

林道開設における弾性波探査の適用について

楊 筱琴 ・ 酒井 徹朗

A Study on a Classification of Rock
Based on The Seismic Wave Velocity
for The Forest Road Construction

Xiaoqin YANG and Tetsuro SAKAI

要 旨

林道開設のための土質区分のひとつの指標として弾性波速度適用の可能性を調べた。弾性波速度は携帯用の簡易測定器を使用して計測した。その結果、弾性波速度と作業工程の間に相関関係が認められた。一方今回の限られた調査では、土質区分と作業工程の間には明確な相関関係は認められなかった。

1. は じ め に

林道開設工事における土質区分は、従来、現場担当者の勘と経験に頼っていた面が多く、その判定は今も表層の状態や付近の切取り法面等を参考に行っている。工事の進行にともない設計上の土質区分と実際の土質との違いが多々あり、設計変更を生じる場合があるのが現状である。最近、特に問題となっていることは、切土における土砂と岩石の単価の差が大きいため、土質の判定の違いで、設計金額に大きな開きがでることである。林道工事では岩石の出現する頻度が高いばかりでなく、その掘削単価が工事費の相当部分を占め、土質区分の判定の不正確さが結果的に予定工事費を大きく左右するので、その調査は慎重に進めなければならない。練達した土木の設計施工技術者でなくとも、実用的な誤差の範囲で岩石を区分でき、かつ個人差を生じない診断方法が必要である。特に現場で簡単に判定できる方法が望まれている。そこで、土質区分の一助として携帯用の簡易弾性波速度測定装置が土質区分に適用できるかどうかを調査検討したので報告する。

2. 測定装置と調査地の概要

弾性波探査とは、地盤構成物の物理的性質（圧縮強度、比重、間隙率など）の差異によって、弾性波（地震波）の伝達度が異なることを利用して、地下の諸層を伝達速度によって判断するものである。表層土、風化帯、割れ目の多い地帯、新鮮岩の深さなどの判別に有効で、採石場や鉦山などの開発や土木工事に先だつ地盤調査に広く適用されている。

今回林道開設地の地盤に対する弾性波速度の測定は小型デジタルタイプ弾性波速度測定器（応

用地質株式会社製,MODEL-1814)を用いて行った。この器械は発振点と受振点の2点間の弾性波速度をデジタル表示する携帯用の測定器である。受振点に受振センサーを置き、発振点をハンマースイッチを装着したハンマーで打撃し、その打撃波の到達時間を1万分の1秒単位で測定する仕組みになっている。従来の多チャンネル測定器に比べて簡易でしかも軽量であるため、林道などの山岳地での測定に向いている。測定は同一区間を十数回測定し、異常値を除外した平均値をもってその区間の弾性波速度とした。複雑な地形の山岳地では測定場所が僅か違うだけで、弾性波速度が大きく異なることもあった。

表1 調査地の一覧

場 所	所有	調 査 内 容	作業種	ブレーカバックホウトラック			タイプ	件数	経験	
				(m3)	(m3)	(トン)				
奈良県吉野郡十津川村 (尾根筋林道)	民有林	大型ブレーカ 岩石掘削	開設作業 法面作業	0.45	0.30		ポイント	3	10年	
奈良県吉野郡上北山村小椋 (奈良県庁林道課)	公有林	バックホウ軟岩掘削 大型ブレーカ	開設作業	0.70	0.70	11	ポイント	3	20年	
和歌山県西牟婁郡大塔村 (田辺営林署部内)	国有林	大型ブレーカ 岩石掘削	岩割作業 盤下作業	0.70	0.45		フラット	15	10年	
和歌山県龍神 (堀河屋林業)	民有林	小型ブレーカ 岩石掘削	盤下作業	0.10	0.10		ポイント	7	10年	急勾配林道 道幅2m
京都市左京区久多下の町地内 (京都市役所)	公有林	バックホウ軟岩掘削 大型ブレーカ	開設作業 法面作業	0.70	0.70	11	ポイント	2	20年	運搬距離 100m
奈良県吉野郡十津川村 (中腹林道)	民有林	大型ブレーカ 岩石掘削	開設作業	0.45	0.90		ポイント	4	20年	
和歌山県有田郡清水町 (京大和歌山演習林)	公有林	大型ブレーカ 岩石掘削	法面作業	0.45	0.45		フラット エンド	2	2年	

