

岩盤の変形に関する係数の統一的評価に関する研究(1) —序論および各種試験法による変形挙動の実際—

武内俊昭

深田地質研究所

Study on Equivalent Evaluation for Rock Deformation Coefficient
obtained by various Testing Methods. (1)
-Preface and Actual Behavior of Each Testing Method-

TAKEUCHI Toshiaki
Fukada Geological Institute

要旨：同一岩盤に対して行われる変形試験の結果が、その試験方法の違いによって異なることがしばしばある。この研究ではその違いをとりあげ、それら相互の関係について考察する。本研究(1)では、従来筆者らが関係した実際の結果から、さまざまな試験法で得られた変形挙動や異なる試験法による差異などを示し、それらの特徴、差異を与える要因などについて考察する。

ここで対象とした試験法は・等分布法による孔内載荷試験、円形剛体平板載荷試験、P S 波速度から求められる変形係数、岩石供試体の変形試験、そして実際の構造物の荷重によって生じる変形から算出される変形係数などである。

キーワード：岩盤、変形試験法、変形係数

1.序論

岩盤上あるいは岩盤の中にダムやトンネルなどの構造物を構築する場合、与える荷重に対する岩盤の変形を予測することは設計上必要な事項である。このため室内や原位置で岩盤材料に対する試験を実施して設計上必要な変形に関する定数すなわち”変形係数”を求めることが日常行われている。

本研究においては、さまざまな試験法から求められる変形に関するいろいろな係数を総称して“変形係数”とよぶこととする。

これらの変形係数を求める試験法には多くの種類がある。そしてこれらの試験法は試験に供される試験体のサイズ、試験体の形状、試験時間、加える荷重の形態などさまざまな条件下で行われてい

る。同一岩盤に対して行われた幾種類かの変形に関する試験の結果が同じにはならないことがしばしばである。試験方法が異なった場合、それによつて異なる変形係数が得られるのでは設計上困難が生じひいては安全かつ経済的な建設の妨げともなる。

岩盤材料が等方均質な完全弾性体であるならば、サイズや形状、試験時間の如何にかかわらず試験によって同じ変形係数が得られるはずである。しかし、岩盤は完全な弾性体ではなく、塑性や粘性を併せ持ち、また割れ目などを含む不連続体である。

本研究では、色々な変形試験法による実際の測定結果を検討し、また理論的な考察も加えて異なる試験法相互の関係を出来る限り明らかにする。そして実際の構造物の設計に用いる変形係数を試

験方法の違いを越えて統一的に評価することを研究した。

本報では、研究（1）として各種試験法による変形係数がどのような挙動を示すのか、その実際にについて主として著者らの研究成果をもとに整理した結果を述べる。

1.1 岩盤の変形試験結果に関する従来の研究の概観

岩盤の変形係数を求めるため従来から行われている試験方法は、いわゆる室内試験と言われている岩石試験を含めると非常に多くの種類がある。それらはおおよそ表-1のように整理される。

表-1 さまざまな試験法による変形係数の測定方法

	静的試験	動的試験
室内試験	一軸圧縮試験 三軸圧縮試験	振動三軸圧縮試験 動的単純せん断変形試験 共振法試験 ねじり振動試験
原位置試験	平板載荷試験 孔内載荷試験	動的平板載荷試験 弾性波速度測定
動態測定	変位、ひずみ測定から	

色々な試験方法から得られる岩石や岩盤の変形係数相互の関係についての研究は1960年代から見られる。例えば小野寺（1963）¹⁾は原位置と岩石供試体それぞれのP波速度値から計算される弾性係数が異なるのは原位置岩盤に存在する割れ目の影響であるとし、岩盤と岩石両方の測定結果から岩盤の良好度なる概念を提唱している。また、桑原ら（1979）²⁾は時間に対して荷重を加えるrateすなわち載荷速度を3オーダー程度変えた試験から変形係数が変化する現象を報告している。

