとんど変化が見られなかった。つまり、ラフネスの評価には V_p よりも第一波振幅値の方が適している。
- ・Ms 値と第一波振幅値の減衰の程度との間に明瞭な相関関係が見られ、一軸圧縮状態における第一波振幅値の減衰の程度は供試体により大きく異なる。

これらの試験結果より、岩盤不連続面の弾性波伝播特性においてラフネスの評価には第一波振幅値の方が適していると考えられる。今後は第一波振幅値の測定結果のみを示していく。

5. 一面せん断試験結果

(1) 試験装置

岩盤不連続面を対象とした一面せん断試験装置（誠研舎製）は、図-9 に示すようにせん断箱が上下2つに分割され上箱が固定されており、下箱が水平方向に移動する仕組みになっている。水平载荷機構は電気・機械サーボ方式で、垂直载荷機構は一定荷重を与える空圧方式と一定変位を与える電気・機械サーボ方式の2種連動システムを備えている。最大载荷能力は水平30kN、垂直20kNであり、水平方向および垂直方向の荷重はロードセルで測定する。垂直変位および水平変位はそれぞれせん断箱に直接変位計をセットして測定した。測定された水平荷重、垂直荷重、垂直変位および水平変位の測定データを逐次パソコンに取り込み、そのデータによって試験機の制御を行うものである。なお、本試験で用いた一面せん断試験機の測定精度としては、水平荷重および垂直荷重の精度は1.0Nで、水平変位および垂直変位の精度は0.01mmである。

(2) 垂直拘束圧一定条件一面せん断試験

垂直拘束圧一定条件における一面せん断試験は、供試体に一定垂直拘束圧を与えた状態でせん断変位を与える試験である。本試験の制御は水平変位制御（毎分0.2mm）で行い、せん断応力が残留強度に達するまで行った。また、本研究では岩盤の緩み領域を対象としているので、垂直拘束圧は初期応力ではなく多くの事例に見られる支保部材の内圧効果と判断される1MPaまで载荷すれば十分であると判断し、载荷する垂直拘束圧は①0.25MPa、②0.50MPa、③1.0MPaを選定した。な

お、表-4 に試験パターンを示す。

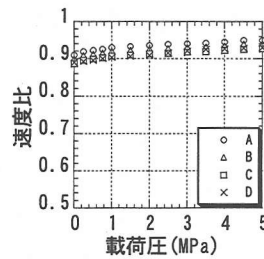


図-6 载荷圧と速度比の関係

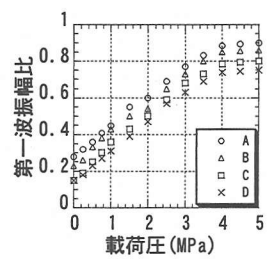


図-7 载荷圧と第一波振幅比

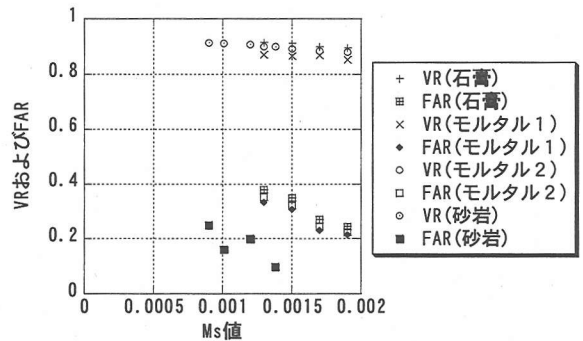
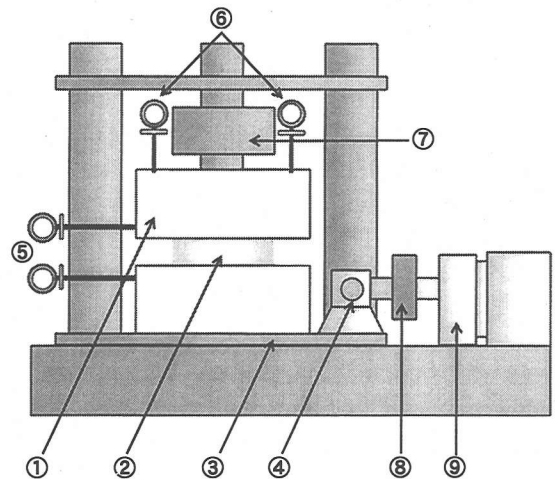


