

岩盤のポアソン比に関する考察

甲村雄一^{1*}

¹ (株) 竹中工務店技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5)
*E-mail: koumura.yuuichi@takenaka.co.jp

本研究では、まず、岩石の一軸圧縮試験を実施してポアソン比を求める。ポアソン比の値はひずみの増加に伴って大きくなることを示す。次に、弾性波速度で求められる岩盤の動ポアソン比をPS検層によって求め、動ポアソン比の値はせん断波速度の増加に伴い低下すること、また、動ポアソン比の値は大きくばらつくことを示す。さらに、岩盤の初期地圧という観点から岩盤の動ポアソン比に関して考察を行った結果について述べる。

Key Words : Poisson's ratio, rock mass, PS logging, initial rock stress

1. 緒言

ポアソン比は基本的な物性値の一つであるが、岩石や岩盤のポアソン比に関する研究例は少ない。瀬崎ら¹⁾は岩盤物性に関するデータベースを作成し、データベースの項目の一つに岩石のポアソン比を取り上げ、岩石のP波速度 (V_p) との相関を検討している。ばらつきは大きいものの、 V_p が増加するに従って岩石のポアソン比の値は小さくなっていくことを報告している。

大見ら²⁾は含水状態を変えた岩石のポアソン比を、弾性波速度の計測結果から求め、飽和度が上昇するに従ってポアソン比の値は大きくなることを報告している。

村原ら³⁾はレーザホログラフィーを応用した岩石のポアソン比の計測方法を提案している。一軸圧縮試験時にひずみゲージを用いてポアソン比を求める方法に比べて、レーザホログラフィーを応用した方法は、任意の位置のポアソン比を求めることができる点で優れていると報告している。

岩石や岩盤のポアソン比に関する研究が少ない理由の一つとして、以下のことが考えられる。すなわち、岩盤中にトンネルを掘削する場合、掘削によって生じる壁面変位は式(1)で表わすことができる⁴⁾。

$$u_a = \frac{1+\nu}{E} \cdot p \cdot a \quad (1)$$

ここで、 u_a は壁面変位、 ν はポアソン比、 E はヤング率、 p は岩盤に静水圧状に作用している地圧および a はトンネル半径である。壁面変位は $(1+\nu)$ に比例して大きくなる。ポアソン比が0.1と0.2で2倍変化した場合でも $(1+\nu)$ の値は9%程度しか変化しない。このため、トンネル掘削

時の計測管理に使用する壁面変位に、ポアソン比が及ぼす影響は小さく、ポアソン比に高い推定精度は要求されないものと考えられる。

一方、岩盤の初期地圧を考える場合、水平方向の変位を許さない条件における弾性理論解から求められる静止土圧係数は式(2)で表わされる⁵⁾。

$$K_0 = \nu / (1 - \nu) \quad (2)$$

ここで、 K_0 は静止土圧係数である。この場合、ポアソン比の値が0.1と0.2の場合の静止土圧係数は、それぞれ0.11および0.25であり、ポアソン比の値が2倍変化するると静止土圧係数の値は2倍以上変化する。斎藤ら⁶⁾は応力解放法による岩盤の初期地圧の計測を行い、水平方向の最小水平地圧 σ_{MN} は自重のみが作用する岩盤が水平方向に拘束された場合に得られる関係である式(3)にほぼ従うものと考えられることを報告している。

$$\sigma_{MN} = \rho g h \nu / (1 - \nu) \quad (3)$$

ここで、 ρ は岩盤の単位体積重量、 g は重力加速度、 h は土被り厚さである。よって、岩盤のポアソン比を精度良く推定することは、岩盤の初期地圧を把握するうえで有益であると考えられる。

本研究では、岩盤のポアソン比を検討するにあたり、まず、岩盤を構成する岩石の一軸圧縮試験を行いポアソン比を求め、ポアソン比の値はひずみの増加に伴い大きくなることを示す。次に、PS検層で求められた岩盤の弾性波伝播速度 V_p および V_s から、岩盤の動ポアソン比を求め動ポアソン比の値は大きくばらつくことを示す。さらに、岩盤の初期地圧の観点等から考察を行った結果に

