

礫質土の K_0 値測定について

内田明彦¹・畑中宗憲²・田屋裕司¹

¹正会員 工修 ㈱竹中工務店 技術研究所 生産研究開発部 (〒270-13 千葉県印西市大塚1-5-1)

²正会員 工博 ㈱竹中工務店 技術研究所 生産研究開発部 (〒270-13 千葉県印西市大塚1-5-1)

静止土圧係数 K_0 の値は地盤の初期応力状態を決定する重要なパラメーターである。例えば、室内試験で求めた液状化強度を原位置強度に換算するときも K_0 値が必要である。しかし、砂質土や礫質土の K_0 値を測定することは極めて難しく、実測例はほとんどない。一方、筆者らは原位置でのS波速度から求めたせん断剛性と不攪乱試料を用いて室内試験で求めたせん断剛性を比較することにより、 K_0 値を求める方法を提案している。さらに筆者らは、主として礫質土を対象にして室内でS波速度を測定する方法を検討している。本報告は室内試験による簡便なS波速度の測定方法の紹介と筆者らが提案した方法による礫質地盤の K_0 値測定結果について述べたものである。

Key Words: shear wave velocity, gravel, coefficient of earth pressure at rest, laboratory test

1. はじめに

静止土圧係数 K_0 は、地盤の挙動解析における初期応力の設定や強度変形特性を考える上で重要なパラメーターとなっている。しかし、砂質および礫質地盤の原位置水平方向応力を精度良く測定することは難しく、実地盤の測定結果はほとんどない。著者の一人は原位置凍結サンプリング法で採取した高品質の不攪乱試料を用いて2通りの方法で砂質地盤の水平方向応力を測定する方法を示した¹⁾。また、著者らは、砂質土の原位置凍結サンプリング試料の微小ひずみでの初期せん断剛性(G_0)と原位置での弾性波試験から求めた G_0 を等価とする考えから、原地盤の K_0 値を推定する方法(以下「 G_0 等価法」と呼ぶ)を提案した²⁾。

一方、礫質土を対象とした室内試験では、供試体端面でのベディングエラーのために、変位の測定法によって微小ひずみレベルにおけるせん断剛性の値が大きく異なる場合があることが指摘されている³⁾。そこで、著者らは室内でS波速度を測定する方法について検討し、不攪乱砂礫試料供試体について、加速度計を用いて測定したS波速度より計算された初期せん断剛性はLDTや非接触型変位計により測定された値より大きいことを示した⁴⁾。

本報告では、三軸セル内でS波を発生させる簡便な方法を紹介し、その妥当性を検討した豊浦標準砂のS波速度測定結果を示す。次に、本方法を用いて G_0 等価法により不攪乱砂礫試料の K_0 値を測定した結果について述べる。

2. S波速度測定の概要

三軸セルを用いてS波速度を発生させる方法として、文献4)では載荷ロードに取り付けてある治具をハンマーで水平に打撃して発生させた。ただし、このハンマーによる打撃は手動のため、常に同じ力で同じ位置を打撃することは難しい。また打撃位置から加速度計に波が伝わるまでに三軸セルの様々な治具の影響を受ける可能性がある。これに対して西尾らは、三軸セルの側壁に取り付けたペロフラム構造の水平ピストンを用いて供試体上部の試料キャップをセルの外部から打撃する方法を提案している⁵⁾。

一方、本方法は、図1に示すように試料キャップに取り付けたレシーブ軸を打撃することによって、供試体にS波を発生させる仕組みになっている。

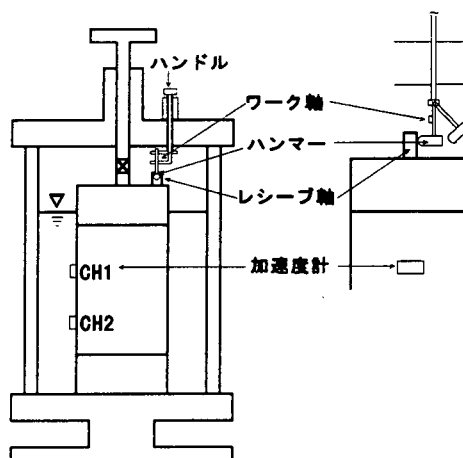


図1 三軸セル内でのS波発生方法

この装置の特徴は、①任意の拘束圧のもとで特別な工夫を必要とせず打撃が可能なこと、②供試体の圧密などによる高さ変化に対応するため、ハンマーの位置を上下させることで、常にレシーブ軸の同じ位置を同じ力で打撃できることである。また、西尾らの方法や本方法は打撃点が試料キャップのため、載荷ロッドを打撃する方法に比べて三軸セルの治具等が観測波に及ぼす影響は小さいと思われる。