図-8 Ms 値と VR および FAR の関係(载荷圧 0.5MPa)



- ① せん断箱
- ② 供試体(4.2cm×5.2cm×11cm)
- ③ スライドベアリング
- ④ ローラーベアリング
- ⑤ 水平変位計(最大20mm、精度0.01mm)
- ⑥ 垂直変位計(最大5mm、精度0.01mm)
- ⑦ 垂直荷重ロードセル(最大20kN、精度1N)
- ⑧ 水平荷重ロードセル(最大30kN、精度1N)
- ⑨ 水平ジャッキ

図-9 一面せん断試験装置

表-4 試験パターン

ラフネス	4種類 (A, B, C, D)
材質	3種類 (石膏, モルタル1, モルタル2)
載荷圧	3種類 (0.25MPa, 0.5MPa, 1.0MPa)

ここで石膏供試体に関しては、図-10にラフネスAの一面せん断試験結果を、図-11にラフネスDの試験結果を、また、モルタル2供試体に関しては図-12にラフネスAの試験結果を、図-13にラフネスDの試験結果を示す。また、図-14に石膏供試体におけるMs値とピークせん断強度の関係を示す。また、表-5には、各供試体におけるピークせん断強度発生時のせん断変位を示す。

これらの試験結果より、軟岩～中硬岩を対象とした供試体において、Ms値が0.0013～0.0019程度のラフネスを有する不連続面のせん断特性（垂直拘束圧一定条件）について、以下のことがわかった。

- ・せん断破壊が進行してピークせん断強度発生後の緩み領域の進展した状態では、供試体によらず不連続面のせん断応力が低下することがわかった。また、せん断応力の低下の程度にラフネス依存性は見られなかった（図-10～14）。
- ・ラフネスの粗さ（Ms値）とピークせん断強度との間に相関関係が見られた。これにより、垂直拘束圧一定条件下におけるせん断特性にラフネスが与える影響を評価する際に、Ms値が十分有効な不連続面の定量化手法であると考えられる。またこの結果より、ラフネスの粗さ（Ms値）からピークせん断強度の推定が可能である（図-14）。
- ・緩み領域を対象とした低拘束圧条件下における、ピークせん断強度発生時におけるせん断変位は、ラフネスおよび供試体によらず垂直拘束圧の増加に伴ってわずかではあるが増加することがわかった。

(3) ダイレイタンスー拘束条件一面せん断試験

ダイレイタンスー拘束条件による一面せん断試験は、最初に垂直拘束圧一定の状態ですせん断を開始して、事前に設定したダイレイタンスーが生じたところでダイレイタンスーを拘束してさらにせん断を行い、せん断応力がピークせん断強度発生後の残留強度に達するまで行った。本試験では、最初に与える垂直拘束圧は0.25MPaとし、設定したダイレイタンスー量は①0.05mm, ②0.10mm, ③0.20mm, ④0.30mm, ⑤0.50mm, ⑥0.70mmを選定した。ダイレイタンスーの最大量を0.70mmと決定したのは、今回使用した供試体の最大値を上限と考えたからである。なお、表-6に試験パターンを示す。

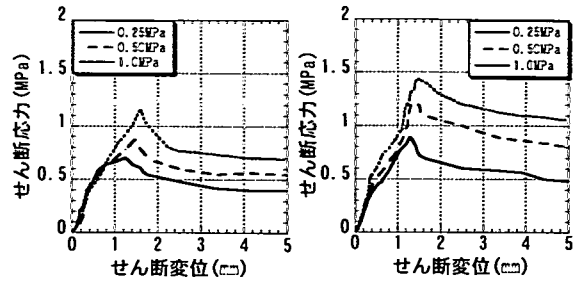


図-10 一面せん断試験結果 (石膏, ラフネスA) 図-11 一面せん断試験結果 (石膏, ラフネスD)

