

## 締固め方法が細粒分質礫質砂の一軸圧縮および ベンダーエレメント試験結果に及ぼす影響

北見工業大学 社会環境工学科	国際会員	○川口貴之
神戸大学大学院 工学研究科	学生会員	高橋正和
北見工業大学 社会環境工学科	国際会員	山下聡

### 1. はじめに

一般に、各種地盤材料を締固めることで構築される道路、堤防、宅地などの盛土構造物は、施工範囲内の多点で測定された全ての締固め度  $D_c$  が許容下限値（管理値）以上であることを確認することによって施工管理されることが多い。盛土構造物の設計時における安定解析にも許容下限値の  $D_c$  に対応したせん断強度が用いられるが、この値はより高い  $D_c$  で締固められた試料のピーク強度よりもはるかに小さい残留強度相当であるため、現状では締固めた盛土のせん断強度はかなり過小評価されている。よって、豪雨やレベルⅡ地震動にも耐えうる盛土構造物の設計を可能にするためにも、現場で出来るだけ高い  $D_c$  を目指した締固めを行うことを奨励し、その結果を正当に設計に反映させる体系にすべきだと指摘されている<sup>1)</sup>。

しかし、これを実現するとともに、 $D_c$  の増加によって改善された工学的性質を定量化して設計に反映させるためには、 $D_c$  をはじめとする様々な因子によって、締固めた土の変形・強度特性がどの程度変化するのがより詳細に把握することが重要となるであろう。この因子には、粒度、含水比、締固め方法などがあることが古くから知られているが、このようなことが背景となつてか、近年この種の研究が再び精力的に行われ始めている（例えば、文献<sup>2), 3), 4)</sup>）。

さてここで、因子の一つである締固め方法に着目すると、動的と呼ばれる衝撃や振動等による締固め方法と静的と呼ばれる衝撃や振動等を用いずに等分布的な圧力による締固め方法とでは、含水比や密度が同じであっても強度が異なる場合があることは広く知られている。これを実務に当てはめると、小型のタンパー（≡動的）やロードローラー（≡静的）が併用される施工では、同一盛土層内に含水比や密度が同じであっても強度が異なる箇所が存在することを意味しており、この違いや原因を詳細に把握することは先述の目的を考えても将来的に有用だと考えられる。この種の研究は細粒分を多く含む土を対象にしたものが比較的多く、強度が異なる原因は構造の違いにあると説明されることが多い。Yong and Warkentin<sup>5)</sup> は締固め方向（層面に垂直）にせん断した場合には動的よりも静的に締固めた粘土試料の方が大きな強度を有し（垂直方向（層面に平行）ではその逆）、それは静的に締固めた方が配向した構造（動的はランダム構造）だからだとしている。Seed et al.<sup>6)</sup> は最適含水比よりも湿潤側のシルト質粘土を用いた三軸非排水せん断試験、鬼塚ら<sup>7)</sup> は白色粘土を用いた一面せん断試験で同様な結果を報告している。また、川尻ら<sup>4)</sup> は堤防強化工事で使用された細粒分質礫質砂を用いた三軸非排水せん断試験において、静的に締固めた後に飽和させた供試体の非排水せん断強度は動的のものよりも 2 倍程度大きいことを示し、その理由はベンダーエレメント（以下、BE）試験より得られた弾性係数の異方性を根拠として、土構造の異方性にあると結論付けている。しかしながら、構造に関する解釈やせん断方法・条件の違いがあり、土質も比較的限定されていることから、現時点で統一的な見解が得られているとは言い難い。なお、土質によってその程度に差があることは鬼塚<sup>8)</sup> らも指摘している。

そこで本研究では、川尻ら<sup>4)</sup> が使用した試料と同土質分類であるものの、土質が若干異なる土試料を対象とし、異方性に着目して一軸圧縮試験、BE 試験、供試体断面の観察を行い、締固め方法による強度・剛性の違いとその原因について検討した。

