

神戸沖海底地盤から採取した洪積粘土の工学的性質の一様性

On the Uniformity of Engineering Properties of Pleistocene Clay Retrieved at Nearshore in Kobe

蔡 鍾吉*, 川口 貴之**, 加藤正司***, 澁谷 啓****, 田中 泰雄*****

Jonggil Chae, Takauki KAWAGUCHI, Shoji KATO, Satoru SHIBUYA and Yasuo TANAKA

* 学生会員 神戸大学, 工学部土木工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

** 正会員 工博 函館高専 (〒042-8501 函館市戸倉町 14-1)

*** 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**** 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

***** 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

The variation of engineering properties (i.e., Atterberg limits, grain size distribution, undrained shear strength and elastic shear modulus) of Pleistocene clay (Ma12) was examined by using a 85cm long sample retrieved at the construction site of Kobe Airport. In this experimental study, a direct shear box apparatus equipped with bender elements was newly developed so as to examine both strength and elastic stiffness of the clay sample. It was found that physical and mechanical properties were highly uniform, implying little variations of the soil mineralogy with ageing effects over 1m depth.

Key Words: soil structure, laboratory test, aging, strength, elastic shear modulus

1. はじめに

自然地盤とりわけ洪積地盤は、堆積から長期間が経過しており、二次圧縮、土粒子間のセメンテーションの形成等の年代効果(aging effects)により、“構造 (structure)”が発達した状態にあることは広く認識されている。この構造の発達の程度は、堆積土の一次的性質の違いや堆積環境 (例えば、貝殻の含有の有無、塩分濃度、海水温、等) によって異なるであろう。一方、これらの影響の違いにより、地盤の力学的性質、たとえば変形・強度特性が深さ方向に微妙に変化している可能性がある。

一方、地盤工学の実務設計や数値計算に用いる原地盤の力学情報は、数 cm の長さの試料を用いた室内試験結果から得ている。そして、一般には堆積年代に応じた均質な地層を勝手に仮定し、当該層における諸々の物性値のバラツキを意図的に無視して、代表値を用いる。果たして、このような単純化は実務設計において許される範囲にあるのだろうか。この疑問に答えるためには、いわゆる実務設計で均質とみなされている単一粘土層の一次的性質および力学特性のバラツキを評価しなければならない。さらに、年代効果による自然粘土地盤の構造を定量化することにより、洪積粘土の一次的性質と構造の発達の程度と現在の力学特性の関連を明らかにする必要がある。

従って、本研究ではその足がかりとして建設中の神戸空港の海底に堆積した洪積粘土地盤から採取した一本のサンプルチューブ試料の一次的性質(土粒子密度、塑性・液

性限界、粒度分布)および力学的特性(硬さと強さ)の一様性を数 cm 単位で明らかにした。

2. 試験および試験方法

(1) 洪積粘土試料

実験に用いた試料は、神戸空港埋め立て地盤表面から深さ 82m の地点からシンウォールチューブで採取し、真空パックにより保管していた洪積粘土である。図-1 は当該地盤の有効土被り圧と深さの関係である。埋め立て前の原地盤における有効土被り圧は 415kPa であり、埋め立て後の圧密完了時の有効土被り圧は 650kPa である。試料は、埋め立て完了直後の未圧密地盤から採取した。図-2 は、三軸 K₀ 圧密試験結果である。深さ 83m 地点の 2 つの試料における圧密降伏応力はおおよそ 500kPa であることから、当該試料採取時の圧密度は約 40%であったと推定される。表-1 は、実験に用いた供試体の一覧である。長さ 85cm、直径 10cm の試料を長さ方向に 6cm ごとに切断し、それぞれのブロックの中央部の 4cm を一面せん断試験に利用し、別途余った試料を用いて物理試験を実施した。

(2) 実験装置および試験方法

各種の物理試験は、それぞれ JIS で定められた試験方法に従って実施した。一方、試料の微小ひずみにおけるせん断弾性係数 G および非排水せん断強度 s_u を求めるために、圧密定体積一面せん断試験を実施した。図-3 は、試作し