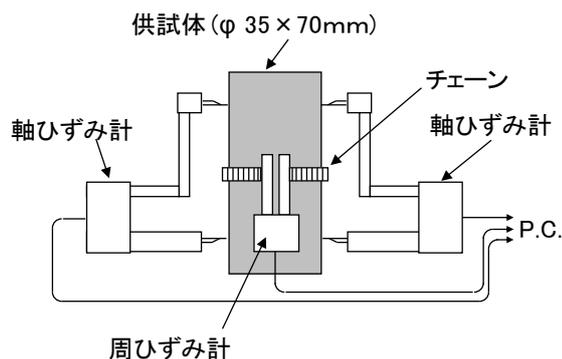


図-1 ひずみの計測方法の概念図

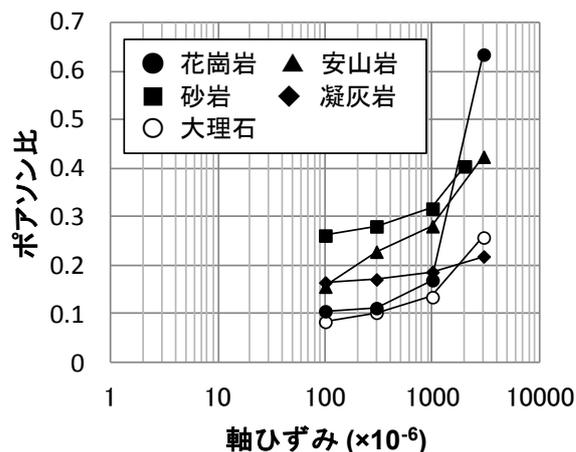


図-2 一軸圧縮試験で得られたポアソン比

表-1 岩石の物理的性質

岩種	産地	単位体積重量 (kN/m ³)	一軸圧縮強さ (MPa)	弾性波速度 V _p (km/s)
花崗岩	茨城県笠間市	25.7	196.8	4.86
安山岩	山梨県甲府市	26.7	256.4	5.30
砂岩	インド	25.2	161.5	5.71
凝灰岩	栃木県大谷町	16.1	15.6	2.76
大理石	イタリア	26.7	159.9	6.31

ついて述べる。

2. 岩石のポアソン比

試験には花崗岩、安山岩、砂岩、凝灰岩および大理石を用いた。各岩石ともブロック状の試料を用意し、異方向性が試験結果に及ぼす影響を排除するためコアドリルで同一方向に円柱供試体を切りだした。供試体の寸法は、凝灰岩を除いては直径35mm、高さ70mmとした。凝灰岩は単位体積重量が他の岩石に比べて小さく、ポーラスな材料であったため寸法効果が試験結果に及ぼす影響を考慮して、直径50mm、高さ100mmと大きな供試体にした。上下両端面の平行度および平坦度は特に留意して整形し、1/100mm以内に収めた。供試体成形後3ヶ月間室内で自然乾燥した後に一軸圧縮試験に供した。

供試体のひずみの計測方法の概念図を図-1に示す。軸ひずみ ϵ_a は測定間隔50mmの軸ひずみ計を対面上に2個取り付け、その平均値を軸ひずみとした。周ひずみ ϵ_c は供試体の周囲にチェーンを巻きつけ、チェーン端部の変位から、供試体が同心円状に均一に変形しているものと仮定して求めた。ポアソン比は式(4)で求めた。

$$\nu = -\epsilon_c / \epsilon_a \quad (4)$$

一軸圧縮試験は応力速度一定の条件で実施した。応力速度は凝灰岩を除いては0.1MPa/s、凝灰岩では0.01MPa/sとした。

それぞれの岩石の産地、単位体積重量、一軸圧縮強さおよび弾性波伝播速度 (V_p) の値を表-1に示す。また、ひずみレベルごとにポアソン比の値を求めた結果を図-2に示す。ポアソン比の値は各岩石ともひずみが増加するに従い増加することがわかる。これは、ひずみの増加とともに微視的な破壊が進行し、周方向に変形しやすくなるためと考えられる。後述するPS検層から求められるポアソン比は、ひずみレベルが小さい領域の値と考えられる。今回試験を実施した5種類の岩石ではひずみレベルが小さい領域のポアソン比の値は0.1~0.3の範囲であった。

