

平板載荷試験による火山角礫岩の変位挙動とその数値解析

Deformation behavior of volcanic breccia under in-situ plate loading and numerical simulation

○五月女敦*・杉山弘泰*・吉中龍之進**・長田昌彦***

Atsushi SAOTOME, Hiroyasu SUGIYAMA, Ryunoshin YOSHINAKA and Masahiko OSADA

In order to define the deformation property and the scale effect of volcanic breccia, heterogeneous rock, plate loading test with various diameter of loading plate was conducted. It was determined that modulus of deformation and modulus of elasticity increases as the size of loading plate gets larger, hence the effect by the scale of volcanic breccia was observed. Also by adopting the compressibility obtained by testing undisturbed specimen extracted by double core tube into the model, the numerical calculation could successfully manipulate the results of plate loading test.

Key Words: volcanic breccia, plate loading test, scale effect, numerical simulation

1. はじめに

火山砕屑岩である火山角礫岩は、礫と基質（細かい粒径）の2相からなる不均質岩盤である。長大橋、ダムなどの大規模構造物における基礎岩盤の設計に際しては、礫と基質の硬さが同等または礫が小さい場合には通常の原位置岩盤試験（平板載荷試験、ブロックせん断試験）あるいは岩石試験により力学的特性を求めることができる。しかしながら礫が大きい場合や礫と基質の固さが異なる場合、礫と基質を工学的に等価な均質体として直接評価するためには、大きなサイズの原位置試験が必要になりコスト的に問題がある。

大型の原位置変形試験としては、新第三紀の堆積軟岩で泥岩及び砂岩の互層をなす地層において、岩盤としての変形特性を求めめるため、載荷板直径 1.6m の平板載荷試験が実施されている¹⁾。また、硬岩である新高瀬川発電所の例²⁾では、同一箇所直径 30cm の剛板載荷試験及び 100cm×100cm 正方形の平板載荷試験の2種類の試験を行い、直径 30cm のものに比べ 100cm 正方形の弾性係数は 1.5~2.0 倍という値となり、寸法効果の影響が現われていることが示されている。これは岩盤内のひずみ領域の差によるものと考えられる。このように寸法効果の影響は岩盤力学の重要課題となっている。一方、泥岩、砂岩等の均質な軟岩においては、サンプリングされた不攪乱試料を用いた岩石試験によって岩盤の力学特性が評価できることが最近の研究で明らかになっている^{3),4)}。また、先に述べた新第三紀の堆積軟岩で泥岩及び砂岩の互層をなす岩盤においても同様な結果が得られている¹⁾。

以上のことから不均質軟岩である火山角礫岩の変形特性を明らかにするため、本研究では、載荷板径の異なる平板載荷試験（載荷板直径 ϕ 30cm, 60cm, 120cm）を行い不均質岩盤の変形特性及び寸法効果を確認する。また、平板載荷試験と不攪乱試料による三軸圧縮試験との関係について検討を行うため、三軸圧縮試験の結果から変形特性をモデル化し、平板載荷試験の数値解析を行い、数値解析の結果と原位置平板載荷試験の結果を比較することとした。

* 正会員 工学修士 電源開発(株) 建設部

** 正会員 工学博士 埼玉大学 工学部 建設工学科

***正会員 博士(工学) 埼玉大学 工学部 建設工学科

2. 原位置試験

対象とした地層は東北地方のグリーンタフ地域に分布する新第三紀中新世後期の火山岩及び火山砕屑岩であり、下位から安山岩溶岩、火山角礫岩、及び凝灰岩が一つの堆積ユニットを形成し、4つの堆積ユニットで一つの累層を構成している。火山角礫岩は、安山岩溶岩の岩片から成る礫と軟質な凝灰岩質の基質からなる不均質岩である。礫と同等な溶岩の一軸圧縮強度は60MPa前後であるのに対して、基質と同等な凝灰岩では10MPa以下となっている。この火山角礫岩中に掘削した試掘横坑において、平板載荷試験及び弾性波トモグラフィを実施した。また、試掘横坑の岩盤露面で行った2次元断面における礫の粒径分布調査から、火山角礫岩の礫径は計測限界である5mmから60cmに及ぶ。