たベンダー要素(BE)付き一面せん断試験装置である。また図-4は、BEを用いたせん断弾性波速度測定システムの概要である。

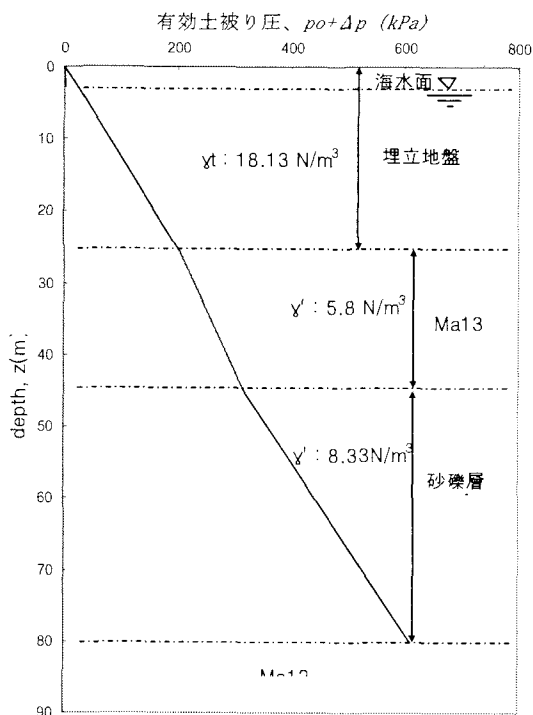


図-1 採取試料の有効土被り圧

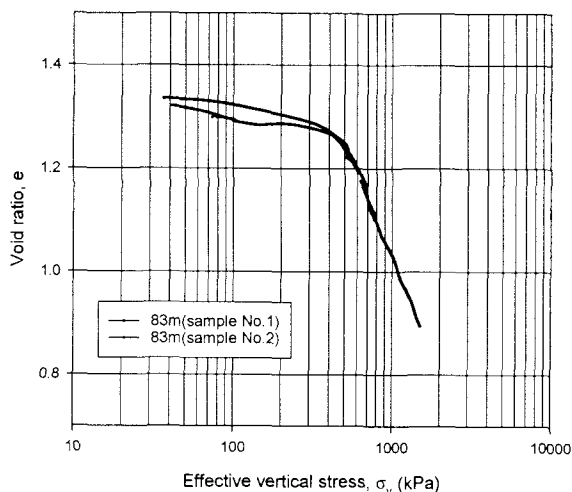


図-2 採取試料の三軸Ko圧密試験結果

BEとは、土中の弾性波速度測定を目的として使用する2枚の圧電セラミックを張り合わせたバイモルフ型振動子の呼称であり、片持ち梁にした送・受信の一对のBEを供試体の上下両端面に挿入し、一方から他方に向かって進行するせん断波を発生させ、供試体を伝わるせん断波の到達時間を測定することにより、せん断弾性波速度 V_s を測定することができる。本システムでは、ファンクションセンサーサイザから発信された電圧信号が送信用BEならびにデジタルオシロスコープに送られ、供試体中に伝播したセ

ん断波が受信用BEに到達することによって生じた電圧信号もオシロスコープに送られる。図-5は、用いたBEの詳細図である。BEのサイズは $1.3 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}$ で、放水、絶縁のためエポキシ樹脂によりコーティングを施してある。これらの送・受信電圧波形はデジタルデータとしてパソコンに集録される。

表-1 実験に用いた供試体

SP1	上(up)	82.3m
	下(down)	82.09m
SP2	上(up)	82.15m
	下(down)	82.21m
SP3	上(up)	82.27m
	下(down)	82.33m
SP4	上(up)	82.39m
	下(down)	82.45m
SP5	上(up)	82.51m
	下(down)	82.57m
SP6	上(up)	82.63m
	下(down)	82.69m
SP7	上(up)	82.75m
	下(down)	82.81m