## 2. 試験方法・条件

本研究に用いた試料は淀川の堤防拡幅工事に用いられた細粒分礫質砂(SFG) ( $\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$ ,  $w_L=31\%$ ,  $w_P=19\%$ ) であり, 室内試験での供試体サイズを考慮して, 最大粒径  $D_{\max}=19\text{mm}$  のせん頭粒度に調整したものである. なお, 先述の川尻ら<sup>4)</sup> が用いた試料 ( $\rho_s=2.67\text{g/cm}^3$ ,  $w_L=34\%$ ,  $w_P=21\%$ ) (以下, 比較試料) と同分類名ではあるが, 土質が若干異なっている.

図1は本試料の粒径加積曲線である. 図中には比較試料の結果についても示しているが, 本試料に比べてほんのわずかに粘土分が多く, 砂分が少ない程度で, ほぼ等しい粒度組成であることが分かる. 図2はJIS A 1210に規定されるA-a法に準じて得られた本試料の締固め曲線である. なお, 図中にはA-b法に準じて得られた比較試料の締固め曲線も示しているが, これについてはある程度の違いが見られ, 本試料の最適含水比  $w_{\text{opt}}$  の方が大きく (13.6%), 最大乾燥密度  $\rho_{\text{dmax}}$  は小さい ( $1.88\text{g/cm}^3$ ).

本研究で用いた供試体の形状は直径 10cm, 高さ 20cm の円柱供試体と 1 辺 12cm の立方体供試体の 2 種類である. いずれの供試体も 1 層あたりの高さは 4cm とし, 円柱供試体では 5 層, 立方体供試体では 3 層から構成されている. 供試体の目標含水比と乾燥密度は作成の容易さやばらつきを考慮して,  $w_{\text{opt}}$ ,  $\rho_{\text{dmax}}$  よりもそれぞれわずかに小さな 13.2%,  $1.83\text{g/cm}^3$  とし, 十分に解きほぐした自然乾燥試料に水道水を加えて十分に攪拌した調整試料を 2 つに分け, 1 度につき動的, 静的の 2 種類の方法で供試体を作成した. 写真1は動的および静的締固めによる円柱供試体, 写真2は立方体供試体の作成過程を表したものである. 動的締固めは所定の乾燥密度にするために必要な 1 層分の調整試料をモールド内に入れ, ほぼ断面のピストン (プランジャー) を挿入し, プラスチックハンマーによって各層が所定の高さ (4cm) になるまで柄の部分打撃した. 静的締固めは動的と同様に所定の量をモールド内に入れた後, ピストンの柄が反力フレームに剛結された荷重計に接触するように載荷装置にセットし, 所定の高さになるまで手動で載荷台を持ち上げた. なお, 層境界はなじみが良くなるよう表面に傷をつけ, 静的締固めでは荷重の推移を計測した.

一軸圧縮試験は先述の静的締固めで使用した載荷装置を使用し, この性能を考慮して円柱・立方体供試体ともに軸ひずみ速度は  $0.8\%/min$  とした. なお,