本手法によるS波の発生方法は以下に示す通りである。セル外部のハンドルを手動で回転させることによって、ワーク軸が回転しハンマーを押し上げる。さらに、ハンドルを回転させると、ワーク軸はハンマーから離れて、ハンマーが試料キャップに固定されたレシーブ軸をキャップの接線方向に打撃する。なお、S波を観測するための加速度計(圧電型、防水加工、重量3g)は、供試体側面のゴムスリーブの上に接着剤で貼り付けた治具に固定している。

3. 豊浦砂による本方法の妥当性の検討

本方法の妥当性を検討するため、豊浦標準砂を用いてS波速度の測定を行った。豊浦標準砂は、直径15 cm、高さ30cmの供試体を空中落下法で相対密度30%になるように作成した。加速度計は20cmの間隔で2ヶ取り付けた。まず、乾燥砂で供試体を真空状態で自立させ、レシーブ軸を左右から打撃して波の反転を確認した。図2は観測波形の例である。CH1,2において少なくとも観測波形の1波目は反転が確認でき、S波を観測できていると思われる。次に、CH1とCH2の観測波からS波速度を求める際の到達時間の読み方として、初動の波の立上りとピークで規定した場合を比較した。表1と図3に5段階に設定した拘束圧(等方圧)におけるS波速度の測定結果を示す。測定は1つの拘束圧につき2回測定し、拘束圧を順次上げて次の測定に移った。図3は2回の測定の平均値を示したものであり、Hardin and Richart⁹が砂について提案した(1)式により求めた値(豊浦砂の $e=0.87$)も示した。

$$V_s = (104 - 34.9e) (Pc)^{0.25} \quad (0.6 < e < 1.3) \quad (1)$$

V_s :せん断波速度(m/s)、 e :間隙比、 Pc :拘束圧(kPa)

表1と図3より、ピークで規定した場合は同じ拘束圧における2回の測定でほぼ同じ V_s の値を示し、(1)式に基づく値ともほぼ対応している。一方、立上りで規定した場合は同じ拘束圧における2回の測定でややばらつきがあり、ピークで規定した場合に比べてやや不安定である。そこで、本検討では波の到達時間は初動の波のピークで規定した。

次に、真空状態で自立させた供試体に対して、試料キャップをハンマーで水平打撃する西尾らの方法と本方法によるS波速度測定を行い、両方法を比較した。図4に両方法で測定したS波速度を示す。測定は2種類の拘束圧に対して行ったが、いずれの拘束圧においてもそれぞれの方法で測定したS波速度の値はほぼ同じである。以上のことから、本手法によるS波速度測定法の妥当性が示された。

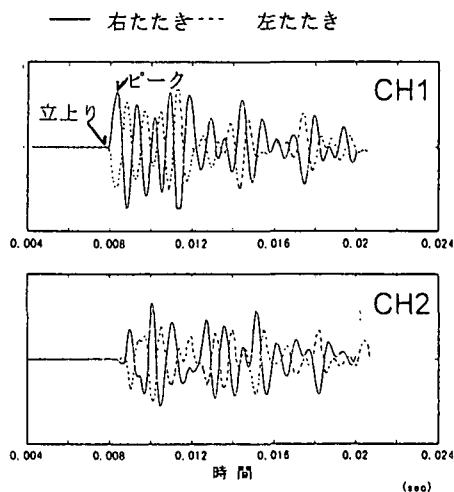


図2 観測波形の例

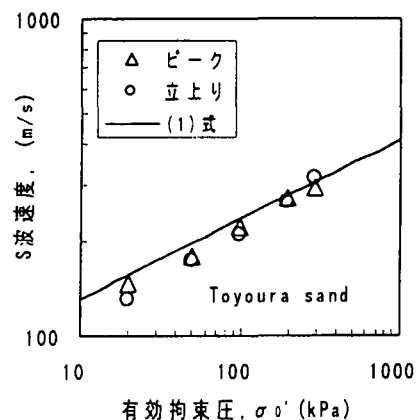


図3 S波速度と有効拘束圧の関係

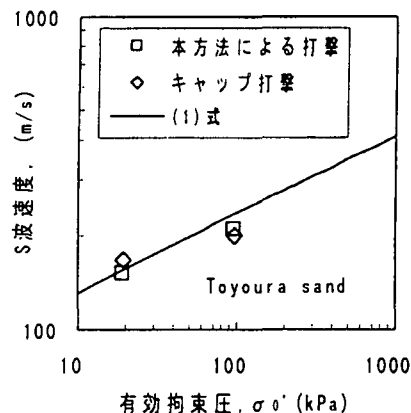


図4 異なる打撃方法によって測定したS波速度の比較

表1 観測波から求めたS波速度

拘束圧 (kPa)	S波速度 (m/s)						(1) 式 (e=0.87)
	立上り			ピーク			
	1	2	平均	1	2	平均	
19.6	134	125	130	147	147	147	156
49.0	185	166	173	178	178	178	196
98.0	208	208	208	222	222	222	233
196.0	277	249	263	277	263	270	277
294.0	312	312	312	293	293	293	306