M.Rochaら（1956）³⁾は孔内載荷試験において引っ張り成分を含む応力状態から割れ目が発生し、それを考慮に入れた変形係数を提唱した。また、武内ら（1977）⁴⁾はM.Rochaらの理論をもとに孔内載荷試験と平板載荷試験による変形係数の違いを説明し、両者の関係を理論的にも実際的にも説明している。そして、それによって平板載荷試験にくらべて簡便な孔内載荷試験から得られた変形係数を大型基礎などの設計に用いる変形係数に換算する一つの方法を提唱している。桑原ら（1979）はさらに割れ目のほとんど見られない軟岩において数種類の試験法によって変形係数を求め、その差異が与えるひずみレベルの違いである程度説明できることを示した。またその後、金ら（例えば1991）⁵⁾は岩石供試験体を用いて微小ひずみレベルにおける静的変形係数を精度よく求める試験法を開発した。そして原位置試験や室内供試験による測定を通して変形係数はひずみレベルによって異なると発表している。一方、吉中ら（1990）⁶⁾は供試験体の寸法による変形係数の違い、いわゆる寸法効果について発表している。

さらに、新田ら（1998）⁷⁾は、実際の橋梁基礎の沈下測定の結果から得られる基礎岩盤の変形係数と調査時点での測定された孔内載荷試験および弾性波測定から得られた変形係数を比較検討して、橋梁基礎の合理的設計についての提言を行っている。

以上に述べたような研究は、いずれも試験法によって、得られる変形係数が異なるという現象を解明しようとするものであり、その目的とするものは実際の構造物の設計にあたってどの試験法による変形係数を用いるべきか、あるいはどのような換算を施して設計に用いる値を決めるべきかを明らかにしようとするものであると云える。これらの内容を考察してみると、このような変形係数の差異は以下のようなさまざまな要素が関係

岩盤の変形に関する係数の統一的評価に関する研究(1)

していると考えられる。

- (1) 地盤に与える応力状態の違いによるもの
- (2) 与えるひずみの大きさによるもの
- (3) 割れ目など不連続面の存在によるもの
- (4) 試験対象物の大きさすなわち寸法効果によるもの
- (5) 荷重をあたえる時間rate(速度)の差異によるもの
- (6) 試験体がおかれた応力環境(拘束圧)の違いによるもの

上にのべた多くの既往の研究は、このような色々な要因のいずれかの側面からとらえたものであると云える。

1.2 岩盤の変形試験と応力-変形に関する理論

一般的な岩盤の変形係数を求める試験は、そのほとんどが弾性論に立脚している。すなわち、岩盤を完全な弾性体と扱っているものが殆どである。しかし、岩盤を完全な弾性体とした場合には変形係数が”ひずみ”的大きさによって異なることも、対象とする岩盤に働く応力が圧縮であっても引っ張りであっても、また力を加える時間的要因によっても変形係数は変わらないことになる。

表-1に示す試験法の中から主な変形試験法について、それぞれの試験結果から変形係数を実際に算出している理論式を示すと以下の表-2の通りである。

これらの各式は岩盤を弾性体と扱っており弾性論のもとで一つにつながっている。したがって相互に変換が可能でありここで用いられている変形係数 E は同一のものでなければならない。

しかるに、同一岩盤における実際の試験ではこれらの変形係数 E は同一とはならない。これは岩盤が完全な弾性体として挙動していないことを表している。

表-2 代表的な変形試験法と変形係数の算出式

試験法	変形係数を求める理論式
一軸圧縮試験 三軸圧縮試験	$E = (pl/s)\Delta l$
平板載荷試験 (等変位試験)	$E = (1 - \nu^2) \pi a \frac{\Delta s}{\Delta \delta}$
孔内載荷試験 (等分布載荷)	$E = (1 + \nu)r_0 \frac{\Delta p}{\Delta r}$
P,S速度測定	$E = \rho V_p^2 \left(\frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \right)$

E : 変形係数, P : 荷重, l : 供試体の長さ, S : 供試体の断面積, Δl : 長さの変化, ν : ポアソン比, a : 加圧板の半径, Δs : 荷重増, $\Delta \delta$: 加圧板の沈下量 Δp : 孔壁に加える応力, Δr : 孔径の変化量, ρ : 岩盤の密度, V_p : P波速度