(1) 平板載荷試験

平板載荷試験は、同一の試験面に対して大きさの異なる3種類の鋼製の載荷板（直径φ120, 60, 30cm）を用いて等変位の載荷試験を行った。試験は載荷板直径φ120cm, 60cm, 30cmの順序で行っている。試験装置の概要を図-1に示す。直径φ120cmの載荷板の変形試験については、最大応力を2,000kNジャッキで載荷可能である1.47MPaとし、0.49MPa, 0.98MPa, 1.47MPaの段階的繰り返し載荷とした。直径φ60cm, 30cmの載荷板の変形試験については、最大応力を2.94MPaとし、1.47MPa, 2.94MPaの段階で繰り返し載荷した。計測は、ひずみゲージ式変位計（分解能1/1000mm）及び埋込型の地中ひずみ計（分解能 1×10^{-6} ）により行った。変位計は載荷板上の対角線方向に4点設置した。平板載荷試験の中心では深さ4.0mのボーリングを掘り、深さ0.15m, 0.30m, 0.60m, 1.20m, 2.40m, 3.6mの6箇所まで2方向（鉛直1成分、水平1成分）に地中ひずみ計を、また平板載荷試験の中心から0.65mの坑軸方向の対角に2箇所φ66mmの1.5mのボーリングを掘り、深さ0.15m, 0.30m, 0.60m, 1.20mの4箇所まで3方向（鉛直1成分、水平2成分）に地中ひずみ計を配置した。

地中ひずみ計は、精度良く計測するためには試験中に地盤と同じ動きをすることが重要である。このため、埋設したφ66mmのボーリング孔には、地盤と同等の弾性係数のグラウト材を注入した。現地でサンプリングした載荷試験直前のグラウト材の弾性係数は1,650MPa~1,830MPaである。

平板載荷試験において変形係数（D）及び弾性係数（E）は、地盤を一樣線形弾性体と仮定して、等変位載荷の力と変位の関係から次式により求められる。

$$D \text{ または } E = \frac{(1-\nu^2) \cdot \Delta F}{2a \cdot \Delta \delta} \quad (1)$$

ここで、 ν は地盤のポアソン比（=0.3:軟岩は0.25~0.3を用いられることが多い⁵⁾ことからここでは0.3を採用。）、 a は載荷板の半径、 ΔF は係数を求めるための荷重増分、 $\Delta \delta$ は、係数を求める区間の変位増分である。

上式より算出した変形係数及び弾性係数を表-1及び図-2に示す。ここで $\Delta \delta$ は、載荷板上の対角線方向における4点の変位計の平均値としている。0.47MPa~1.47MPaの荷重範囲では、φ120cmは、φ30cmに比べて変形係数が1.9倍、接線弾性係数が1.4倍、0MPa~1.47MPaの荷重範囲では、φ120cmは、φ30cmに比べて割線弾性係数が1.5倍となってお

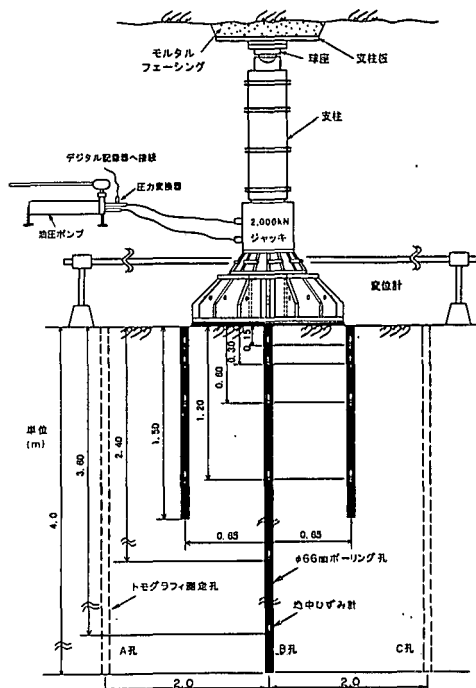


図-1 平板載荷試験装置の概要
(載荷板直径 120cm)