4. 静止土圧係数 K_0 の推定法(G_0 等価法)

微小ひずみ（実務では $\gamma \leq 10^{-5}$ と考えている）でのせん断剛性（ G_0 ）を測定する方法として、一般に以下の2つの方法がよく用いられている。

1) 原位置で実施する弾性波試験で求められるS波速度 V_s から(2)式を用いてせん断剛性 G_0 (G_{0F})を計算する。

$$G_{0F} = (\gamma / g) \cdot V_s^2 \quad (2)$$

γ : 土の単位体積重量、 g : 重力加速度

2) 室内で繰返し三軸試験などによりせん断剛性 G_0 (G_{0L})を求める。 G_0 は有効平均主応力 σ_m' の関数として一般に(3)式で表される。なお、 σ_m' は(4)式で表される。

$$G_{0L} = a \sigma_m'^n \quad (3)$$

$$\sigma_m' = (1 + 2K_0) \sigma_v' / 3 \quad (4)$$

K_0 : 静止土圧係数、 σ_v' : 有効上載圧、 a, n : 実験定数。

方法1)は、直接原位置での G_0 を求め、方法2)は室内試験から G_0 を求める方法である。せん断剛性は本来地盤に固有の値なので、室内試験に用いる供試体が高品質の不攪乱試料であり、微小ひずみの測定精度が十分に高ければ、異なるこの2つの方法による測定値は同じ値を示すはずである。従って、(2)式と(3)式から(5)式が成り立つ。

$$G_{0F} = a \sigma_m'^n \quad (5)$$

(5)式に(4)式を代入し、 K_0 について表すと(6)式になる。

$$K_0 = \{ (3 / \sigma_v') (G_{0F} / a)^{1/n} - 1 \} \times 1/2 \quad (6)$$

従って、室内試験で(3)式についての実験定数 a, n を求めれば、原位置の G_{0F} と室内の G_{0L} が等しいという観点から(6)式より K_0 が求められる。なお、室内でS波速度を測定した場合、 V_s と σ_m' の間に(3)式と同様の関係が成り立つので、 V_s - σ_m' 関係についての実験定数 a, n を求めれば、(6)式において G_{0F} を V_s に置き換えることで K_0 が求められる。

5. 砂礫試料の K_0 測定結果

実地盤の静止土圧係数を求めるための試験は、原位置凍結サンプリング法によって採取された不攪乱砂礫試料を用いて図1に示した繰返し三軸試験装置により行った。試験に用いた2種類の砂礫試料の物理特性を表2に示す。礫Aは神戸ポートアイランドでロッドコンパクションにより締固めを行った後の地盤から採取されたものであり、礫Bは河床堆積地盤から採取された試料である。図5に用いた試料の粒度特性を示す。礫Aは礫分含有率が50%以上あるが、細粒分も7.8%であり、粒度配合の良い土である。一方、礫Bは礫分が30%以下で細粒分も1%以下とかなり砂分の多い試料となっている。

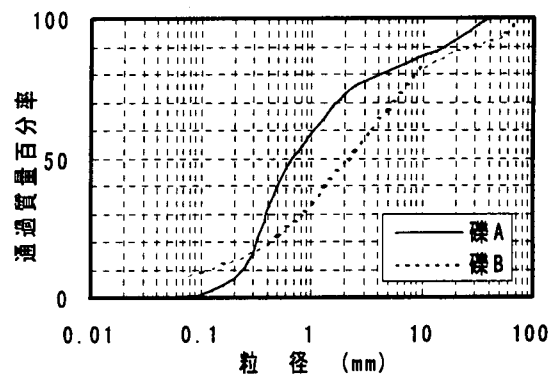


図5 検討に用いた礫試料の粒度分布

表2 試料の物理特性

	D_{max} (mm)	F_c (%)	G_c (%)	e	V_s (m/s)	σ_v' (kPa)
礫A	53.0	7.8	52.3	0.36	240	215.6
礫B	37.5	0.5	27.5	0.58	200	58.8