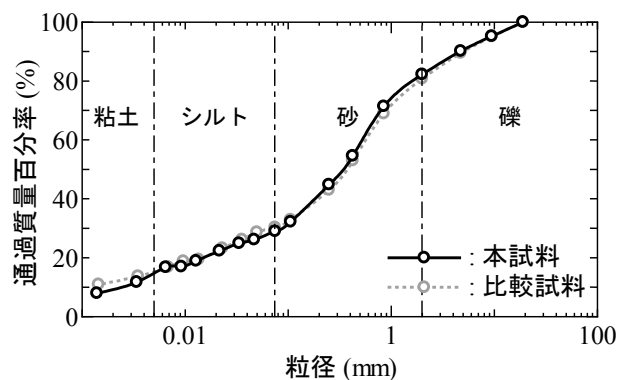


図1 粒径加積曲線

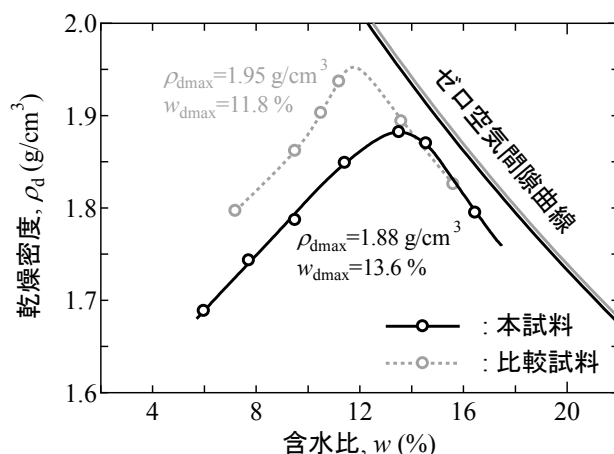


図2 締固め曲線

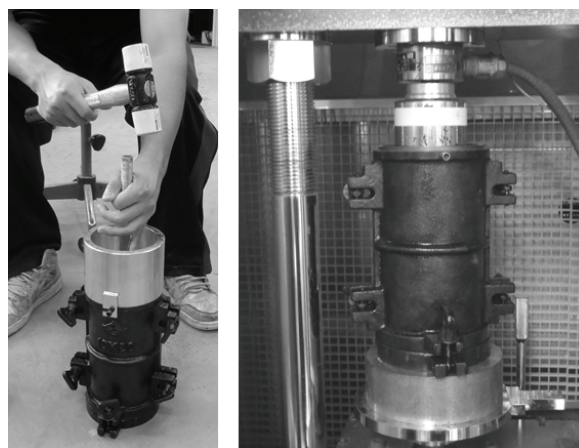


写真1 円柱供試体作成の様子 (左: 動的, 右: 静的)

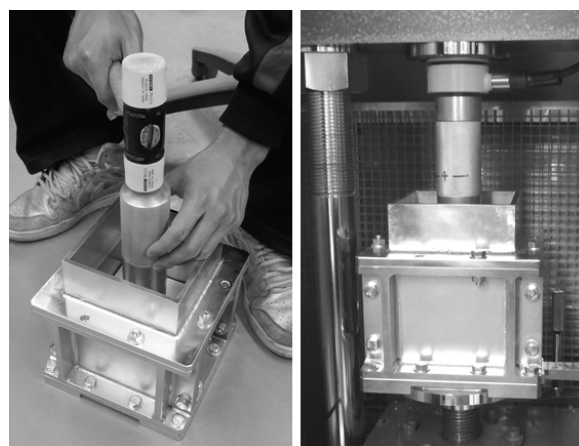


写真2 立方体供試体作成の様子 (左: 動的, 右: 静的)

立方体供試体を用いた試験は層面に垂直な方向（締め固め方向に平行）に载荷する一般的な一軸圧縮試験だけでなく、層面に平行な方向（締め固め方向に垂直）に载荷する試験も実施した。立方体供試体の一軸圧縮試験では端部拘束等の影響によって正確な圧縮強度が得られるとは考えにくい、両者の結果を比較することで強度異方性の程度を把握する目的で実施している。