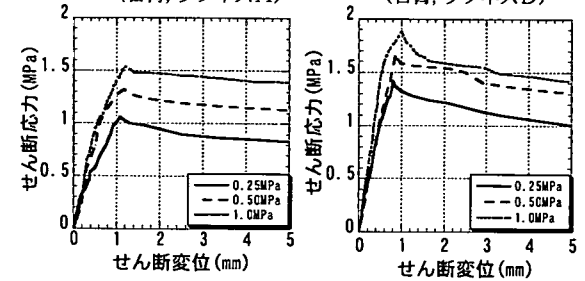


図-12 一面せん断試験結果 (モルタル2, ラフネスA) 図-13 一面せん断試験結果 (モルタル2, ラフネスD)

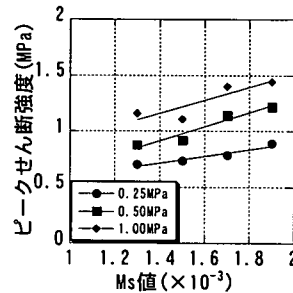


図-14 Ms値とピークせん断強度の関係 (石膏供試体)

表-5 ピークせん断強度発生時のせん断変位

供試体	垂直拘束圧	A	B	C	D
石膏	0.25MPa	1.24mm	1.26mm	0.97mm	1.28mm
	0.50MPa	1.46mm	1.50mm	1.21mm	1.35mm
	1.00MPa	1.58mm	1.66mm	1.36mm	1.45mm
モルタル1	0.25MPa	1.06mm	1.12mm	1.08mm	1.03mm
	0.50MPa	1.26mm	1.24mm	1.23mm	1.20mm
	1.00MPa	1.25mm	1.33mm	1.42mm	1.38mm
モルタル2	0.25MPa	1.08mm	0.96mm	0.73mm	0.81mm
	0.50MPa	1.16mm	1.15mm	1.10mm	0.86mm
	1.00MPa	1.20mm	1.35mm	1.19mm	1.00mm

表-6 試験パターン

ラフネス	4種類 (A, B, C, D)
材質	3種類 (石膏, モルタル1, モルタル2)
ダイレイタンス	6種類 (0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7mm)

表-7 ピークせん断強度比(ダイレイタンス0.70mmを基準)

供試体	ダイレイタンス	A	B	C	D
石膏	0.05mm	1.87	1.85	1.97	2.08
	0.10mm	1.62	1.63	1.71	1.63
	0.20mm	1.36	1.38	1.52	1.51
	0.30mm	1.16	1.10	1.31	1.45
	0.50mm	1.15	1.06	1.17	1.18
	0.70mm	1.00	1.00	1.00	1.00
モルタル1	0.05mm	1.80	1.81	1.95	1.93
	0.10mm	1.50	1.51	1.73	1.68
	0.20mm	1.40	1.37	1.48	1.45
	0.30mm	1.19	1.23	1.35	1.27
	0.50mm	1.14	1.13	1.20	1.17
	0.70mm	1.00	1.00	1.00	1.00
モルタル2	0.05mm	1.79	1.74	1.93	1.99
	0.10mm	1.55	1.54	1.72	1.70
	0.20mm	1.40	1.30	1.50	1.39
	0.30mm	1.19	1.16	1.29	1.21
	0.50mm	1.08	1.06	1.17	1.10
	0.70mm	1.00	1.00	1.00	1.00