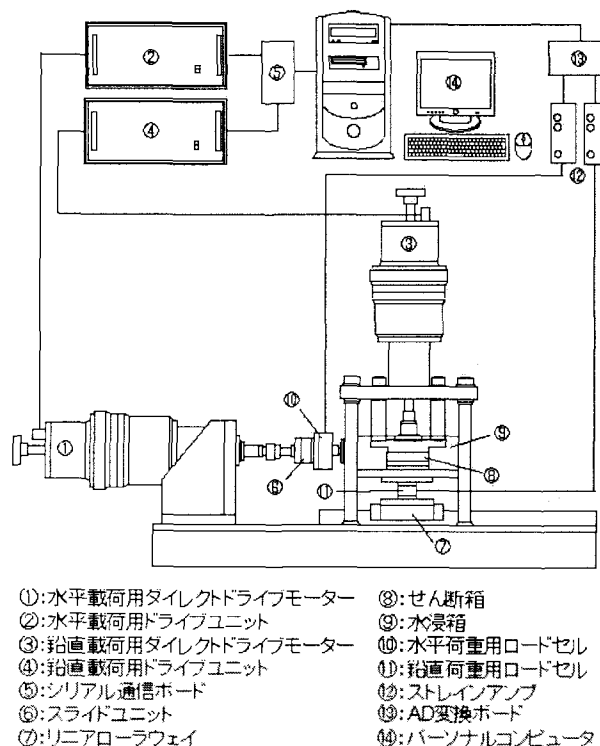


図-3 一面せん断試験機の概略図

ベンダー試験に関して、せん断波の発信波形、周波数、伝播距離および到達時間の決定法に関してはさまざまな検討がなされている^{1),3),5),6)}。伝播距離に関しては発信・受信両BEの先端間の距離を用いることではほぼ一致した見解が見られている^{3),4)}。一方、せん断波の波形にはこれまで主に100Hz程度の矩形波が用いられていたが、近年sin波などを用いたり、共振周波数に着目して到達時間を決定

する検討もなされている¹³⁾。このように発信波については未だ統一の見解を見るに至っていないという理由から、本研究では発信波を矩形波 100Hz, 20kHz, 30kHz, サイクルを1波および連続波(5波)を用いた sin 波で周波数を 20kHz, 30kHz, 40kHz に変えた9種類の入力波を用いて G を慎重に特定した。また、せん断波の到達距離はベンダーの tip-to-tip とし、到達時間は start-to-start 方法に基づいて同定した。図-6 は、せん断波速度測定結果の例である。鉛直応力が増加するにつれ、また一定応力下(650kPa)での時間が経過するにつれ、到達時間は小さくなっていることが分かる。

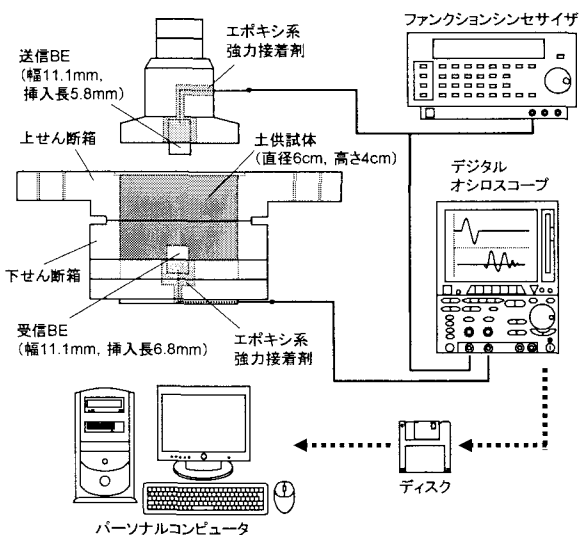


図-4 ベンダー要素システムの概略図

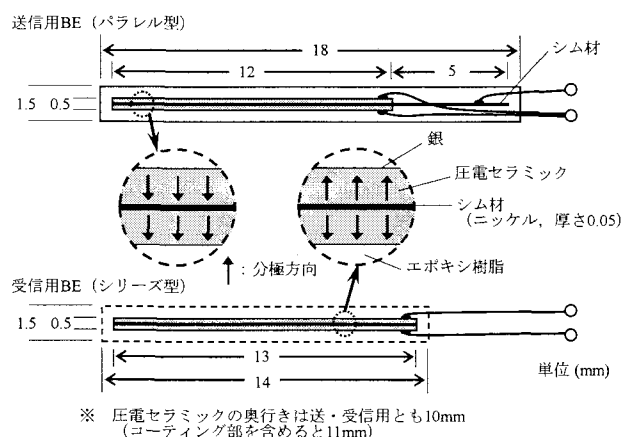


図-5 BEの詳細図

本試験装置では、公称高さ 4cm, 直径 6cm の供試体の鉛直変位(あるいは応力)および水平せん断変位(あるいは応力)を制御するために、それぞれ高精度ダイレクトドライブモータを用いた。RS232C 回線を通じてダイレクトドライブモータを移動させ、これに連結されたスプラインボールネジによって載荷軸の直線運動を実現している。水