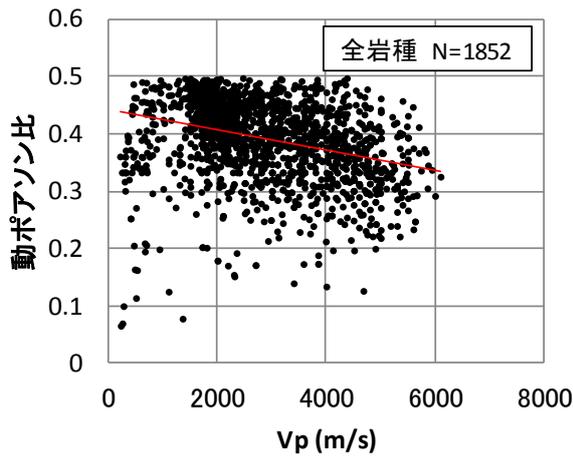
3. 岩盤の動ポアソン比

(1) 算出方法

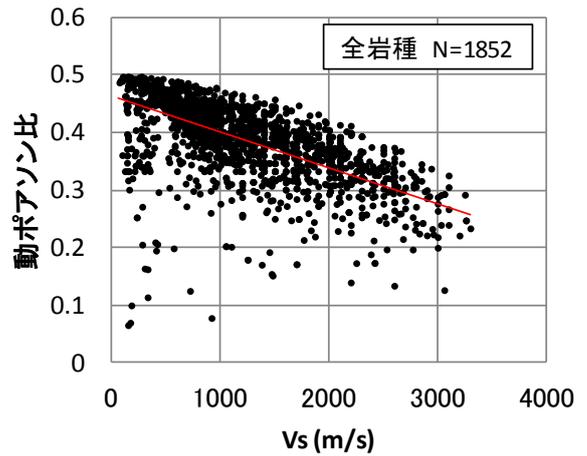
2章では一軸圧縮試験から求めた岩石のポアソン比に関して検討した。岩盤については一軸圧縮試験を行ってポアソン比を計測するためには巨大な供試体で試験を行わねばならず、実用的でない。一方で、PS検層は比較的簡単にデータを取得でき、PS検層から得られる V_p および V_s に基づく動ポアソン比は、式(5)により求められる⁷⁾。

$$\nu_d = \frac{(v_p/v_s)^2 - 2}{2((v_p/v_s)^2 - 1)} \quad (5)$$

ここでは岩盤の動ポアソン比について検討する。検討に用いたデータは、防災科学技術研究所が公開しているKIK-NET観測点のPS検層のデータ⁸⁾であり、692地点のデータから動ポアソン比を算出した。上記地点のうちデータ数が比較的多かった、花崗岩、安山岩、砂岩、凝灰岩、泥岩、頁岩、片岩、花崗閃緑岩および粘板岩の9種類の岩盤のデータを整理した。



(a) V_p と動ポアソン比との関係



(b) V_s と動ポアソン比との関係

図-3 弾性波速度と動ポアソン比との関係

(2) 算出結果

全岩種の動ポアソン比の値を求めた結果を図-3(a), (b)に示す。瀬崎ら¹⁾はばらつきが大きいものの V_p が増加するに従って岩石のポアソン比の値は小さくなっていくことを報告している。表-2には図-3(a), (b)に示した V_p および V_s と動ポアソン比 ν_d との関係を最小自乗法で直線近似した式と相関係数を示した。本研究でも瀬崎ら¹⁾と同様の傾向が得られたが、今回の岩盤のデータでは V_p と動ポアソン比との相関は低く、 V_s の方が相関が強いことがわかる。

岩盤のような地盤材料は、圧縮応力が増加していくとせん断破壊をする。岩盤はせん断破壊に先立ちせん断変形を伴う。圧縮応力が小さい領域においてもせん断変形が生じ、作用する応力に垂直な方向のポアソン比分のひずみが発生するものと考えられる。せん断波速度 V_s は微小なせん断変形時の弾性波伝播速度であることから、粗密波であるP波に比較して動ポアソン比との相関が強いものと考えられる。

岩種ごとに V_s と動ポアソン比との関係を求めた結果を図-4(a)~(i)に示す。各岩石とも V_s が大きいほど動ポアソン比の値が小さくなる傾向がみられる。動ポアソン比の値に岩種が及ぼす影響は特に確認できず、各岩種ともほぼ同様に比較的大きなばらつきを示すことがわかった。また、動ポアソン比の値はほぼ0.2~0.5の範囲でばらついていることがわかる。