り、変形係数及び弾性係数は載荷板の大きさとともに増大する傾向にあり寸法効果が認められる。

しかしながら、載荷板が大きいほど、基準梁の不動点沈下量は大きくなること、リブ補強しているものの載荷板自身のたわみ量も大きくなる。従って直径φ120cmでは、基準梁からの変位計で計測された載荷板の変形量は実際より過小に評価される可能性があり、

弾性係数は結果的に大きくなることが予想される。そこで、載荷板の中心軸で計測した地中ひずみを積分することにより載荷板の変位量を推定し、(1)式より割線弾性係数を算出した。その結果を表-1及び図-2に示す。載荷板の大きさの違いによる値の差は小さくなっているものの、OMPa~1.47MPaの荷重範囲においてφ120cmは、φ30cmに比べて割線弾性係数が1.3倍、OMPa~2.94MPaの荷重範囲においてφ60cmはφ30cmに比べて割線弾性係数が1.1倍となっており、地中ひずみより推定した場合でも寸法効果の影響が認められる。なお、地中ひずみを積分して変位にする方法は図-3のように鉛直ひずみの深度分布図において、OABCDEFGHで囲まれる範囲の面積として求めた。

(2)弾性波トモグラフィ

原位置での初期剛性は、泥岩等の均質岩盤では弾性波試験により求められている^{3),4)}。ここでは、精度良く計測するため弾性波トモグラフィを行い地盤を20cm×20cmの細かいメッシュに分割し初期剛性を求めた。弾性波トモグラフィは、図-1に示すように平板載荷試験を中心位置とする2m間隔で配置された3本のボーリングA孔、B孔(載荷板の中心)、C孔及び両端A孔、C孔のボーリング孔に挟まれた岩盤表面を含む断面(4m×4m)で実施した。

測定においては、2mまたは4m離れた2本のボーリング孔のうち、一方のボーリング孔を受振孔、もう一方の孔を起振孔として、受振孔には孔内加速度計を所定の深度に挿入し、起振孔にはP波またはS波振源を挿入した。また、4m離れたボーリング孔間に挟まれた岩盤地表面には3成分加速度計を石膏により固定し、0.4m間隔で設置した。振源は孔内水を介して孔壁を加振する応用地質株式会社製の間接加振型振源を用い、P波の起振にはOWS振源、S波の起振にはサスペンションPS検層用HS振源を使用した。

表-1 平板載荷試験結果

載荷板直径	変位計						地中ひずみ計	
	変形係数(D)		割線弾性係数(Es)		接線弾性係数(Et)		割線弾性係数(Es)	
	MPa		MPa		MPa		MPa	
	荷重範囲		荷重範囲		荷重範囲		荷重範囲	
	MPa		MPa		MPa		MPa	
	0.49~1.47 1.96~2.94		0~1.47 0~2.94		0.49~1.47 1.96~2.94		0~1.47 0~2.94	
φ30cm	1,000	1,230	1,310	1,350	1,270	1,630	1,030	1,010
φ60cm	1,390	1,700	1,490	1,600	1,540	2,110	1,040	1,160
φ120cm	1,930	-	1,940	-	1,730	-	1,330	-