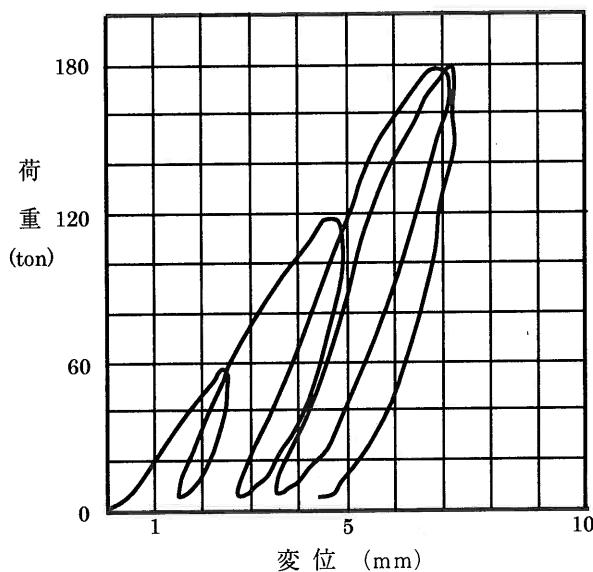
2. 各種変形試験法による変形挙動の実際と挙動に与える要因

以下に、実際の変形試験から得られた結果から1.2に述べたような変形係数が同一とならない事実について見ることにする。

2.1 繰り返し荷重による変形係数について

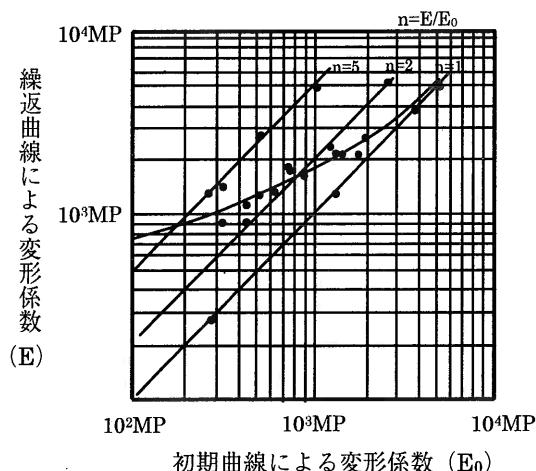
同じ岩盤における同一の変形試験においても変形係数が異なることが得られる例は、日常多く経験するところである。

図-1は、花崗岩の岩盤において平板載荷試験によって得られる応力-変位曲線の例である。図では縦軸の荷重レベルが60, 120, 180 tonのところでそれぞれ荷重を0に戻し、再び次の応力レベルに加圧していくパターンが示されている。応力-変位曲線が最初の曲線（以後、初期曲線とよぶ）勾配P1～P2と繰り返し再荷重の曲線（以後、繰返曲線とよぶ）勾配R1～R2では明瞭に異なり、繰り返しの曲線の勾配が大きいことがわかる。さら

図-1 平板載荷試験の応力-変位曲線例⁸⁾

に、荷重を減少させても加圧の過程で示される曲線に沿って戻ることではなく、荷重を0に戻しても変位は最初のところには戻らずに、かなりの変位量を示すいわゆる残留変位がみられる。

このような初期曲線と繰返曲線から求めた変形係数の関係をやや多くの試験地点について求めプロットしたものを図-2に示す。横軸は初期曲線勾配、縦軸は繰返曲線の勾配である。図をみるとばらつきはあるものの変形係数が小さな領域では、繰返曲線と初期曲線の変形係数の比がかなり大き

図-2 応力履歴による変形係数の差異⁸⁾

く5に近いものも見られる。この傾向をみると変形係数が大きくなるにつれて両者の比nが1に近づいていることがわかる。

このことは、岩盤が完全弾性体としての挙動を示していないことを示しており、変形係数が大きい岩盤では比が1に近づき、弾性体としての挙動に近づくことを示しているとみるとことが出来る。

2.2 平板載荷試験と孔内載荷試験の関係

図-3は、同一岩盤で実施された平板載荷試験と孔内載荷試験による変形係数の関係を示したものである。横軸は孔内載荷試験、縦軸は平板載荷試験と孔内載荷試験との比をとっている。図-3から変形係数がほぼ1000MPaを境にして変形係数の値が小さくなるにつれて両者の比が大きくなる、つまり平板載荷試験の値が大きくなることが伺える。反対に1000MPaを超える岩盤では、両者の差は少なくほぼ1の付近にばらついている。つまり、図-2で見られた傾向のように、変形係数が大きくなり岩盤の挙動が弾性体に近づくにつれて、図-3においても、この両者の試験方法による変形係数の違いが少なくなる傾向がうかがえる。