4. 考察

(1) 動ポアソン比のばらつき

3章では V_s の増加に伴い動ポアソン比は低下していくものの、動ポアソン比の値のばらつきが大きいことを示した。ここでは同じ地盤材料である土についても同様の

表-2 弾性波速度と動ポアソン比との関係式

	関係式	相関係数
V_p	$\nu_d = -0.0000177V_p + 0.442$	-0.31
V_s	$\nu_d = -0.0000631V_s + 0.466$	-0.64

傾向があるかを調べてみた。検討に用いたデータは防災科学技術研究所が公開しているK-NET観測点のPS検層のデータ⁸⁾であり、1043地点のデータから動ポアソン比を算出した。上記地点のうちデータ数が比較的多かった、砂質土、礫質土、シルトおよび粘性土の4種類の土のデータを整理した。全種類の土の動ポアソン比の値を求めた結果を図-5(a)に示す。動ポアソン比の値は図-3(b)と同様に大きくばらつくことがわかる。図-3(b)の岩盤の場合には横軸は4000m/sまでで図を作成したが、図-5(a)の土の場合には横軸は1500m/sまでと岩盤に比べて土は弾性波伝播速度が小さい。また、K-NETの土質データは、深度20mまでと浅く、含水飽和地盤と不飽和の地盤のデータが混在していると考えられる。ここでは、含水飽和地盤のデータを抜き出す目的で、 V_p が水の V_p である1500m/s以上のデータに限定しデータを整理した。整理した結果を図-5(b)に示す。図-5(a)に比較してデータのばらつきが小さくなった。よって図-5(a)のばらつきの原因は不飽和地盤のデータを含んでいたためと考えられる。

図-5(b)に示した含水飽和地盤では、 V_s が500m/sまではばらつきは小さく、500m/sを超えると急激にばらつくようになる。これは土粒子の結合力に起因しているものと推察される。すなわち、 V_s が小さい土では土粒子同士の結合力は岩盤に比較して弱く、一方向に圧縮されると土粒子間にずれ変形を生じ、圧縮された方向に垂直な方向へ土粒子が容易に移動すると考えられる。このため、水