調査地は表1に示すとおりである。各調査地において、林道開設の予定された地点の弾性波速度の測定、地形測量、開設作業工期等の調査を行った。調査地での作業用ブレーカの機種は0.1m³、0.45m³、0.7m³(ブレーカ機種は適合ショベルバケット容量で分類する)の3種類に分けた。

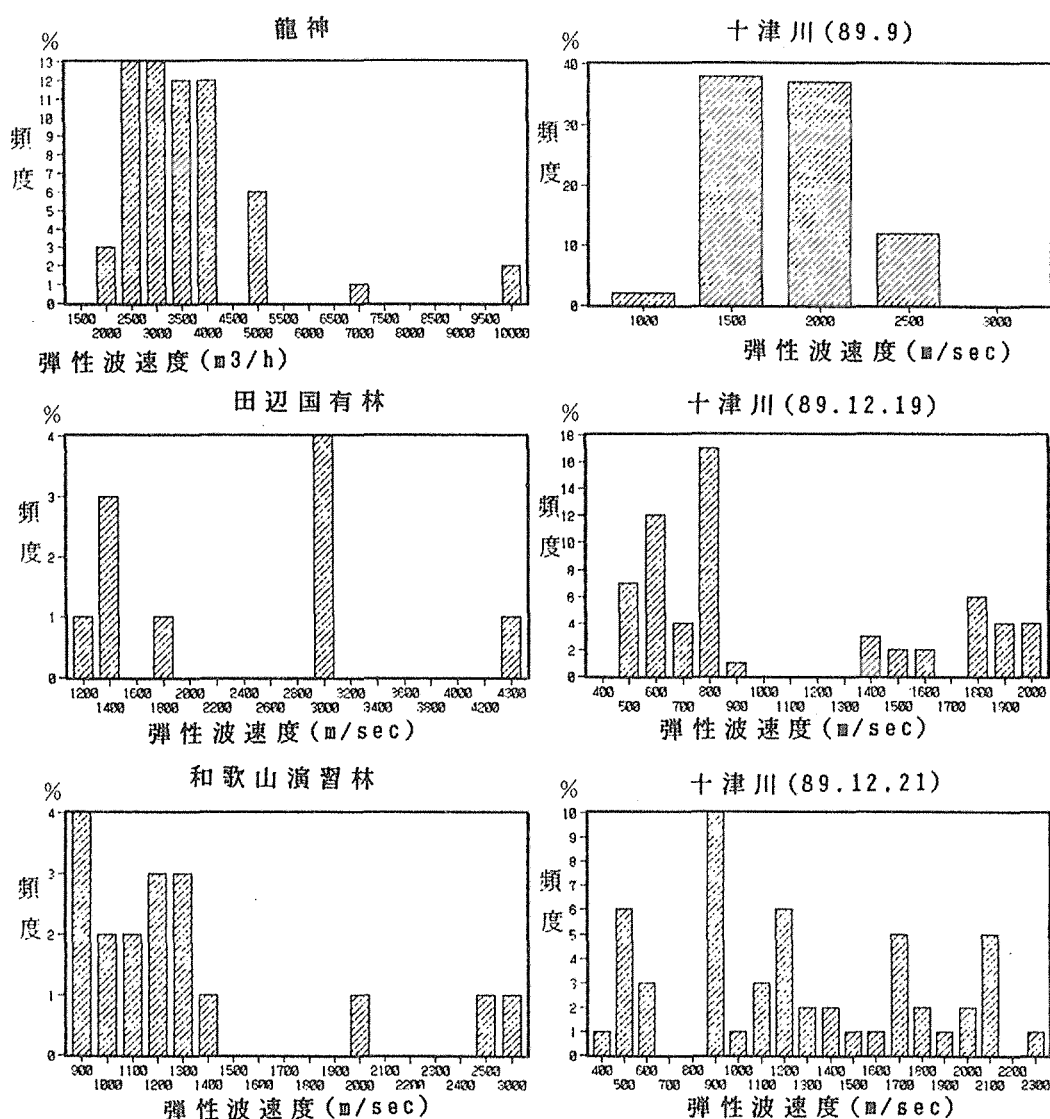


図1 調査地ごとの弾性波速度の頻度分布

図1は各地の弾性波速度の実測値の頻度を示している。林道必携設計編による林道工事での土質区分は表2のように分類されている¹⁾。

一般に軟岩Ⅰ、軟岩Ⅱ及び硬岩の区分を明確にする必要がある。その理由は掘削方法がそれらの岩石区分間で異なり、掘削単価が大きく違うからである。通常の掘削はバックホウで行い、岩が硬くなるに伴いブレイカ使用から更に発破使用へと工法が変わる。今回の調査ではブレイカ使用に限定し、その掘削工程と弾性波速度の関係を明かにしようとした。作業工程は掘削作業時間と掘削前後の地形測量から算出した土工量にもとづいて求めた。