BE 試験は一軸圧縮試験を実施する直前の立方体供試体に対して実施した。写真 3 は BE 試験の様子を表したものであり、所定の位置で BE を固定することが可能な治具を用いて行った。BE を本供試体に挿入することは極めて困難であったため、BE 先端を供試体表面に接触・固定することで行った。図 3 は BE 試験結果の一例である。試験結果からせん断弾性係数  $G$  を算出するにあたっては、基本的に JGS 0544 : 2011「ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法」で推奨されている方法に従った。複数の送信電圧周波数を用いて BE 試験を実施したが、8kHz の送信電圧周波数を用いた試験の大部分において送信電圧の周期と受信電圧における初動の周期がほぼ等しく、受信電圧の初動までに送信電圧周期の 2 倍以上の時間があつたため、全試験共通に 8kHz の送信電圧周波数を用いた際の送受信電圧波形から伝播時間を同定した。伝播時間は Start-to-start と Peak-to-peak の平均時間とし、ほぼ全ての結果においてこの差が伝播時間の 3% 以下であることを確認している。図 4 は本研究において BE の設置位置・方向を変えることによって測定したせん断弾性波の種類とそれによって得られる  $G$  の名称を示したものである。本研究では、あくまで層面（締め固め方向に垂直な面）を基準として、層面に水平方向に振動しながら垂直方向に伝播する弾性波から得られた弾性係数を  $G_{vh}$ 、振動・伝播方向ともに水平方向の波から得られたものを  $G_{hh}$ 、水平方向に振動しながら垂直方向に伝播する波から得られたものを  $G_{hv}$  と定義する。一部の供試体では層や境界における剛性の分布を把握するため、複数点で各種  $G$  を計測した。なお、円柱供試体においても BE 試験の実施を試みたが、高さ方向（20cm）では送信電圧を増幅させても減衰の影響によって妥当な  $G$  が得られなかった。

供試体断面の観察については、観察用に別途作成した供試体を構造が壊れないように固化させ、その切断面をスキャナーで読み取ることで行った。供試体の固化は 110℃ 程度に保ったパラフィン内に数日間浸し、間隙空気および間隙水をパラフィン（融点 70℃）と置き換えた後に冷却することで行い、切断には岩石カッターを用いた<sup>9)</sup>。パラフィンに浸した当初は供試体から大量の空気が放出されるが、表面の崩壊などは一切見られなかった。

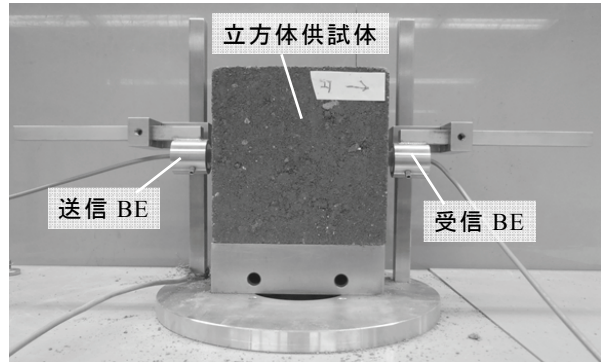


写真 3 BE 試験の様子

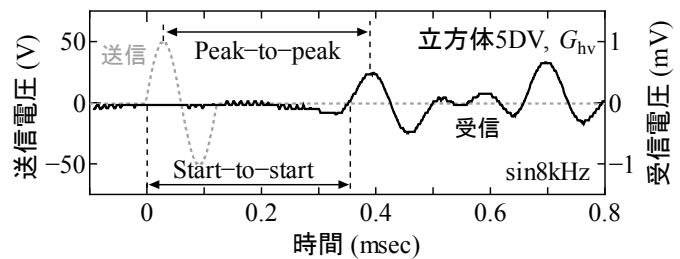


図 3 BE 試験結果の例

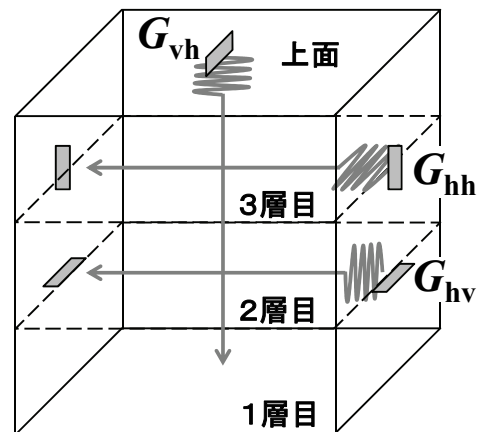


図 4 せん断弾性波の種類と測定法



### 3. 試験結果・考察

表 1 は本研究で作成した供試体の物性値と一軸圧縮試験結果をまとめたものである。供試体名における数字が同じものは同一含水比調整試料から作成されたことを意味しており、D と S はそれぞれ動的締固めと静的締固め、V と H はそれぞれ層面に対して垂直な方向に载荷したものと水平に载荷したものを示している。湿潤密度  $\rho_t$  は一軸圧縮試験直前、含水比  $w$  は一軸圧縮試験後の供試体を用いて測定しており、これから計算される乾燥密度  $\rho_d$  は目標値 1.83 に対して 1.80～1.84、 $w$  は目標値 13.2 に対して 12.4～14.0 の範囲でばらついていることが分かる。