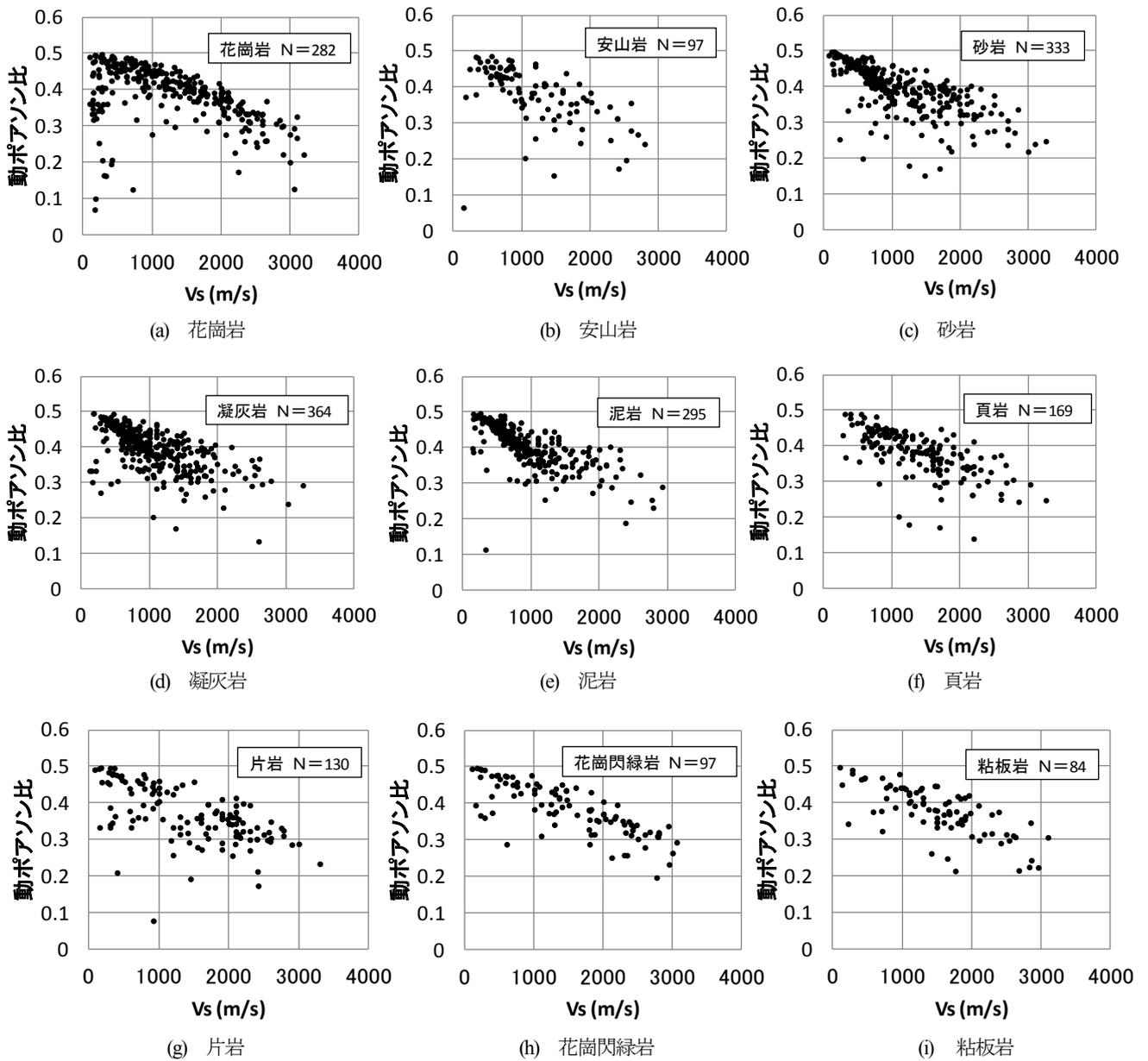


図-4 せん断波速度と動ポアソン比との関係

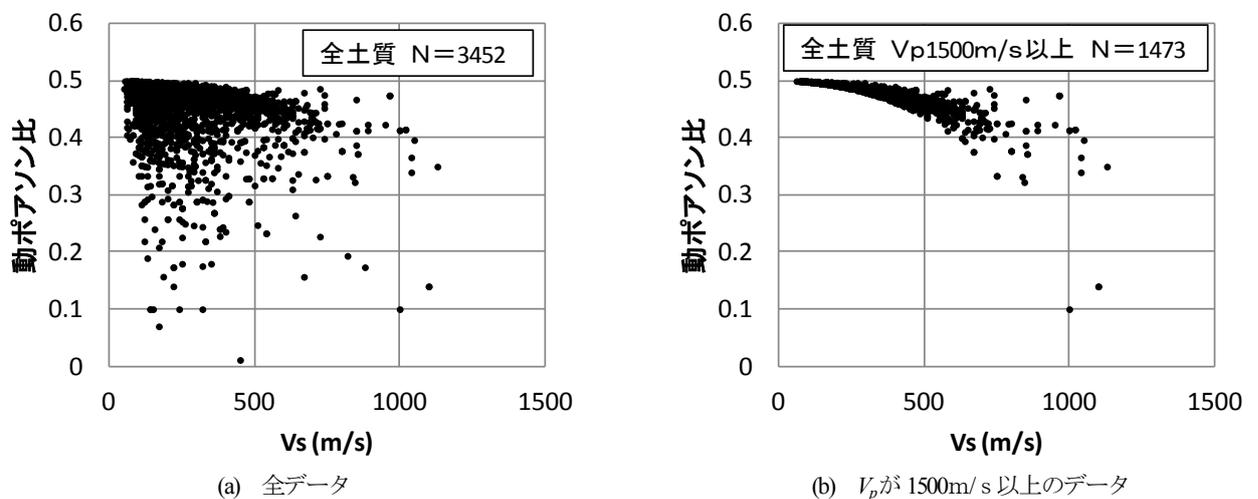


図-5 土のせん断波速度と動ポアソン比との関係

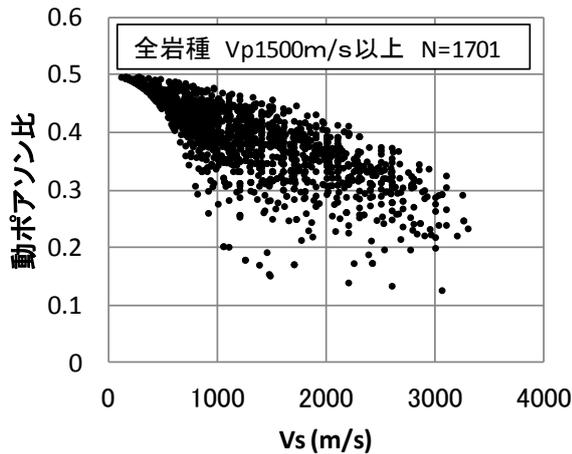


図-6 深度 50m以深の岩盤のせん断波速度と動ポアソン比との関係

のポアソン比である0.5に近い値を示すとともに、ばらつきが小さいものと考えられる。一方、 V_s の値が500m/sを超えると、岩盤ほど強固ではないにして、土粒子間にセメンテーション作用が生じるようになり、上述したような圧縮された方向に垂直な方向への土粒子のずれ変形が抑制されると推察される。このため、動ポアソン比の値が小さくなるとともに、セメンテーションの強弱によりポアソン比の値にばらつきが生じるものと考えられる。

図-3(b)に示したKIK-NETのデータは、不飽和岩盤のデータも含まれている。 V_p が1500m/s以下のデータを除外して図を書き直した結果を図-6に示す。 V_s が小さい領域ではばらつきは小さくなり、この領域でのばらつきの原因は不飽和地盤のデータを含んでいたことが考えられる。

(2) 初期地圧の観点からの動ポアソン比のばらつき