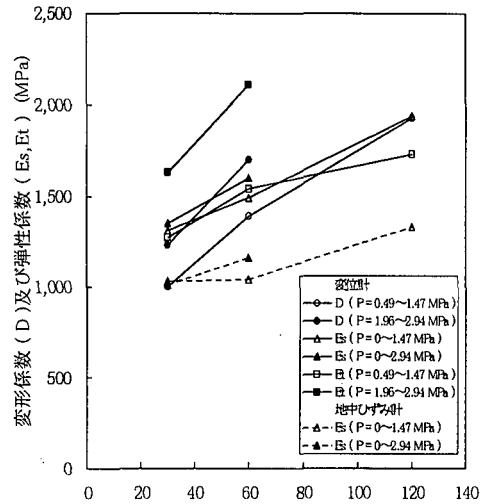


図-2 載荷板直径と変形係数及び弾性係数の関係

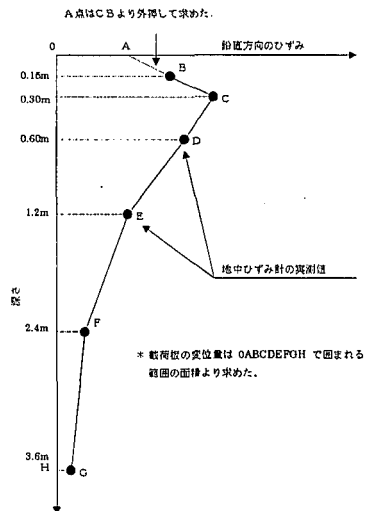


図-3 地中ひずみより載荷板変位を求める方法

弾性波トモグラフィで求めたS波速度を図-4に、A孔、B孔及びC孔のポアホールテレビの孔壁画像から求めた礫含有率を図-5に示す。図を比較すると、S波速度と礫含有率との相関は余りないように見える。また、S波速度 1.1km/s~1.3km/s の他に比べて速い部分が数箇所みられるのは、大きな礫の存在による影響であると考えられる。これらの速い部分を除くとS波速度は 0.8km/s~1.0km/s の範囲にあり、4m×4mの弾性波トモグラフィの結果は全体として均質とみなせる。この結果は、岩石供試体において超音波波速度から決定した動弾性係数 E_d は礫含有率によらずほぼ一定値を示している結果⁶⁾と調和的である。

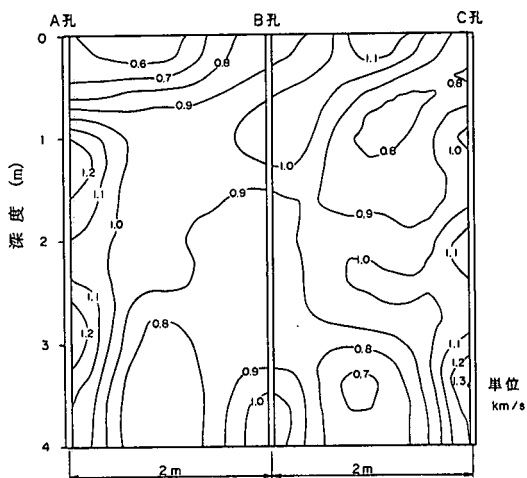


図-4 弾性波トモグラフィ結果 (S波速度)

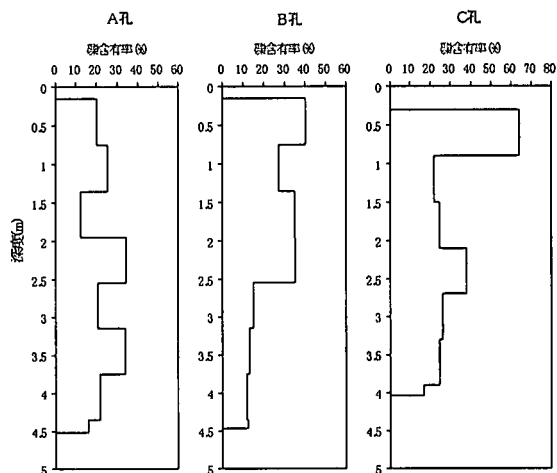


図-5 ボーリング孔の礫含有率

表-2 CD条件による三軸圧縮試験の試験条件

試験の種類	供試体寸法	拘束圧 MPa	軸ひずみ計測法	備考
三軸圧縮試験 (CD)	直径: 9.5cm 高さ: 19cm	0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 4.9, 7.8	外部変位計 内部変位計 LDT (長さ150mm) ひずみゲージ (長さ60mm)	<ul style="list-style-type: none"> ・49kN ロードセル使用 ・せん断速度: 0.01%/min ・背圧: 0.29MPa ・最大軸ひずみ: 15% ・横方向はひずみゲージにより計測 (長さ60mm)