表2 林道工事用の土質分類（林道必携により）

土 質
砂及び砂質土
粘性土
礫まじり土
転石まじり土
軟 岩 I
軟 岩 II
中 硬 岩
硬 岩 I
硬 岩 II

表3 調査の結果

要 因 項 目	要 因 カ テ ゴ リ	要因カテゴリ コード
土 質	硬岩 100 % 作業しにくい	1
	硬岩 100 %	2
	硬岩 90 %	3
	硬岩 50 %	4
	軟岩 (I) 50 %	5
	その他	6
弾性波速度 (m/sec)	2900 以上	1
	1900 - 2900	2
	1200 - 1900	3
	1200 以下	4

データ 番号	調 査 作業種	土 質					土質 区分	弾性波 (平均) MAX MIN m/sec			弾性 区分	作業功程(m ³ /h) 岩掘削 全体
		硬	中硬岩	軟岩 1	軟岩 2	土砂						
		%										
M1A2	岩割	30	30	10	10	20	4	2571	2889	2000	3	78.69 24.04
M1A3	岩割	30	30	10	10	20	4	1952	2500	1667	2	98.97 52.90
M1P1	岩割	30	30	10	10	20	4	1952	2500	1667	2	46.68 29.53
M1P2	岩割	30	30	10	10	20	4	1952	2500	1667	2	72.49 43.23
M1P3	岩割	30	30	10	10	20	4	2571	2889	2000	3	70.28 34.48
M1P4	岩割	30	30	10	10	20	4	2571	2889	2000	3	50.29 17.91
M2A1	盤下げ	50	20	10	20	0	5	1711	2800	533	2	14.37 9.79
M2A2	盤下げ	50	20	10	20	0	5	1513	3000	533	2	24.28 16.03
M2A3	盤下げ	50	20	10	20	0	5	1821	3000	1200	2	13.25 8.97
M2A4	盤下げ	50	20	10	20	0	5	1320	1920	960	2	14.89 10.68
M2P2	盤下げ	50	20	10	20	0	5	1779	2400	1200	2	26.92 12.04
M2P3	盤下げ	50	20	10	20	0	5	1843	4800	600	2	17.03 10.01
M2P4	盤下げ	50	20	10	20	0	5	1907	4800	1200	2	21.80 14.14
M2P5	盤下げ	50	20	10	20	0	5	1976	4800	600	2	19.87 9.49
M2P6	盤下げ	50	20	10	20	0	5	2350	3200	1400	3	18.94 12.26
T1A1	開設作業	0	0	0	90	10	3	1952	2500	1667	2	2.71 1.72
T1P2	開設作業	0	0	40	0	60	2	1319	2000	909	2	13.64 8.80
T2P1	法面仕上	0	0	0	100	0	4	1822	2500	1290	2	1.11 0.78
T3A1	開設作業	0	0	50	0	50	3	1089	1923	421	2	37.56 19.90
T3P1	開設作業	0	0	50	0	50	3	644	870	421	1	125.67 41.28
T4A1	開設作業	0	0	50	0	50	3	1327	2500	602	2	56.47 19.86
T4P1	開設作業	0	0	50	0	50	3	653	1087	354	1	36.47 15.42
W1A1	法面仕上	0	0	50	0	50	3	1022	2000	732	2	83.35 23.91
W1P1	法面仕上	0	0	50	0	50	3	893	1373	588	1	41.88 14.80
R1A1	盤下げ	100	0	0	0	0	6	3933	10000	784	4	0.38 0.24
R1P1	盤下げ	100	0	0	0	0	6	4933	10000	2222	4	0.26 0.17
R1P2	盤下げ	100	0	0	0	0	6	2190	6666	784	3	0.14 0.10
R1P3	盤下げ	100	0	0	0	0	6	3053	5000	1875	4	0.37 0.26
R2A1	盤下げ	100	0	0	0	0	6	2243	3846	731	3	0.66 0.45
R2A2	盤下げ	100	0	0	0	0	6	2190	6666	784	3	0.15 0.11
R2P1	盤下げ	100	0	0	0	0	6	4106	10000	784	4	0.53 0.33