前述したように、斎藤ら⁹⁾は応力解放法による岩盤の初期地圧の計測を行い、水平方向の最小水平地圧は自重のみが作用する岩盤が水平方向に拘束された場合に得られる関係である式(3)にほぼ従うものと考えられることを報告している。ここでは、長ら⁹⁾が報告している応力解放法による初期地圧の計測結果からポアソン比を逆算し、3章で求めた動ポアソン比との比較を行う。

61地点の計測点において測定された水平方向の最小応力を鉛直応力で除して静止土圧係数を求めた結果を図-7に示す。求められる静止土圧係数は大きくばらつき1以上の値を示すデータもある。これは水平方向に地殻変動等による造構応力が作用していることが主な要因であろう。ここでは造構応力の影響が小さいと考えられる静止土圧係数が1以下のデータに関して、式(2)によりポアソン比を逆算した結果を図-8に示す。図に示した直線は最小自乗法により直線近似した直線である。ばらつきが大きい、これは初期地圧はポアソン比の値だけで単純

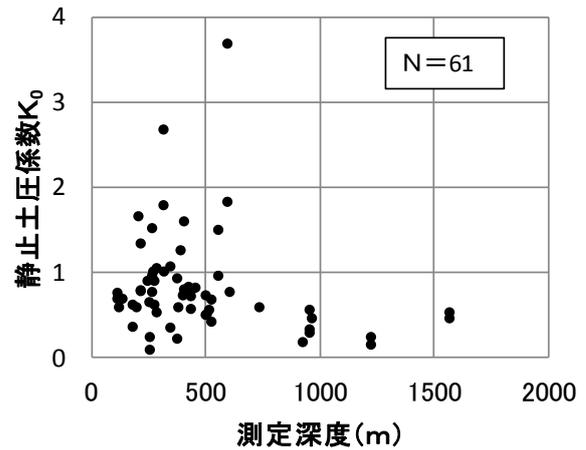


図-7 深度と静止土圧係数との関係

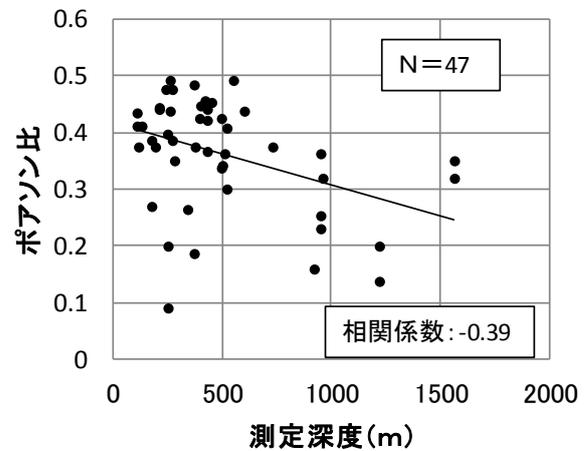


図-8 深度とポアソン比との関係

に決まるのではなく、造構応力等の影響も受けることを表しているものとする。測定深度が深くなるに従ってポアソン比の値は小さくなる傾向がみられるが、一般的に深度が深いほど岩盤は風化による劣化が小さく、 V_s が大きくなる場合が多いことが原因の一つと考えられる。