試験方法は以下に示す通りである。直径15cm、高さ30cmに成形した試料を拘束圧19.6kPaのもとで解凍し、 CO_2 、脱気水、背圧の供給により $B>0.95$ を確認した。その後、等方圧状態で拘束圧を増加させながら、3節で示した方法に基づきS波速度を測定した。拘束圧とS波速度の関係は図6,7のように表される。礫A,Bとも両対数グラフ上でS波速度と有効拘束圧の間には直線関係がある。その傾きは礫Aで0.31、礫Bで0.25となり、礫Aは豊浦砂について示されている0.25((1)式参照)より大きく、拘束圧依存性が高いと言える。図6,7から求めた実験定数を(6)式に代入して K_0 値を求めると、礫Aでは1.0、礫Bでは0.8となった。礫Aの K_0 値が礫Bより大きいことは地盤改良による影響の可能性はあるが、今後更に検討する必要がある。

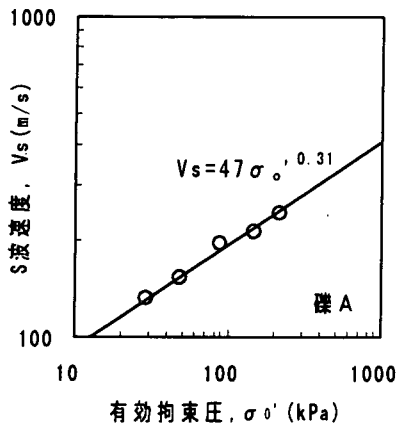


図6 S波速度と有効拘束圧の関係(礫A)

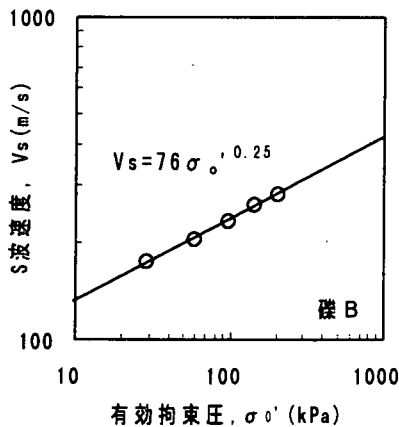


図7 S波速度と有効拘束圧の関係(礫B)

6. まとめ

三軸セル内でS波を発生させる簡便な装置を作成し、豊浦標準砂を用いて本方法の妥当性を検討した。そして、本方法を用いて著者らが提案しているGo等価法により原位置凍結サンプリング法で採取された2種類の不攪乱砂礫試料のKo値を測定した。その結果以下のことがわかった。

- 1) 本方法による打撃法で観測された波の少なくとも1波目は反転が確認できることから、S波が観測できていると思われる。
- 2) 豊浦標準砂について、本方法により求めたS波速度の値は、Hardin and Richart の式に基づく値とほぼ対応している。
- 3) 本方法によるS波速度の値は西尾らの提案した供試体上部の試料キャップを直接打撃する方法の値とほぼ同じである。
- 4) 原位置凍結法により採取した2種類の砂礫試料を用いてS波速度を測定したところ、礫Aは豊浦砂より拘束圧依存性が大きい。
- 5) 2種類の砂礫試料について、S波速度と有効拘束

圧の関係から、著者らの提案したGo等価法によりKo値を測定した結果、礫Aでは1.0、礫Bでは0.8となった。

謝辞：試験に用いた不攪乱砂礫試料の一つは「阪神淡路大震災地盤調査研究会」(委員長:石原研而東京理科大学教授)からご提供いただいたものであり、深謝いたします。また、室内試験によるS波速度の測定は、(株)東京ソイルリサーチの川端和行氏、酒匂教明氏のご協力を得たものであり、感謝いたします。

参考文献

- 1) Hatanaka, M. and Suzuki, Y.: Two methods for the determination of lateral stress in sand, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.2, pp.77-84, 1995.
- 2) Hatanaka, M. and Uchida, A.: A simple method for the determination of Ko-value in sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.2, pp.93-99, 1996.
- 3) 董、中村、龍岡、木幡: 単調および繰返し载荷による粗粒材料の三軸せん断特性、地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性-試験法・調査法および結果の適用-に関する国内シンポジウム、発表論文集、pp.211-216, 1994.
- 4) 畑中・内田・竹原・照井: 粗粒材料の初期せん断剛性測定法の比較(その2)、土木学会第51回年次学術講演会、第3部(A)、pp.222-223, 1996.
- 5) 西尾、社本、馬場、後藤、玉置、赤川: 大型三軸セルを用いたS波速度の測定-凍結採取法による洪積砂礫地盤の力学特性の評価方法に関する研究(その2)-、第21回土質工学研究発表会、pp.577-578, 1986.
- 6) Hardin, B.O. and Richart, F.E., Jr.: "Elastic wave velocities in granular soils," *Journal of SMFD, ASCE*, Vol.89, No.SM1, pp.33-65, 1963.