3. 結果及び考察

調査結果として31単位（半日1単位）の作業工期と各単位区間の弾性波速度等の関係を表3に示した。一般に弾性波と岩質の間には、弾性波速度は岩質が硬いと速く、軟らかくなるにつれて遅くなる傾向がある。いままでに、弾性波速度とブルドーザのリッパビリティとの関係については多くの調査報告が発表されている²⁾。それによると、おおよそ弾性波速度2600～3000m/secを境にして、それ以下の岩質はリッパによる掘削適用範囲となる。弾性波速度とリッパの作業効率（時間当りの土工量）とは指数関数の関係にあるとされている。現在日本ではダムやトンネルなどのように工事の対象毎にそれぞれの施工主体が各種の岩質判定法（岩盤区分法）を定めている。それらの判定法では弾性波測定だけでなく、亀裂の大きさ、密度および一軸圧縮の結果など目視を含めた判定項目を参考に行っている。岩質区分では一般に弾性波速度3000m/sec前後が硬岩と軟岩の境界とされている³⁾。ブルドーザのリッパ作業とブレーカによる掘削作業では、岩の破壊方法に大きな違いがある。前者はリッパの刃先で引っ掻くようにして岩を剥離する。そのためブルドーザの牽引力の大小が掘削能力を決定し、その牽引方向は現場条件で限定される場合が多い。後者は打撃による振動を岩に加え、破碎するように掘削するものである。掘削能力は岩に打撃振動を与える衝撃力に依り、打撃方向は岩の目に添わず等リッパに比べ自由度が高い。そのため、従来リッパ作業の対象外であった硬い岩の掘削にもブレーカが用いられている。

弾性波速度と地盤の関係について調査基準別にあらわしたのが表4である⁴⁾。

表4 弾性波速度と地盤の関係



弾性波速度を次のように4水準1:2900m/sec以上,2:2900~1900m/sec,3:1900~1200m/sec,4:1200m/sec以下に分類し,作業工期との関係についてみたものが表5である。弾性波速度区分の各水準毎の作業工期,各水準間の差に対する有意差検定の結果を示している。0.1%で高度に有意であると判断できる。図2から明らかなように弾性波速度区分の水準1の場合に工期が最も低く,水準の順位に対応して工期は高くなっている。弾性波速度区分と作業工期両者には強い相関関係($r=0.992$)が認められる。図3は弾性波速度と作業工期の関係を示す。現場によって使

表5 弾性波速度各水準間平均値の差の検定

	功 程 平 均 値	標準誤差	有 意 確 率							
			1		2		3		4	
弾性波 速 度 区 分	1 0.2796	0.3831	1	•	0.0001	**	0.0	**	0.0	**
	2 8.8356	0.2693	2	0.0001	**	•	0.0001	**	0.0	**
	3 12.8993	0.3225	3	0.0	**	0.0001	**	•	0.0001	**
	4 20.6524	0.2748	4	0.0	**	0.0	**	0.0001	**	•