3. 三軸圧縮試験 (CD条件) から得られた火山角礫岩の変形特性

平板載荷試験を実施した試掘横坑から、ダブルチューブコアバレルを用いて直径9.5cmの試料を採取した。サンプリング時の掘削長は1または2mとし、コアドリルの固定には十分注意を払って試料の乱れを最小限に抑えた。コアリングした試料は高さ19.0cmの大きさに室内で端面カットし、三軸試験用の供試体とした。なお、供試体は、側面において最大礫の長径が供試体の直径以下であり、10mm以上の礫で面積礫含有率が30%程度となるように選定した。これらの条件の設定は、側面の最大礫径を供試体直径以下に限定すると礫含有率の変動幅の少ない供試体を得られること、複数の供試体の平均礫含有率が10mm以上の礫で30%であることによる⁶⁾。CD条件による三軸圧縮試験の試験条件を表-2に示す。

広いひずみ領域における応力-ひずみ関係の特徴を把握するため、外部変位計による応力-ひずみ曲線を図-6に示す。低拘束圧条件下でひずみ軟化を示し、拘束圧が増加するにつれ徐々に応力降下量が小さくなり、硬化型の挙動を示す。また、拘束圧の増加に従い初期弾性係数は増加していることが分る。

図-7はLDT⁶⁾による接線弾性係数と軸ひずみの関係を示している。初期弾性係数にパラツキがみられるものの、ひずみが 10^{-5} 程度からひずみの増加に伴い接線弾性係数は低下する。これらのせん断時の非線形特性は、初期弾性係数の拘束圧依存性と接線弾性係数のひずみレベル依存性で表現できると考えられる³⁾。なお、礫径、礫含有率の影響等を評価するためC-U条件の室内試験を別途行っている⁶⁾。