表-8 ピークせん断強度発生時のせん断変位

供試体	ダイレイタンス	A	B	C	D
石膏	0.05mm	1.52mm	1.48mm	1.40mm	1.08mm
	0.10mm	2.12mm	1.78mm	1.48mm	1.91mm
	0.20mm	2.50mm	2.00mm	1.65mm	1.91mm
	0.30mm	2.83mm	2.16mm	1.66mm	2.25mm
	0.50mm	3.01mm	2.50mm	1.95mm	2.93mm
	0.70mm	3.50mm	3.50mm	2.99mm	3.30mm
モルタル1	0.05mm	1.67mm	1.50mm	1.67mm	1.41mm
	0.10mm	2.08mm	1.58mm	1.71mm	1.67mm
	0.20mm	2.22mm	2.50mm	2.41mm	1.91mm
	0.30mm	2.75mm	2.74mm	2.80mm	2.41mm
	0.50mm	3.00mm	3.00mm	2.65mm	2.51mm
	0.70mm	2.87mm	3.04mm	2.91mm	2.78mm
モルタル2	0.05mm	1.25mm	1.66mm	1.62mm	1.50mm
	0.10mm	1.61mm	1.91mm	1.51mm	1.45mm
	0.20mm	2.00mm	2.25mm	1.58mm	1.75mm
	0.30mm	2.33mm	2.50mm	1.67mm	1.83mm
	0.50mm	2.50mm	2.91mm	2.08mm	2.33mm
	0.70mm	2.71mm	3.47mm	2.45mm	2.60mm

ここで石膏供試体に関しては、図-15にラフネスAの一面せん断試験結果を、図-16にラフネスDの試験結果を、また、モルタル2供試体に関しては図-17にラフネスAの試験結果を、図-18にラフネスDの試験結果を示す。また、図-19に石膏供試体におけるMs値とピークせん断強度の関係を示す。また、表-7には、石膏供試体における拘束するダイレイタンス量が0.70mmの時のピークせん断強度を基準にした、それぞれの拘束ダイレイタンスの時に生ずるピークせん断強度の比(以降、ピークせん断強度比)をまとめたものを示す。また、表-8に石膏供試体におけるピークせん断強度発生時のせん断変位を示す。

これらの試験結果より軟岩~中硬岩を対象とした供試体において、Ms値が0.0013~0.0019程度のラフネスを有する不連続面のせん断特性(ダイレイタンス

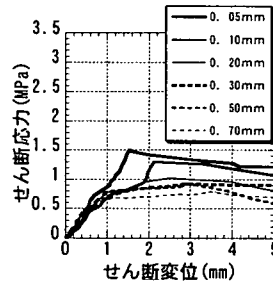


図-15 一面せん断試験結果 (石膏, ラフネスA)

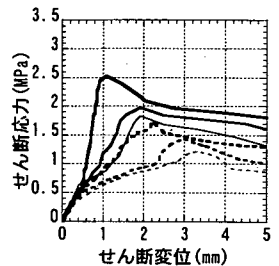


図-16 一面せん断試験結果 (石膏, ラフネスD)

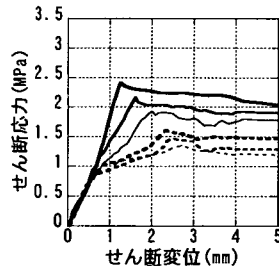


図-17 一面せん断試験結果 (モルタル2, ラフネスA)

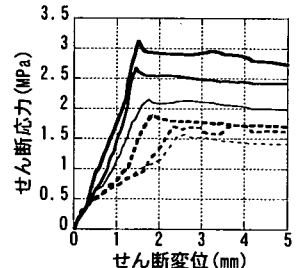


図-18 一面せん断試験結果 (モルタル, 2ラフネスD)

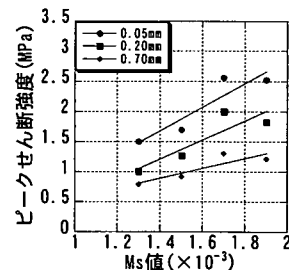


図-19 Ms値とピークせん断強度の関係 (石膏供試体)