平・鉛直変位の分解能は $1.525 \times 10^{-7} \text{mm}$ と極めて高い。全ての制御、データ収録は、パーソナルコンピュータによって自動化されている。PCI スロットにシリアル通信ボードならびに AD 変換ボードの通信信号は Visual Basic で作成された制御プログラムで処理されている。

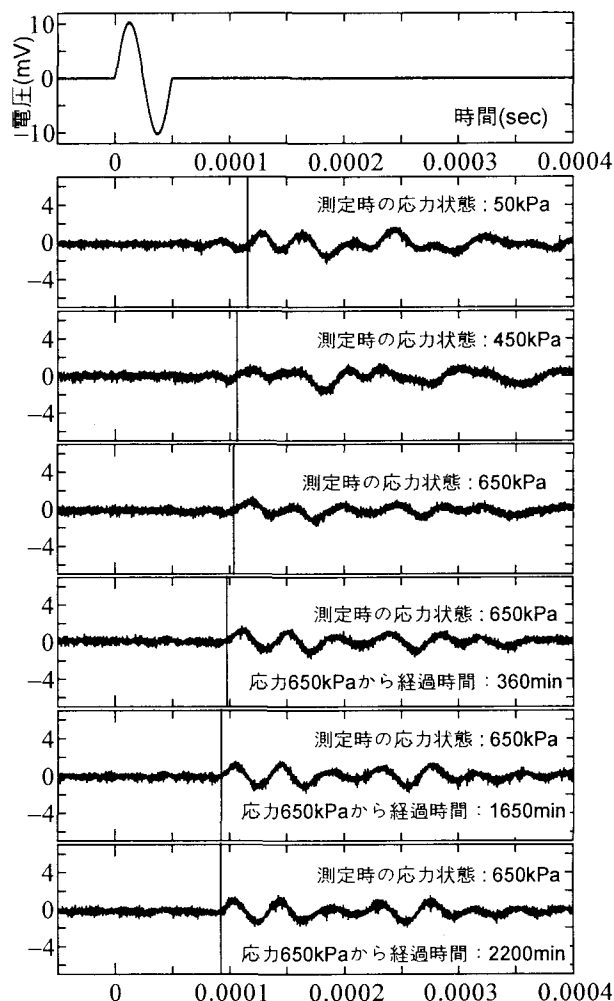


図-6 主な応力点における時刻歴のまとめ (SP7, SP7upG, SIN20kHz)

本試験装置の特徴の一つとして、鉛直変位制御用のドライブユニットに命令を与えない限り軸方向には変位しないため、定体積一面せん断試験の実施が極めて容易となっている。また、鉛直荷重測定用ロードセルは、供試体の定体積条件を満足するために高剛性ロードセルを使用している。鉛直および水平荷重測定用ロードセルの容量は、それぞれ 2.5kN および 5kN であり、分解能はそれぞれ 0.11N および 0.075N である。ロードセルに生じた電圧変化は直流方式ストレインアンプによって増幅され、AD ボード(16bit)を介してパソコンに収録されている。図-4 に示すように、一面せん断供試体に挿入される BE の長さ(自由長)は供試体上部で 5.8mm, 下部で 6.8mm であり、それ以外の部分は上・下せん断箱にエポキシ系強力接着剤によって固定されている。また、送信 BE はプラス電圧で奥側へ変形し、受信 BE は奥側に変形すると、マイナスの電圧