2.3 孔内載荷試験とPS速度結果の関係

同一堆積軟岩で実施した孔内載荷試験とボーリング孔を使用したPS弹性波速度検層の結果からそれぞれ求められた変形係数の関係を示したものを見ると図-4に示す。

孔内載荷試験の結果から求められる変形係数を E_{sb} 、PS速度からの変形係数を E_{ps} とすると、おおよそ

$$E_{ps} = 8E_{sb}$$

の関係があることが分る。

図-4で対象としているのは、孔内載荷試験の変形係数が1000MPaより小さい範囲の岩盤であり、図-3と対比してみると、平板載荷試験との差異が

岩盤の変形に関する係数の統一的評価に関する研究(1)

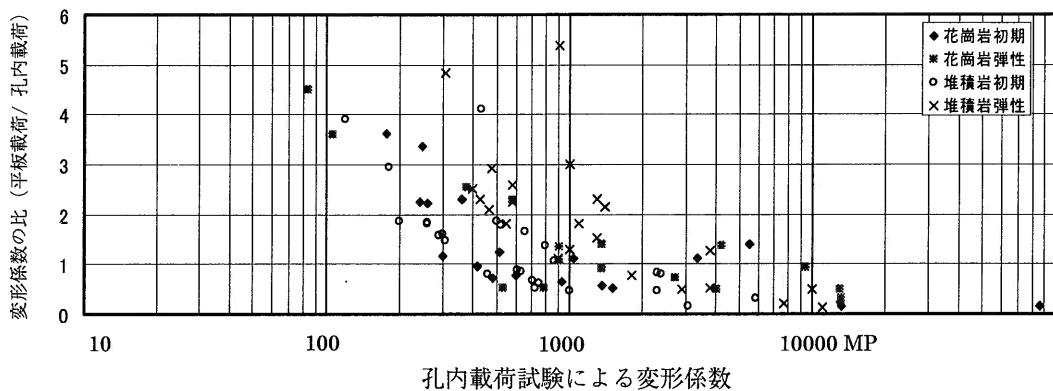


図-3 試験方法による変形係数の違い(1)⁹⁾

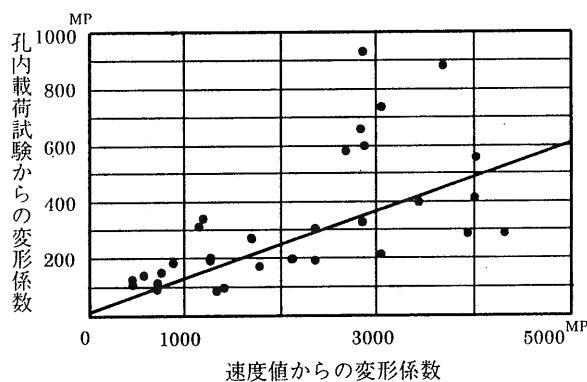


図-4 試験方法による変形係数の違い(2)⁷⁾

現れてくる岩盤に相当する。つまり、このような岩盤においては、速度からの変形係数 E_{ps} および平板載荷試験による変形係数 E_{pl} そして孔内載荷試験による変形係数 E_{sb} の値に差がみられ、次の大小関係がみられる。

$$E_{ps} > E_{pl} > E_{sb}$$

2.4 拘束圧による変形係数の変化

図-5は、堆積軟岩の供試体の変形係数と試験時に加える拘束圧との関係を示したものである。図において拘束圧が増加するのにしたがって変形係数が増加していることが示されている。また、これらの関係は、岩石の種類によって異なり、より変形係数の小さな明石層群は増加の率が大きく、それに比べて変形係数が大きい神戸層は増加率が