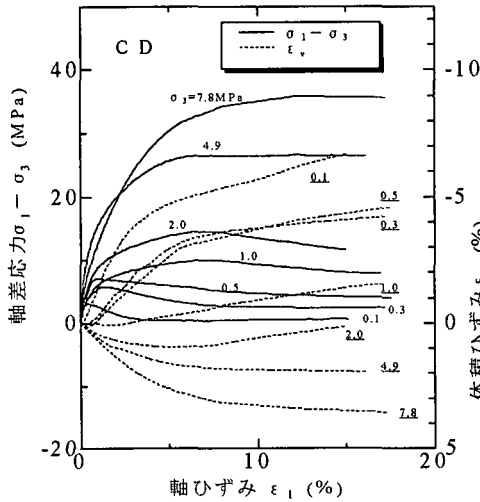


図-6 火山角礫岩の応力-ひずみ関係

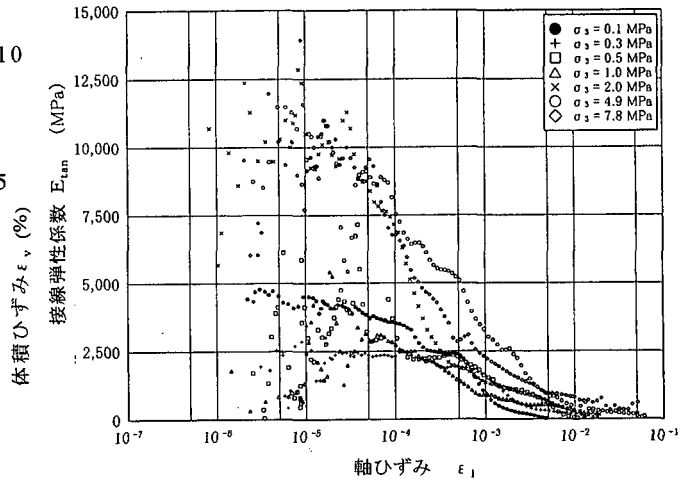


図-7 LDTによる接線弾性係数と軸ひずみの関係

4. 平板載荷試験の数値解析

平板載荷試験の数値解析には2次元軸対称モデルを用い、解析領域は幅6m、高さ12mとし、側方は鉛直ローラ、底面は水平ローラとした。解析コードは有限差分法である汎用コード「FLAC」を用いた。

三軸圧縮試験(CD条件)に基づく拘束圧依存性とひずみレベル依存性から次式により変形特性の非線形性をモデル化³⁾した。

$$E_{tan} = E_f \cdot (\sigma'_1 / \sigma'_{v0})^{0.31} \cdot \{1 - 4.55(q/q_{max}) + 7.52(q/q_{max})^2 - 4.04(q/q_{max})^3\} \quad (2)$$

$$\nu_{tan} = 0.11 + 0.71(q/q_{max})^2 \quad (3)$$

ここで、 E_{tan} は接線弾性係数、 E_f は弾性波トモグラフィにより求めた初期弾性係数、 σ'_{v0} は有効上載圧、 σ'_1 は有効最大主応力、 q は軸差応力、 q_{max} は最大軸差応力、 ν_{tan} はポアソン比である。なお、(2)式の0.31は、拘束圧とLDTにより計測した初期弾性係数の関係より求めた。

以上のせん断時の非線形性を考慮した載荷板の変位の解析結果と試験結果の比較を図-8~図-10に示す。図によれば、実測に比べて解析結果の変位量は小さく、実測の変位が下に凸であるのに対して、解析結果は上に凸であり沈下パターンが異なっている。解析結果は初期剛性に弾性波トモグラフィより求めた値を用いており変位量の小さい0.1mm程度までは線形的な挙動を示し、その後、ひずみ依存性の影響を受けて接線弾性係数は低下し非線形的な傾向を示す。これに対して試験結果は初期変形に非線形性が顕著に現われ、荷重が大きくなると線形的な挙動を示している。このような効果を表現するために不攪乱試料の等方圧載荷試験を行い圧縮特性を把握し、その変形特性を解析に用いることとした。

試験方法は、一つの試料に対して拘束圧を段階的 (0.5MPa ごと) に負荷した。はじめに 0.5MPa の拘束圧を負荷し、HST 法⁸⁾によるひずみゲージからの出力値が一定したあとで、次の段階の拘束圧を負荷していくことにより、各拘束圧状態 σ_c における体積ひずみ ε_v を求めていく。またこれとは別途実施した圧密非排水試験におけるひずみの変化からも体積ひずみを計算することができるので、これらの値も参考値として合わせて示した試験結果を図-11に示す。図から 1.5MPa 程度までの等方圧状態で非線形挙動が現われており、その後の高い拘束圧状態ではほぼ直線に近似できる。

ここでは、図-11の体積ひずみと拘束圧の関係を次式の放物線で近似し、 σ_c の増分に対する体積弾性係数 K ($\Delta\sigma_c$)と(3)式のポアソン比を用いて増分法による非線形解析を実施した。