** 0.1%危険率で高度に有意であることを示す

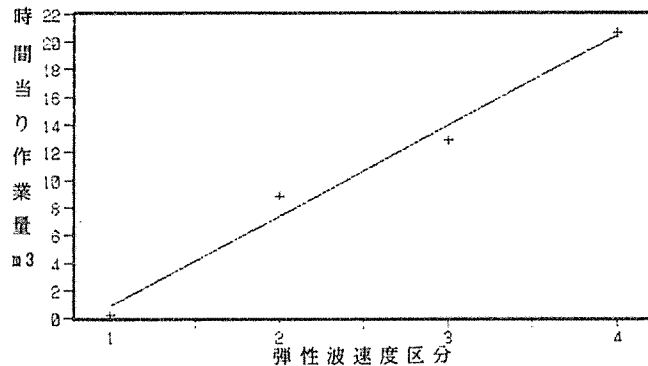


図2 弾性波速度区分と作業工期の関係

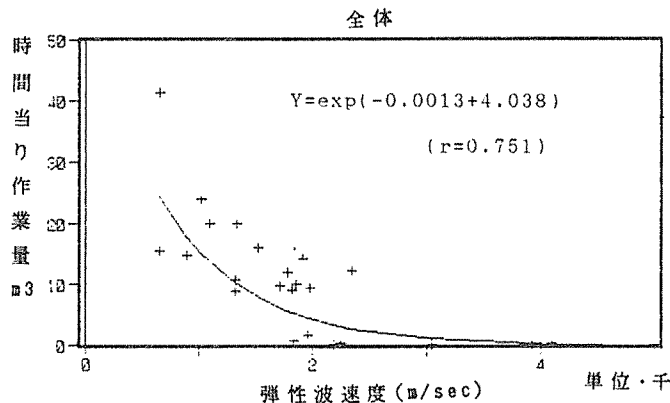


図3 弾性波速度と作業工期の関係

用機械の大きさが多少異なるが、これを無視して、一括分析すると、両者の間には指数関数的な関係があることが判る。図中の実線は指数関数で回帰したものであり、その相関係数は $r=0.751$ であった。

土質は設計書及び観察評価に基づいて6水準に分けた。1:硬岩100%, 作業現場の観察によるとやや作業しにくい地区。2:硬岩100%, 水準1より作業しやすい。3:硬岩90%, 国有林の設計書に従った。4:硬岩50%, 国

有林林道設計書の変更案、出来高土量計算書に従った。5:軟岩Ⅰ50%, 設計書のない民有林、現場担当者の経験により判断したものである。6:軟岩Ⅱ以下、軟らかい岩質のものを含む。土質区分は比較的細かく分類したが、これについてはたくさんの方々の判断及び意見を聞いた上で慎重に作成したものであり、正確に表現されていると考えられる。土質区分と弾性波速度区分のケンドール順位相関係数(KENDALL の τ -b)は0.80である。土質区分と作業工期の関係を図4に示した。土質区分2の工期がかなり低く、土質区分3が逆に1番高くなっている。弾性波速度区分の結果のような明確な関係のないことが判る。このことは今回調査した現場での土質区分が不確実なものであったことを意味していると言えよう。

林道開設作業における土質区分の判定は表層や付近の切取り現場を参考に判定している。そのため、土質区分の定量的な判定基準が作業工期のより正確な推定には必要不可欠な要件となる。林道計画上の路線周辺の地下構造全般を推定し、特殊構造の分布及び深度を把握するために弾性波探査が望ましいとの結果が得られた。和歌山演習林では、バックホウの掘削限界についてブレーカとの比較実験を行った。写真1は調査現場である。この現場については岩盤に明瞭な割れ目があり、この岩盤の岩質は硬くなく、軟らかそうであると判断されたが、しかし弾性波速度が平均

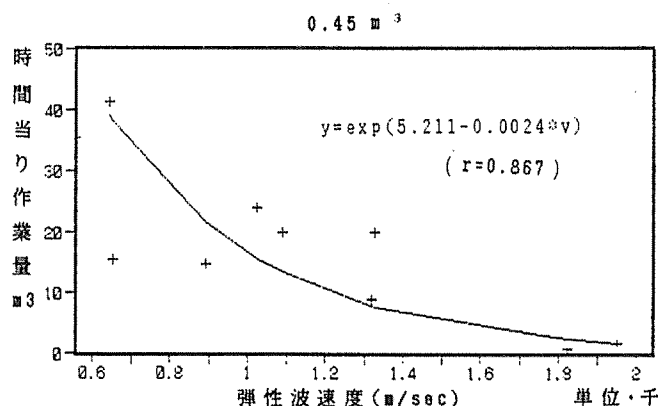


図5 弾性波速度と作業工期の関係 (0.45m³)

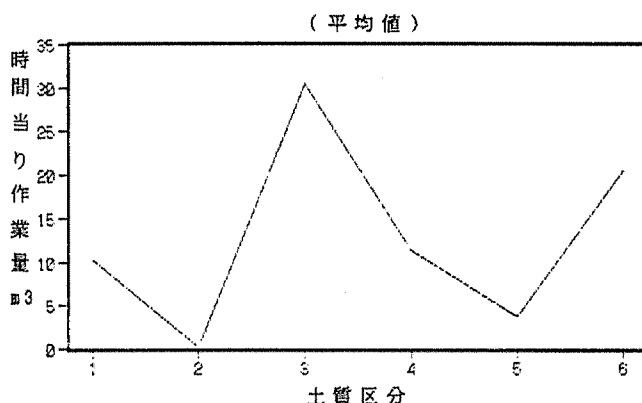


図4 土砂区分と作業工期の関係

2000以上もあり、信じられないほどの速さであった。ブレーカを使用した場合、写真2のようにチゼルを地山にあてるだけでもろく崩れた。ブレーカを使用しなくても、バックホウで十分作業できそうであったのでブレーカの代わりにバックホウを使用した(写真3)。煙をたてながらバケットの爪痕を残すくらい、やはり硬くて掘削できなかった。土質硬度は、一般的に表面より深くなるにつれて硬度が増すが、