拘束条件) について、以下のことがわかった。

- ・ラフネスの粗さによらず拘束するダイレイタンスー量が小さいほど、ピークせん断強度は大きくなる傾向が見られた (図-15~19)。
- ・ラフネスの粗さ (M_s 値) とピークせん断強度との間に相関関係が見られた。これは、ダイレイタンスー拘束条件下におけるせん断特性にラフネスが与える影響を評価する際に、全般に円滑とみなされる M_s 値が 0.0013~0.0019 の範囲においても、せん断強度の相違が確認でき、 M_s 値が十分有効な不連続面の定量化手法であると考えられる (図-19)。
- ・ラフネス A, B に比べてラフネス C, D の方が、拘束するダイレイタンスーが 0.05mm および 0.10mm の時のピークせん断強度比が大きいことがわかった。すなわち、ラフネスの粗い方が滑らかなものに対して、ダイレイタンスーをより拘束した状態で著しいピークせん断強度を発揮することがわかった。
- ・ピークせん断強度発生時におけるせん断変位は、同じラフネスの場合において①供試体にはほとんど依存しない、②ダイレイタンスー量にほぼ比例して大きくなることわかった。

6. 一面せん断状態における弾性波測定

(1) 概説

本研究では、不連続面を含む供試体を対象として、せん断に伴う不連続面の緩みの進展の程度を弾性波を用いて把握・評価することを目的としているので、一面せん断状態で弾性波測定をすることができる試験装置⁶⁾を開発した。その概要を図-20に示す。今回開発した試験装置は、岩石供試体を用いて一面せん断試験を行いながら、一定時間間隔 Δt ごとに弾性波測定を自動計測することができ、性能としては1分間に最大5回の測定が可能である ($\Delta t=12\text{sec}$)。弾性波測定は試験の開始前から始め、せん断状態が残留強度に至るまで行った。なお本試験では、 $\Delta t=30\text{sec}$ で測定を行った。

(2) 試験結果(垂直拘束圧一定条件)

垂直拘束圧一定一面せん断状態における弾性波測定を第一波振幅値に着目して行った。試験パターンは表-4と同じである。ここで石膏供試体に関しては、図-21にラフネスAの弾性波測定結果を、図-22にラフネスDの測定結果を、また、モルタル2供試体に関しては図-23にラフネスAの測定結果を、図-24にラフネスDの試験結果を示す。なお、図中の黒丸記号(・)は、ピークせん断強度が発生したせん断変位に対応し

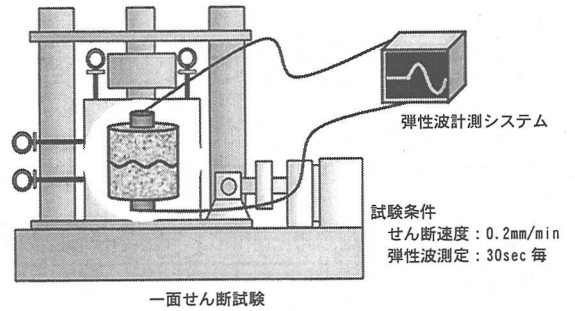


図-20 一面せん断状態における弾性波測定試験装置

ている。

これらの試験結果より、軟岩~中硬岩を対象とした供試体において、 M_s 値が 0.0013~0.0019 程度のラフネスを有する不連続面のせん断状態における第一波振幅値に着目した弾性波伝播特性(垂直拘束圧一定条件)について、以下のことがわかった。

- ・せん断に伴い、第一波振幅値は連続的に減衰し供試体およびラフネスによらず、ピークせん断強度発生時で第一波振幅比が初期値の 20%~45%程度まで減衰することが確認できた。
- ・第一波振幅値の減衰の程度に関して、垂直拘束圧が大きい場合に比べて低拘束圧の場合は、減衰の程度が大きいことがわかった。つまり第一波振幅値の減衰の程度と垂直拘束圧の間に相関関係が見られた。
- ・第一波振幅値の減衰の程度に関して、明瞭な供試体およびラフネス依存性は確認できなかった。
- ・ピークせん断強度発生後は、せん断に伴う第一波振幅比の減衰の程度は発生前に比べて小さくなり、概ね一定値に収束する傾向が見られた。

(3) 試験結果(ダイレイタンスー拘束条件)

ダイレイタンスー拘束一面せん断状態における弾性波測定を第一波振幅値に着目して行った。試験パターンは表-6と同じである。ここで石膏供試体に関しては、図-25にラフネスAの弾性波測定結果を、図-26にラフネスDの測定結果を、またモルタル2供試体に関しては図-27にラフネスAの測定結果を、図-28にラフネスDの試験結果を示す。なお、図中の黒丸記号(・)は、ピークせん断強度が発生したせん断変位に対応している。