図-3(b)と比較するとデータ数は圧倒的に少ないため相関係数も小さな値であるが、近似直線は右下がりの直線であることが同じである。また、動ポアソン比の値は0~0.5の範囲で同じようにばらついている。このことから、3章で述べた岩盤の動ポアソン比は静止土圧係数を求める場合のような低応力下におけるポアソン比と大きく異なる値ではないものと推察する。また、造構応力の影響が小さい場合には、静止土圧係数は水平方向に変位が拘束された場合の式(2)の関係を用いて概略の推定ができるものと推察する。

5. 結論

本研究では主に岩盤の動ポアソン比に関して検討した。本研究で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 一軸圧縮試験によって求められるポアソン比の

値は、ひずみの増加に伴い値が増加する。

(2) PS検層から求められる岩盤の動ポアソン比は、岩盤の V_p の増加に伴い低下する。また、ばらつきが大きい。

(3) V_p が1500m/s以上の土質地盤で、 V_s が500m/s以下の領域では、動ポアソン比のばらつきが小さい。これは、 V_s が小さい土では土粒子同士の結合力は岩盤に比較して弱く、一方向に圧縮されると土粒子間にずれ変形を生じ、圧縮された方向に垂直な方向へ土粒子が容易に移動するためと考えられる。このため、水のポアソン比である0.5に近い値を示すとともに、ばらつきが小さいものと考えられる。一方、岩盤の動ポアソン比のばらつきが大きい原因の一つとして、鉱物粒子間の結合力（セメンテーション）の強弱の影響が考えられる。

(4) 岩盤の初期地圧測定結果から推定した岩盤のポアソン比のばらつきは、データ数が少ないものの岩盤の動ポアソン比のばらつきと類似していることから、岩盤の動ポアソン比は応力レベルが小さい領域におけるポアソン比とほぼ等しいものと推察される。また、岩盤の静止土圧係数は式(2)の関係がほぼ成り立つものと推察される。

参考文献

- 1) 瀬崎満弘, Ömer AYDAN, 市川康明, 川本帳眺万: 岩盤データベースを用いたN A T Mの事前設計のための物性値, 土木学会論文集, 第 421 号, IV-13, pp.125-133, 1990.
- 2) 大見美智人, 井上正康: 含水状態の変化に伴う岩石供試体のポアソン比の変化, 熊本大学工学部研究報告, 第 30 号, 第 2 号, pp.95-100, 1981.
- 3) 村原正隆, 橋本文作, 萩原義一: レーザホログラフイーを応用した岩石のポアソン比およびヤング率の測定, 日本鉱業会誌, Vol.92, No.1059, pp.333-338, 1976.
- 4) 日本材料学会編: 岩の力学基礎から応用まで, 丸善, pp.568-569, 1993.
- 5) 畑中宗憲, 加倉井正昭: 建築基礎構造, 東陽書店, pp.149-151, 2004.
- 6) 斎藤敏明, 石田毅, 寺田孚, 田中豊: 実測結果に基づく我が国の地下岩盤内の初期地圧状態の検討, 土木学会論文集, 第 394 号, III-9, pp.71-78, 1988.
- 7) 関東地質調査業協会: 新編ボーリング孔を利用する原位置試験についての技術マニュアル, p.280, 1995
- 8) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/db/index.html?all>
- 9) 長 秋雄, 国松 直, 金川 忠, 藤井真希, 横山幸也, 小川浩司, 田仲正弘: 我が国における地下岩盤内の初期地圧状態—応力解放法による実測データに基づく—, 地質調査研究報告, 第 60 号, 第 7/8 号, pp. 413-447, 2009.

STUDY ON POISSON'S RATIO OF ROCK MASS

Yuichi KOHMURA

In this study, first a uniaxial compression test of rocks was carried out, and the Poisson's ratio was measured. It was found that the value of the Poisson's ratio increases with strain level. Secondly, when the dynamic Poisson's ratio of the rock mass was measured from elastic wave velocity by PS logging, it was found that the value of the dynamic Poisson's ratio decreases with the increase in shear wave velocity, and the dynamic Poisson's ratio of the rock mass varies greatly. In addition, I describe the result of the research regarding the dynamic Poisson's ratio from the viewpoint of the initial stress of rock mass.