が生じるよう配線されている。

一面せん断試験では、高さ 4cm、直径 6cm の円盤状の供試体をせん断箱内にセットする際、試料が比較的硬質であったため、予めベンダーの挿入部を削った後でベンダーを供試体に押入した。鉛直応力の増加速度 1.0 kPa/min 一定で採取地点の埋め立てによる圧密終了時の有効土被り圧である 650kPa まで鉛直応力を増加させた。また供試体の一次圧密の終了は 3t 法により判断した。実験に用いた鉛直応力の増加速度は、供試体の透水性に対して比較的速かったため、測定した鉛直応力が必ずしも有効応力とはなっていないことに注意されたい。圧密終了後に、せん断箱の隙間を 0.2mm (一定)とし、定体積条件下で 0.2mm/min の水平変位速度を用いて、水平変位が 7mm に到達するまでせん断した。一方、圧密過程において、適宜せん断弾性波速度 V_s を測定し、せん断弾性係数 G を次式により算定した。

$$G = \rho_t \cdot V_s^2 = \rho_t \cdot \left(\frac{L}{t} \right)^2 \quad (1)$$

ここに ρ_t は土の湿潤密度、 L はせん断波の伝播距離、 t はせん断波の到達時間である。

ベンダーエレメント試験から得られる G は共振法試験による G とほぼ等しいことがわかっている⁴⁾。BE は様々な試験装置に取り付けることが可能であり、各試験の進行・結果にほとんど影響を与えない。また、BE 試験は手軽に任意の時点・応力点における供試体の剛性変化を把握できる一種の非破壊試験といえる。

表-2 一面せん断試験対象試料のまとめ

	Z(m)	$w_n(\%)$	$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	$I_P(\%)$
sp1 上	82		72.43	26.37	46.05
sp1 下	82.06	53.0	79.13	24.62	54.51
sp2 上	82.12		76.41	28.83	47.58
sp2 下	82.18		76.13	24.76	51.37
sp3 上	82.24	50.7	77.05	26.15	50.89
sp3 下	82.3		78.68	24.62	54.06
sp4 上	82.36	49.6	69.62	22.00	47.62
sp4 下	82.42	48.9	78.28	27.59	50.69
sp5 上	82.48		74.50	27.55	46.95
sp5 下	82.54	48.8	75.46	26.44	49.02
sp6 上	82.6		81.06	27.52	53.54
sp6 下	82.66	47.8	71.90	25.00	46.90
sp7 上	82.72	47.2	71.93	26.27	45.66
sp7 下	82.78	47.6	72.43	26.37	46.05
average	-	49.5	75.36	26.01	49.35
std	-	2.1	3.34	1.71	3.14
cov(%)	-	4.2	4.44	6.59	6.36

3. 実験結果

(1) 物理特性の一樣性に関する検討

本研究では、地盤内における同一の深さでのばらつきの程度を表す指標として、分散または標準偏差を平均で割った変動係数を用いた。具体的には、長さ 85cm の試料に対する物理・力学特性は同一である仮定して、データのばらつきを変動係数により評価した。

物理試験結果のまとめを表-2に示している。図-7に、液性限界 w_L 、塑性限界 w_P 、液性指数 I_P および自然含水比 w_n (%)のサンプリングチューブ内での分布を示している。それぞれの値の平均は、 $w_L=75.4\%$ 、 $w_P=26\%$ 、 $I_P=49.4\%$ 、 $w_n=49\%$ であった。液性指数はおおよそ0.5である。図-7には、3つの試料の粒径加積曲線を示している。当該試料は、粘土分が 70% 以上あり、3つの試料における粒度分布に大きな差異は認められない。物理試験結果を見る限り、サンプルチューブ内の試料は変動係数5%程度と比較的一様であり、検討した全ての一次的性質に大きなバラツキは見られなかったが、細かく見れば自然含水比の変動より液性・塑性限界および塑性指数の変動の方が大きかった。その原因として、試験者の違いによるヒューマン誤差、試料に混入する貝殻の混入の影響、等が考えられる。とりわけ深さ82.36m付近のsp4up 試料に対しては、図-9の写真に見られるように、試料準備の際、貝殻粉末が他の試料よりも多量に含有したために、液性限界、塑性限界ともに他の試料と比較して若干小さな値を示した。