$$\varepsilon_v = (\sigma_c / 15.6)^{0.73} \quad (4)$$

ここで、 ε_v は体積ひずみ、 σ_c は平均主応力である。

地盤の初期応力の設定については、試掘横坑の線形掘削解析を行い、載荷板近傍の応力状態を求め¹⁾、この平均主応力 σ_c により K の初期値を求めている。

この圧縮特性を用いた載荷板の変位の解析結果と試験結果の比較を図-8～図-10に示す。載荷板径 $\phi 30\text{cm}$ 、 $\phi 60\text{cm}$ については試験結果の応力範囲が0～2.94MPa、 $\phi 120\text{cm}$ については応力範囲が0～1.47MPaであることから、これらの範囲である図に示すA～B区間の試験結果の変位量と解析結果の変位量とを比較する。 $\phi 60\text{cm}$ 、 $\phi 30\text{cm}$ については、A～B区間の試験結果と解析結果の変位量はほぼ等しく、変位パターンもよく一致している。 $\phi 120\text{cm}$ については、解析結果の変位量がA～B区間の試験結果よりも大きくなっている。ただし、載荷板直径 $\phi 120\text{cm}$ においては、理論解を用いて基準梁の不動点沈下及び載荷板のたわみ量を計算すると合計0.2mm程度あり、この分を試験結果から補正した場合には差が小さくなる。

5. まとめ

不均質軟岩である火山角礫岩において載荷径の異なる平板載荷試験を行うと共に、不撓乱供試体の三軸圧縮試験に基づき平板載荷試験の数値解析を行った結果、以下のような結論が得られた。

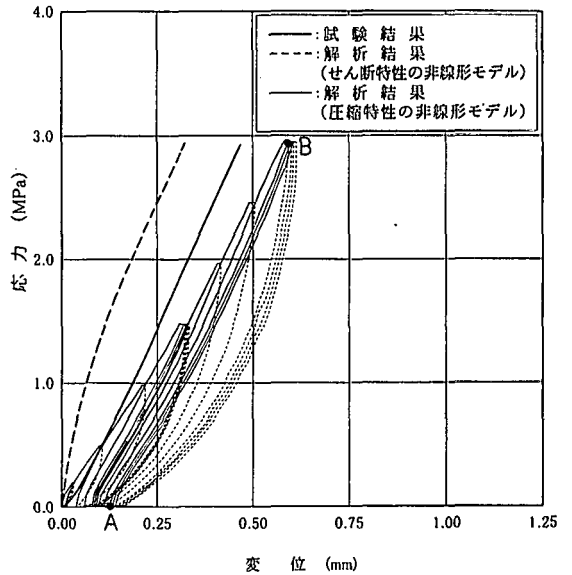


図-8 試験結果と解析結果の比較
(載荷板直径 30cm)

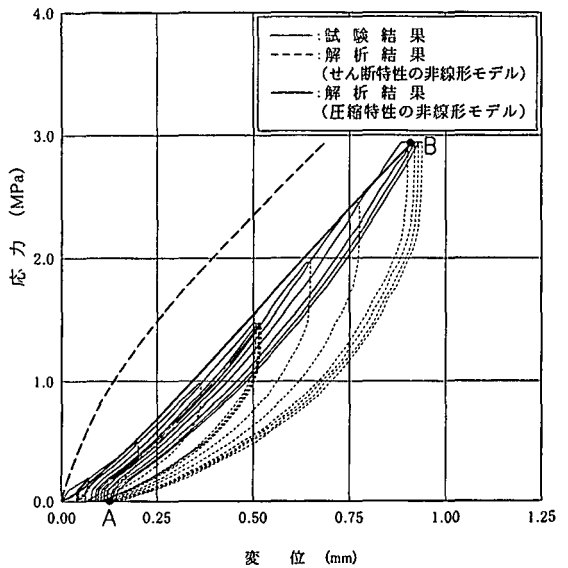


図-9 試験結果と解析結果の比較
(載荷板直径 60cm)

- (1) 平板載荷試験の載荷板が大きいほど変形係数及び弾性係数は大きくなり変形特性に寸法効果が認められた。また、地中ひずみ計より載荷板変位を推定した結果においても、値の差は小さくなるものの寸法効果が認められた。
- (2) 境界値問題である平板載荷試験の結果を、岩石の圧縮特性をモデル化した数値解析により模擬することができた。
- (3) 三軸圧縮試験の結果から求めたせん断時の非線形変形特性を用いた場合には、数値解析により平板載荷試験の実測結果を模擬することができなかった。これは初期の圧縮変形の非線形性を表現できないためである。
- (4) 平板載荷試験結果においては変形性に寸法効果が認められるが、数値解析では載荷板直径 ϕ 120cm の場合に実測より大きな変位量となり、寸法効果の影響を表現することはできなかった。寸法効果については、様々な角度からの検討を進める必要がある。