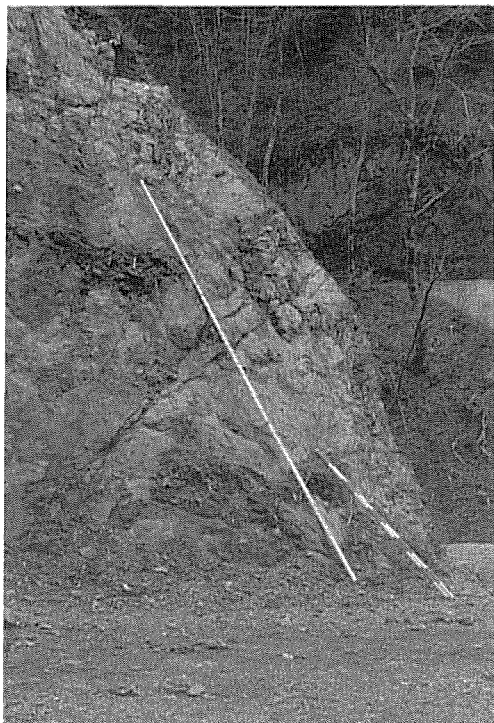


写真1 和歌山演習林での調査現場



写真2 ブレーカによる作業現場



写真3 バックホウによる作業現場

この写真3は弾性波速度が地山表面より深いところの岩石の硬さをよく反映している場合の事例である。

肉眼によって判断される硬岩、軟岩の主観的な土質分類に比べて地山弾性波速度は客観的な測定値であり、土質を正確に反映していると判断される。今回の調査だけでは、結論できないが、設計積算上、ブレーカ掘削に対する岩質分類にあたっては現在使用されている風化程度などによる分類に加えて、さらに地山弾性波速度などによる分類を併用することが必要であろう。

図5は0.45m³のバックホウにブレーカを装着した場合の弾性波速度(V)による作業工期(Y)を予測する式を示した。

$$Y = \exp(5.211 - 0.0024 * V) \quad (r = 0.867)$$

回帰に用いた弾性波速度のデータの範囲が600～2000m/secであるため、一概には言えないが、およそその作業工期の推定に弾性波速度を適用できると考えられる。

4. お わ り に

弾性波速度を林道開設作業の土質区分の一助とするために、作業工期と弾性波速度の関係について考察した。弾性波速度は携帯用の簡易な測定器を用いて、比較的簡単に測定できるから、現場用にその結果を定量的な土質判断のひとつの基準として用いることができそうである。そのために今後更に多くの現場調査を重ね、林道開設における地山弾性波速度、岩片弾性波速度の数値基準を十分に把握し、土質区分の指標を作成して工期調査並びに設計積算に反映させていくつもりである。弾性波探査と硬度計、シュミットハンマーを用いた測定、弾性波速度と硬度指数の比較について次回に報告する。

最後に快く現場調査に応じていただいた大阪営林局、堀川屋林業、大一商店、奈良県庁、京都市役所、京大演習林等の関係者の方々に厚く謝意を表します。

引 用 文 献

- 1) 林道研究会：林道必携（設計編）、日本林道協会、p81、1986
- 2) 新キャタピラー三菱株式会社：機械施工システムを考える－生産性の向上と原価低減、機械施工スクール用テキスト、1989
- 3) 菊池宏吉：地質工学概論、土木工学社、p116～119、1990
- 4) 新キャタピラー三菱株式会社：弾性波速度 測量、機械施工スクール用テキスト、1989

Résumé

We investigated the possibility of a rock classification based on the Seismic wave velocity for the forest road construction. The velocity of Seismic wave was measured by a portable countmeter. It is very convenient to measure at the mountainous areas. As the result, we found the correlation between the velocity Seismic Wave and the efficiency of road construction work. But in this investigation, we did not find the correlation between the rock type classification and the efficiency of road construction work.