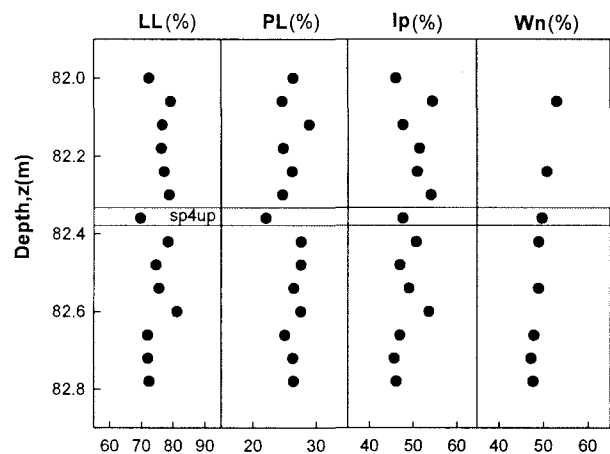


図-7 物理特性の変化

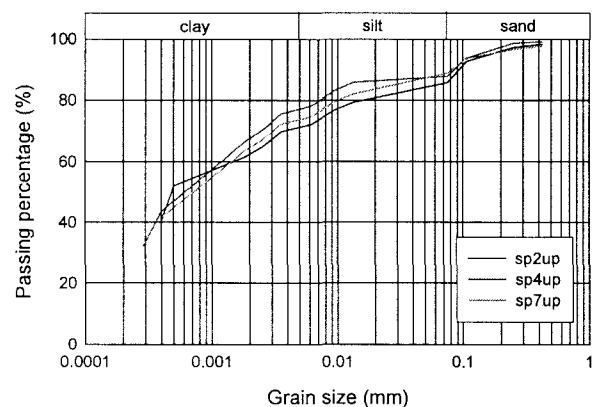


図-8 粒度分布曲線の比較

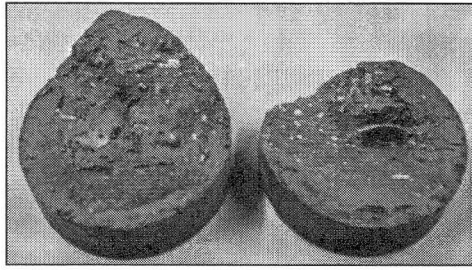


図-9 試料の写真(sp4up)

(2) 力学特性の一様性に関する検討

図-10は、一面せん断試験における水平面上のせん断応力～水平変位関係である。一方、図-11は水平面上のせん断応力～有効鉛直応力の変化のまとめである。前述したように、深さ82.36mから採取した一つの供試体 sp4up 以外は、互いによく似た応力経路およびせん断強度を示している。sp4up供試体の場合、図-9に示すように、せん断面付近には貝殻の破片が散在していたため、貝殻の噛み合わせの影響により強度が大きく測定されたものと考えられる。一面せん断試験では、せん断面を予め特定するため、得られる強度は異物の混入の影響を受けやすい。図-12は、非排水せん断強度 s_u ($=\tau_f$)、 s_u/σ_{vc} 、 ϕ_u (大変位時のせん断抵抗角)および間隙比の深さ方向の変化を示している。供試体 sp4up を除外すると、 s_u/σ_{vc} の値はおおよそ0.35であり、一方 ϕ_u は約30°であった。sp4up試料の s_u 、 s_u/σ_{vc} 、 ϕ_u の値はそれぞれ270.9kPa、0.42、43.7°であり、他の試料の結果に比べ無視できない程度に大きな値を示し、当該試料を含めてばらつきを評価すれば、 s_u 、 s_u/σ_{vc} 、 ϕ_u の変動係数はそれぞれ6.65%、6.65%、17.0%であった。ところが前述のように、当該試験の場合、試験後の供試体のせん断面の観察から(図-9参照)、強度が大きかった原因は、せん断面付近に存在していた貝殻の影響であることが特定できた。したがって、この供試体の試験結果は、本研究で対象としている地盤のばらつきの本質とは無関係と判断できたため、sp4up試料の結果を除くと、 s_u 、 s_u/σ_{vc} 、 ϕ_u の変動係数はそれぞれ2.73%、2.95%、8.02%と小さくなった。