小さい。

この現象も弾性体としての挙動ではないことを示している。

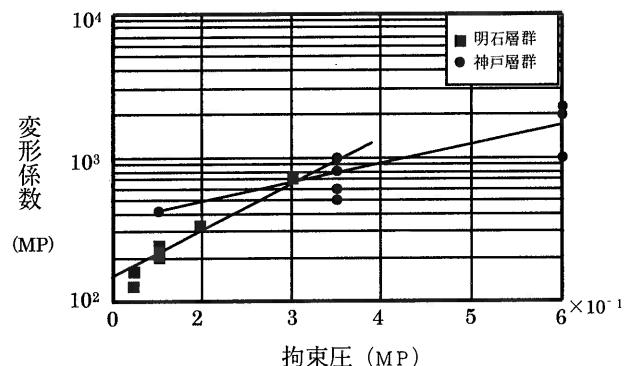
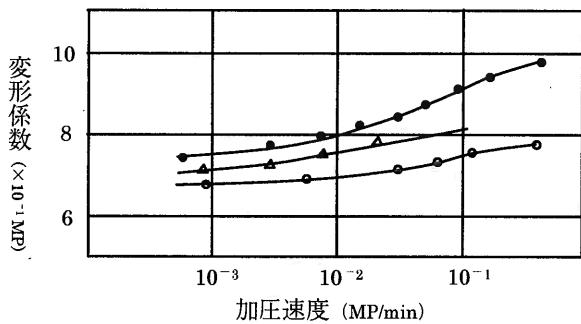


図-5 変形係数の拘束圧による違い⁷⁾

2.5 加圧速度の違いによる変形係数への影響

図-6は、泥質軟岩で実施した原位置クリープ試験において段階的に荷重を加える場合の荷重保持時間を持つことによる、みかけ加圧速度の違いが変形係数に与える影響を示したものである。

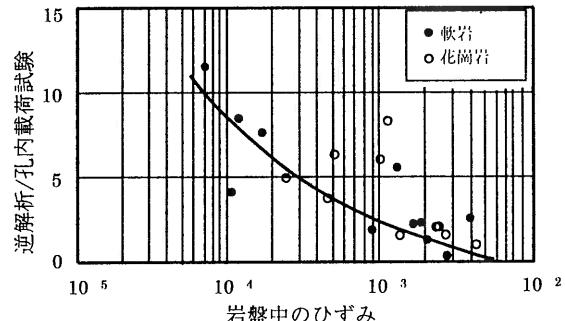
10^{-3} から約3オーダーの加圧速度の増大で、変形係数に30%程度の増加がみられる。つまりこのような試験条件の変化によっても、変形係数に差異がみされることを示している。

図-6 加圧速度とみかけ変形係数との関係²⁾

2.6 動態測定による変形係数と孔内載荷試験との関係

実構造物の挙動から求めた基礎岩盤の変形係数と同じ岩盤内で調査時に実施された孔内載荷試験による変形係数との比を求め、岩盤内に発生しているひずみの大きさとの関係で示したもののが図-7である。

ひずみが $10^{-5} \sim 10^{-4}$ のオーダーの領域内では、その比が5~10と大きな違いを示しているが、ひずみが大きくなるにつれて、その比が1に近づいていることがわかる。

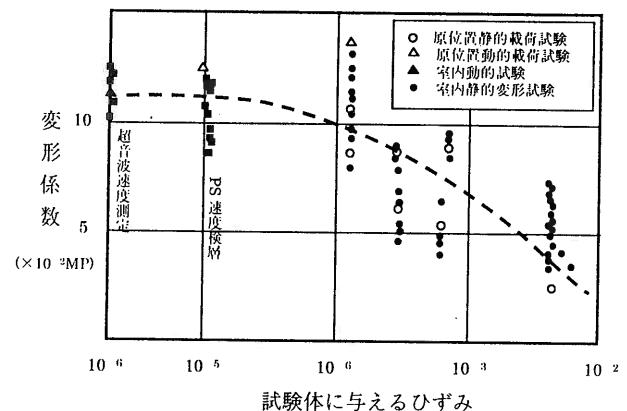
図-7 ひずみによる変形係数²⁾

2.7 各種変形試験法によるひずみと変形係数の関係

新第三紀の泥質岩で実施した数種類の変形試験の結果で得られた変形係数を、各試験法が岩盤あるいは岩石に与えるひずみ大きさとの関係でプロットした結果図-8を示す。

ここで使われた変形試験法は、岩盤に与えるひずみの小さなものから順に示すと以下の通りである。

室内超音波PS速度測定、PS速度検層、動的平板載荷試験、室内三軸試験、孔内載荷試験、平板載荷試験、

図-8 各種試験法による変形係数のひずみレベルによる比較²⁾

これらの試験法による変形係数には、差がみられるが、それを岩盤に与えるひずみの大きさで整理すると図から読み取れるように、ひずみが大きくなるにしたがって変形係数が小さくなり図に示す曲線でその傾向を示すことができる。