これらの試験結果より軟岩~中硬岩を対象とした供試体において、 M_s 値が 0.0013~0.0019 程度のラフネスを有する不連続面のせん断状態における第一波振幅値に着目した弾性波伝播特性(ダイレイタンスー拘束条件)について、以下のことがわかった。

- ・せん断に伴い、第一波振幅値は拘束するダイレイタンスー量が 0.05mm の時にほぼ初期値の 90%程度まで減

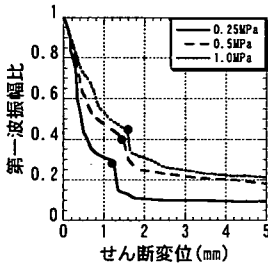


図-21 第一波振幅値測定結果
(石膏, ラフネスA)

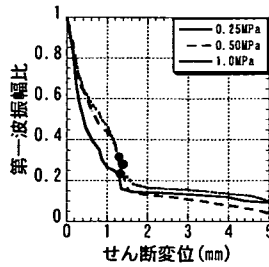


図-22 第一波振幅値測定結果
(石膏, ラフネスD)

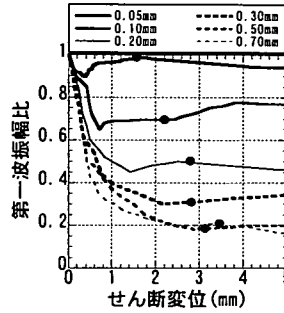


図-25 第一波振幅比測定結果
(石膏, ラフネスA)

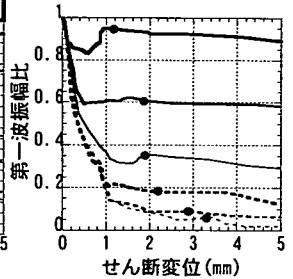


図-26 第一波振幅比測定結果
(石膏, ラフネスD)

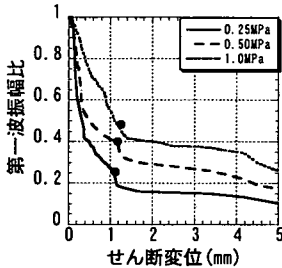


図-23 第一波振幅値測定結果
(モルタル2, ラフネスA)

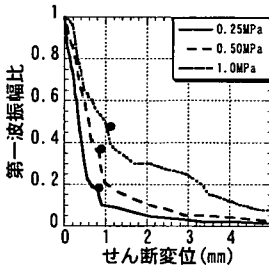


図-24 第一波振幅値測定結果
(モルタル2, ラフネスD)

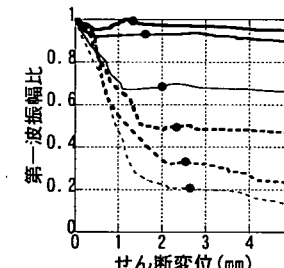


図-27 第一波振幅比測定結果
(モルタル2, ラフネスA)

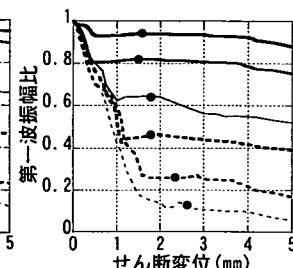


図-28 第一波振幅比測定結果
(モルタル2, ラフネスD)

衰している。一方、拘束するダイレイタンスー量が 0.70mm の時は、第一波振幅値は概ね初期値の 10%~20% 程度まで減衰している。つまり、第一波振幅比の減衰の程度は、拘束するダイレイタンスー量に依存していることが確認できた。