よって、当該サンプルチューブ85cm内の試料に限って言えば、一次的性質の一様性およびせん断の結果ともに一様性が高かったと考えられる。

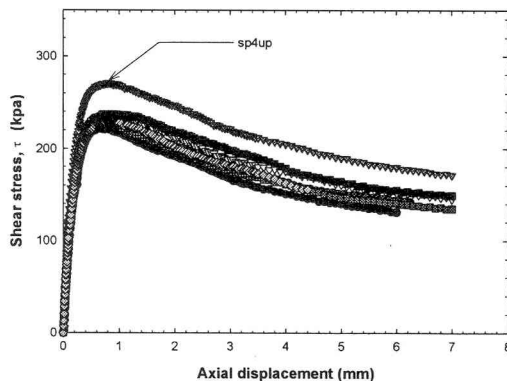


図-10 せん断応力～水平変位関係

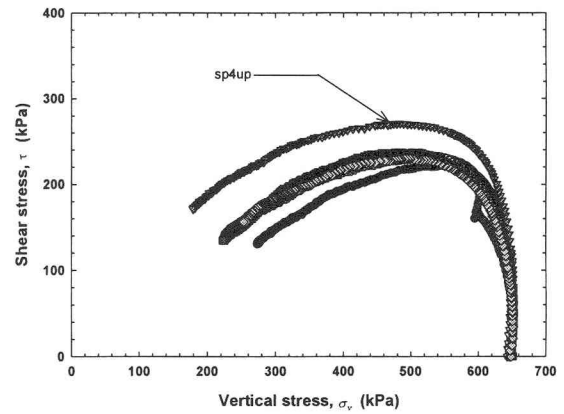


図-11 せん断応力～鉛直応力関係

表-3 初期間隙比、強度増加率、非排水せん断強度、せん断抵抗角のまとめ

	s_u (kPa)	s_u/p	ϕ_u	e_o
sp1 下	221.2	0.34	25.5	1.42
sp3 上	234.4	0.36	32.0	1.41
sp4 上	270.9	0.42	43.7	1.40
sp4 下				1.36
sp5 下	238.5	0.37	31.0	1.38
sp6 下	237.0	0.36	31.1	1.35
sp7 上	229.7	0.35	31.2	1.31
sp7 下	229.6	0.35	31.7	1.36
Average	237.4	0.37	32.3	1.37
Std	15.8	0.02	5.49	0.04
Cov(%)	6.65	6.65	17.0	2.64

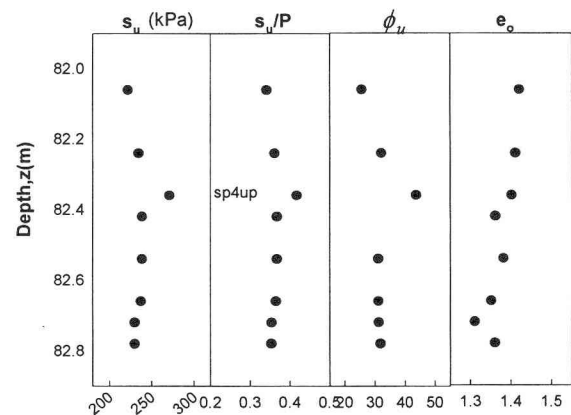


図-12 力学特性の変化

(3) せん断弾性係数に関する検討

せん断波の到達時間の同定法として、本研究では図-6の例に示したように発信波のstart点と受信波のstart点との時間差を Δt とするstart-to-start法²⁾を採用した。図-13、表-4に示すように有効鉛直応力650kPaにおいて一次圧密が終了した時点でのGの測定値は、115～125MPaの狭い範囲

であり、貝殻の存在の有無にかかわらず得られた G_{BE} 値の変動係数は2.64%であり、強度に関する力学諸パラメータよりも一様性が高かった。また、図-13に示す物理特性(I_L)と(G_{BE})の関係を用いて、構造の影響の定量化が可能となる。また、せん断弾性波速度の室内試験での測定値の平均($V_s=266\text{m/s}$)とサスペンション法による原位置の測定値($V_s=300\text{m/s}$)を比較すると、原位置の測定値の方が若干大きかった(表-4)。この理由として、採取試料の乱れの影響による室内試験による G の低下が考えられる。また、異なる試験方法および異なる試験条件下での結果のばらつきをどう評価し、設計に反映するかが今後の重要な課題になると考えられる。