この結果によると、変形係数の値の幅は、ひずみレベルが最も大きい試験法が示す値から約5倍の範囲にあることが伺える。

このように同一の岩盤に対して異なる変形係数が得られることは、岩盤が完全な弾性体では扱えないことを示している。

3. 各種試験法による岩盤の変形挙動に関する要因

以上に実例を示してきたように、岩盤の変形挙動は、同じ岩盤に対しても試験方法の違いにより

岩盤の変形に関する係数の統一的評価に関する研究(1)

さまざまな挙動を示し、得られる変形係数も異なることがわかる。したがって、完全な弾性体としての挙動ではなく、いろいろな要因が作用していることが伺える。

これらの違いを整理すると次の通りである。

- ①加圧・徐加の繰り返しによる。つまり、他の条件はまったく同じで単に、荷重を加える回数によって変形挙動が変わる。
- ②試験方法の違いによるもの。すなわち加圧によって岩盤にあたえる応力機構が異なるという要因。
- ③拘束圧の違いによる。つまり、試験が行われる初期状態としての応力状態が異なる。
- ④加圧速度の違い。
- ⑤与えるひずみの大きさの違い。
- ⑥試験体の大きさによるもの。2.6で述べたような動態測定は、直径50～80mのサイズによる構造物基礎の変位挙動を測定するもので、孔内載荷試験のサイズ（直径0.066m）と比較すると

表-3 実際の試験結果と変形に与える要因

図	関係する試験法等	関係する要因	地質の種類
図-1	平板載荷試験	繰り返し効果、不連続面の存在	花崗岩
図-3	平板載荷試験と孔内載荷試験	加圧機構の差異、ひずみの違い	花崗岩、堆積岩
図-4	孔内載荷試験とP-S速度測定	加圧機構の差異、ひずみの違い	堆積軟岩
図-5	室内三軸圧縮試験	拘束圧の違い	泥質軟岩
図-6	室内三軸圧縮試験	加圧速度の違い	泥質軟岩
図-7	動態測定と孔内載荷試験	加圧機構の差異、ひずみの違い、寸法効果	堆積軟岩
図-8	各種試験法	加圧機構、ひずみ	泥質軟岩

3桁の違いがある。つまり、寸法効果の要因が考えられる。

図-1～図-8のような実際の挙動が示す変形係数の違いを、上記の要因によって整理すると表-3のようになる。表に見られるように、試験法によつていろいろな要因が場合によっては、複合的に絡んで実際の変形挙動つまり応力～変位曲線が得られるものと考えられる。

研究(2)では、これらの要因がどのように関与しているかを検討し、試験法相互の関連について考察を加えたい。

引用・参考文献

- 1) Onodera, T (1963) : Dynamic investigation of foundation rocks in-situ, Proc. 5th US Sympo. Rock Mechanics, Minnesota, pp. 517-533
- 2) 桑原 洋・片平冬樹・武内俊昭・田中荘一 (1979) : 各種試験法からみた泥質岩の変形性に関する考察 応用地質学会, 岩盤計測に関するシンポジウム pp.2-12
- 3) M.ROCHA, A.SILVEERA, N.GROSSMANN, E.OLIVEIRA (1966) : Determination of the Deformability of Rock Masses along Boreholes, Proceedings of the 1st congress of the ISRM.
- 4) 武内俊昭・田中荘一・鈴木樞夫(1976) : 孔内載荷試験法による岩盤の変形に関する特性の研究. 土と基礎, Vol.24, No.1 pp.35～41, 土質工学会
- 5) 金有性ほか (1991a) : 堆積軟岩の変形係数とそのひずみレベルおよび応力レベル依存性 土木学会第23回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.152～156.
- 6) 吉中龍之進・清水昭男・新井元・加藤・蟻坂俊英 (1990) : 岩盤の不連続面の強度・変形特性の寸法効果に関する研究 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
- 7) 新田篤志・山本茂樹・武内俊昭・中西昭友 (1998) : 地盤の変形性に影響を与える要因と橋梁基礎の合理的な沈下予測についての考察. 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.305～310
- 8) 山県 守・武内俊昭 (1975) : 花崗岩に関する2, 3の変形特性について. 土木学会 第

武内俊昭

9回岩盤力学に関するシンポジウム講演概

要 pp.21-25

- 9) 武内俊昭 (2003) : 原位置試験による変形係数についての一考察 深田地質研究所年報
No.3 pp.113-118