- ・第一波振幅値の減衰の程度に関して、明瞭な供試体およびラフネス依存性は確認できなかった。
- ・拘束するダイレイタンスー量が大きくなるにつれて、せん断に伴う第一波振幅値の減衰の程度は大きくなることが確認できた。このことから、せん断に伴う不連続面の緩み領域の進展の程度と第一波振幅値の減衰の程度との間に相関関係があると考えられる。
- ・設定した拘束ダイレイタンスー量に達するまでは、せん断に伴い第一波振幅値は連続的に減衰するが、到達後はほとんど減衰が見られなかった。また、ピークせん断強度に達した後は、顕著な減衰傾向は見られなかった。

7. まとめ

本研究では、不連続面を有する軟岩~中硬岩の泥岩および砂岩を想定した人工供試体を対象として、不連続面の定量化を行い、①垂直拘束圧一定せん断試験および②ダイレイタンスー拘束せん断試験による岩盤不

連続面のせん断特性および弾性波伝播挙動に関して調査し、以下に示す知見を得た。

- 1) 不連続面の弾性波伝播特性およびせん断特性に大きく影響を及ぼす不連続面のラフネスの定量化を行った。これにより次のことがわかった。
 - ・Ms 値と一軸圧縮状態における第一波振幅値の減衰の程度との間に相関関係を確認した。
 - ・垂直拘束圧一定条件下およびダイレイタンスー拘束条件下において、ピークせん断強度と Ms 値との間に相関関係があることを確認した。
- 2) 不連続面のせん断特性について調査した結果、次のことがわかった。
 - ・垂直拘束圧一定条件下における一面せん断試験において、緩み領域の進展(ピークせん断強度発生)後では、不連続面のせん断応力が低下する。つまり、不連続面の緩み領域の進展の程度とせん断応力の低下の程度との間に明らかな相関関係がある。
 - ・ダイレイタンスー拘束条件下における一面せん断試験において、拘束されるダイレイタンスー量によってピークせん断強度が大きく異なることがわかった。
 - ・ラフネスの粗い方が滑らかなものに比べて、ダイレイタンスーをより拘束した状態で著しく高いせん断強度を発揮することがわかった。
 - ・垂直拘束圧一定条件下において、ピークせん断強度発生時のせん断変位は、ラフネスおよび供試体によらず

垂直拘束圧の増加に伴い増加することがわかった。一方、ダイレイタンシー拘束条件下において、ピークせん断強度発生時のせん断変位は、同じラフネスの場合において①供試体にはほとんど依存しないことと、②ダイレイタンシー量にほぼ比例して大きくなることがわかった。

3) 不連続面のせん断の進展の程度と不連続面を透過する弾性波伝播特性との相関関係を調べた。これにより次のことがわかった。

・垂直拘束圧一定条件下の一面せん断状態における弾性波伝播特性において、ピークせん断強度発生後（緩み領域が進展後）に第一波振幅値は大きく減衰することがわかった。

・ダイレイタンシー拘束条件下の一面せん断状態における弾性波伝播特性において、不連続面の緩み領域の進展している状態は緩んでいない状態と比べると、第一波振幅値は著しく減衰することがわかった。つまり、緩み領域の程度と第一波振幅値の減衰の程度との間には明瞭な相関関係が見られた。

すなわち、垂直拘束圧一定条件下で進展する岩盤不連続面の緩み領域に関しては、せん断破壊に伴い第一波振幅値は連続的に減衰し、緩み領域の進展の程度と第一波振幅値の減衰の程度の間に関係が見られ、また、第一波振幅値の減衰は垂直拘束圧に依存することがわかった。実際の地山において、不連続面に作用する垂直拘束圧は、支保部材の発揮する有効内圧の程度から推定することが可能であり、今回得られた知見を用いて緩み領域の進展の程度を把握することができると期待される。

一方、ダイレイタンシー拘束条件下で進展する岩盤不連続面の緩み領域に関しては、緩み領域の進展の程度と第一波振幅値の減衰の程度の間に関係が見られ、また、第一波振幅値の減衰は拘束するダイレイタンシー量に依存することがわかった。つまり、第一波振幅値の減衰の程度からダイレイタンシー量を推測することは可能であるので、実際の地山における不連続面の開口幅（ダイレイタンシー量）から緩み領域の進展の程度を評価することは十分可能であると考えられる。