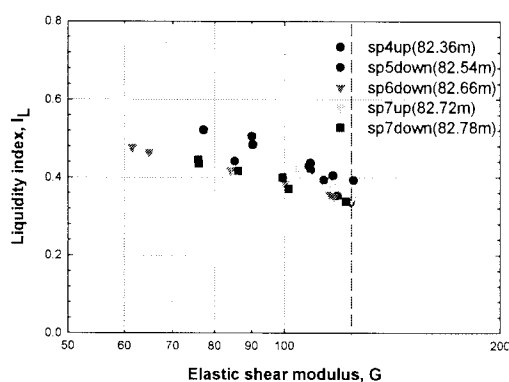


図-13 液性指数-せん断弾性係数関係

表-4 現場 V_s 探査と室内ベンダー試験結果の比較

	ベンダー試験結果		現場試験結果
	V_s (m/s)	G_{BE} (MPa)	V_s (m/s)
sp4 上	268	125	300 (サスペンション法)
sp5 下	268	125	
sp6 下	260	117	
sp7 上	266	124	
sp7 下	266	121	
Average	266	124	
Std	3.31	3.12	
Cov(%)	1.25	2.56	

4. まとめ

本研究は、自然に堆積した洪積粘土地盤の力学的諸性質のばらつきを評価した沈下(変形)・安定解析法の確立のための第一段階として、室内実験により神戸空港建設地の海底地盤から採取したサンプルチューブの一次的性質および力学的特性および構造の一様性を数cm単位で明らかにした。得られた結論をまとめるとつぎのようになる。

物理試験結果を見る限り、サンプルチューブ内の試料は変動係数5%程度として比較的一様であり、検討した全ての一次的性質に大きなバラツキは見られないが、細かく見れば自然含水比の変動より液性・塑性限界および塑性

指数の変動の方が大きかった。

ベンダー要素つき一面せん断試験を実施した結果、長さ85cm内の試料に限って言えば、各種のせん断強度およびせん断弾性係数ともに一様性が高いと考えられる。なかでも、ベンダー試験により得られたせん断弾性係数(G_{BE})の変動係数は2.56%と小さく、このことにより原地盤の堆積環境および構造の発達程度がそれぞれ深さ方向にほぼ同じであったと推定される。

ところで、一つの供試体(sp4up)では、貝殻片が多量に混入していたため、他の供試体と比較して一面せん断強度が大きくなった。せん断面を特定した一面せん断試験では、せん断面付近の異物の混入により、得られる強度が大きな値を示すことが分かった。これは、工学的な地盤強度のばらつきとは本質的に無関係であり、試験結果を整理する上においては、異常値として除外すべきデータである。この例のように、試験後のせん断面の目視による観察は重要である。

今後は、これらの知見を活かして、当該洪積粘土地盤のより広範囲における力学諸特性の一様性を検討し、地盤の力学パラメーターの一様性を考慮した沈下・安定解析法を提案する予定である。

参考文献

- 1) 川口貴之, 谷口浩二, 三田地利之, 澁谷 啓, 古道知広, 佐野侑房: パソコンを用いたせん断弾性波速度測定システムの開発, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第40号, pp.143-150, 2000
- 2) 川口貴之, 三田地利之, 澁谷 啓, 佐野侑房: 室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数 G の評価, 土木学会論文集, No.694/III-777, pp.195-207, 2001.
- 3) Viggiani, G. and Atkinson, J. H.: Interpretation of bender element tests, *Géotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154, 1995.
- 4) Dyvik, R. and Madshus, C.: Lab measurements of G_{max} using bender elements, *Proceedings of the ASCE annual convention*, Detroit, pp. 186-196, 1985.
- 5) Jovicic, V., Coop., M.R. and Simic, M.: Objective criteria for determining G_{max} from bender element test, *Géotechnique*, Vol.46, No.2, pp.357-362, 2000.
- 6) Lohani, T.N., Imai, G. and Shibuya, S.: Determination of shear wave velocity in bender element test, *Proceedings of the second international conference on earthquake geotechnical engineering*, Lisbon Vol, pp.101-106, 1999.

(2005年4月15日 受付)