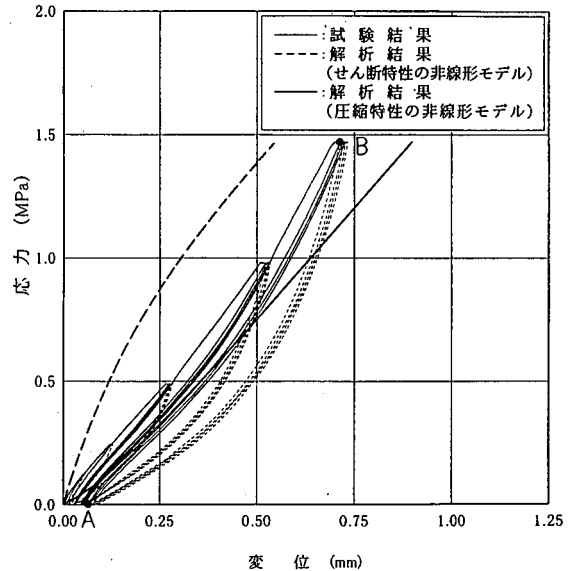


図-10 試験結果と解析結果の比較
(載荷板直径 120cm)

6. 参考文献

- 1) 河村精一, 村中健二: 互層堆積軟岩を構成する岩石の変形特性のモデル化と岩盤変形試験のシミュレーションについて, 地盤工学会「岩の一軸および三軸圧縮試験の方法と結果の適用に関するシンポジウム」, pp. 131-138, 1998. 5.
- 2) 土木学会岩盤力学委員会編: 原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針—解説と設計への適用—, 土木学会, pp. 110-115, 1983.
- 3) 龍岡文夫, 小高猛司, 王林, 早野公敏, 古関潤一: 堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文報告集, No. 561/Ⅲ-38, pp. 1-17, 1997. 3.
- 4) 岡田哲実, 谷和夫, 田中幸久, 百瀬和夫: 堆積軟岩上の平板載荷試験におけるポアソン比の検討, 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 216-220, 1999.
- 5) 土質工学会編: 岩の調査と試験, 土質工学会, pp. 130, 1989.
- 6) 吉中龍之進, 長田昌彦, 五月女敦, 杉山弘泰, 浜野久美: 三軸圧縮試験による火山角礫岩の強度及び変形特性, 土木学会論文集, 投稿中.
- 7) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.-S. and Sato, T., 1991 A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 1, pp. 169-180.
- 8) 長田昌彦, 山辺正, 吉中龍之進, 浜野久美: 熱収縮チューブを利用した岩石のひずみ計測方法の検討, 土木学会論文集, No. 638/Ⅲ-49, pp. 217-226, 1999.

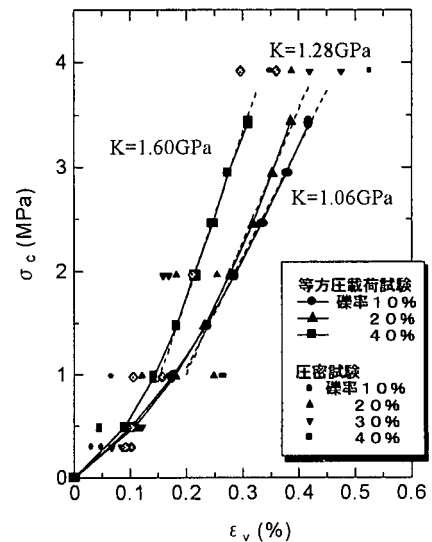


図-11 火山角礫岩の圧縮特性