以上のことから、本研究で得られた知見を基にすれば、弾性波の第一波振幅値を利用した実際の岩盤の緩み領域の評価への適用性に関して見通しが得られたものとする。試験結果の信頼性と有効性をより高めるために、今後ともさらなる試験データの取得に努めたい。

参考文献

- 1) 谷本親伯, 岸田潔: 一軸圧縮状態での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/Ⅲ-32, pp. 49-58, 1995.
- 2) 國井仁彦: 物理探査法を用いた岩盤不連続面の分布特性に関する研究, 大阪大学大学院 博士論文, pp. 127-148, 2000.
- 3) 渡辺俊樹, 佐々宏一: 弾性波の初動振幅を利用した減衰トモグラフィ, 物理探査, 第45巻, 第1号, pp. 10-21, 1992.
- 4) 岸田潔, 谷本親伯, 松崎聡, 小田原雄一: 弾性波減衰ジオトモグラフィの応用ときれつ性状, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 266-270, 1993.
- 5) K. チェッキー著 (島田隆夫訳): トンネル工学, pp. 85-109, 1971.
- 6) 宮田健治朗, 谷本親伯, 川崎了: 一面せん断試験時における弾性波伝播特性に関する基礎的研究, 土木学会第55回年次学術講演会, III-A267, 2000.
- 7) Barton, N. and Choubey, V.: The shear strength of rock joints and practice, Rock Mechanics 10, pp. 1-65, 1977.
- 8) Patton, F.D.: Multiple models of shear behavior of a jointed rock mass, Proc. 11th Symp Rock Mech, AIME, pp. 105-125, 1966.
- 9) 谷本親伯: NATM 1, 森北出版, pp. 147-177, 1984.
- 10) 谷本親伯, 岸田潔: 3次元非接触プロファイラーと最大エントロピー法を用いた岩盤不連続面ラフネスの定量化, 土木学会論文集, No. 511/Ⅲ-30, pp. 57-67, 1993.
- 11) 谷本親伯, 森岡宏之, 岸田潔: 低拘束圧下での不連続面のせん断特性とラフネスの関係, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 127-131, 1991.
- 12) 北村義宜: せん断に伴うアスベリティーの変化を考慮した不連続性岩盤のせん断特性, 大阪大学大学院 修士論文, pp. 7-13, 2001.
- 13) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版, pp. 43-169, 1988.
- 14) Tanimoto, C., Boehlke, B.M. and Iwasaki, Y.: Allowable limit of convergence in tunneling, 24th U.S. Sympo. on Rock Mechanics, pp. 251-263, 1983.
- 15) 谷本親伯, 畠昭治郎: 羽切周辺での地山挙動を考慮したトンネル支保の基本的概念, 土木学会論文報告集, No. 325, pp. 93-106, 1982.
- 16) 谷本親伯, 畠昭治郎, 藤原紀夫, 吉岡尚也: トンネル岩盤分類と許容変形量との関係, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集, pp. 431-435, 1986.
- 17) 宮田健治朗, 谷本親伯, 川崎了: 不連続性岩盤の弾性波伝播特性に関する検討, 第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 178-182, 2000.

(2001. 3. 26 受付)

**SHEAR STRENGTH AND PROPAGATION OF SEISMIC WAVE
DURING ROCK JOINT SHEAR TEST UNDER CONSTANT PRESSURE
AND CONSTANT DILATANCY**

Chikaosa TANIMOTO, Kenjiro MIYATA, Satoru KAWASAKI, Yoshinori KITAMURA
and Junya SUZUKI

Through the long term running research conducted by the prime author, it has been clarified that, when seismic wave propagated through rock joints, the change of amplitude showed more sensitive than that of propagating velocity. Basing on this observation, the authors carried out the measurement of the velocity and amplitude of propagating wave during the rock joint shear test. It was confirmed that the monitoring by means of the change of amplitude of propagating wave could show the progress of loosening during excavation. The final objective of the research is to estimate the magnitude of loosening phenomenon in quantitative manner which is essential in rock tunneling.