図 5 は円柱供試体に対して実施した一軸圧縮試験より得られた軸応力  $\sigma$  ～軸ひずみ  $\varepsilon$  関係である。これまでに報告された研究成果<sup>4)～8)</sup>とは異なり、動的な締固め方法で作成された供試体（以下、動的供試体）の方が大きな一軸圧縮強度を有することが分かる。ここに示した供試体の乾燥密度はいずれも動的供試体の方が大きい（表 1 参照）、同じ含水比調整試料から作成された立方体 3DV と 3SV、立方体 5DV と 5SV では、乾燥密度の大小が逆であっても動的供試体の強度が 1 割程度大きい。また、同じ含水比調整試料から作成された供試体間では、供試体形状や载荷方向によらずに動的供試体の方が大きいことから、たとえ密度や含水比が同じであっても、動的供試体は静的な締固め方法で作成された供試体（以下、静的供試体）に比べて、少なくとも 1 割程度大きい強度を有すると考えられる。すなわち、この結果は試料やせん断方法によっては動的供試体の方が大きい強度を有する場合があることを示している。なお、各供試体は等しい密度（供試体高さ）になるように作成しているにもかかわらず、大部分において静的供試体における湿潤・乾燥密度の方が小さくなった原因については、作成直後から試験開始までに試料が膨張したこと以外には考えられない。同様な方法で作成した供試体を飽和させて実施した三軸試験結果<sup>10)</sup>によると、再圧縮時の圧縮量は静的供試体の方が大きく、これと密接な関係にあると考えられる。また、関連があるかどうかは不明であるが、静的供試体の方がせん断時における（正の）ダイレイタンス傾向が強く、非排水せん断強度は静的供試体の方が平均で 15% 程度大きい<sup>10)</sup>。本研究での圧縮試験はどちらかといえば排水・排気条件に近いと考えられ、排水条件によって強度の大小関係が逆になることを考えれば、本試料の静的・動的供試体の強度差にはダイレイタンスが密接に関与していると考えられる。ただし、非排水せん断時のダイレイタンス傾向およびせん断強度の違いは比較試料に比べると格段に小さく<sup>4)</sup>、この違いがどのような因子によって引

表 1 供試体の物性値と一軸圧縮試験結果のまとめ

供試体名	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 $w$ (%)	一軸圧縮 強度 (kPa)	強度比 (動/静)
円柱1DV	2.06	1.83	12.6	180	1.15
円柱1SV	2.05	1.82	12.8	157	
円柱2DV	2.07	1.84	12.7	191	1.19
円柱2SV	2.05	1.82	12.7	160	
円柱3DV	2.07	1.83	12.9	218	1.31
円柱3SV	2.05	1.82	13.0	167	
立方体1DV	2.07	1.81	14.0	283	1.39
立方体1SV	2.06	1.80	14.0	203	
立方体2DH	2.07	1.82	13.8	189	1.25
立方体2SH	2.05	1.80	13.9	151	
立方体3DV	2.05	1.81	12.9	332	1.08
立方体3SV	2.05	1.82	13.0	308	
立方体4DH	2.06	1.81	13.8	189	1.24
立方体4SH	2.05	1.80	13.9	152	
立方体5DV	2.04	1.81	12.5	339	1.07
立方体5SV	2.04	1.82	12.6	317	
立方体6DH	2.03	1.81	12.4	257	1.15
立方体6SH	2.02	1.80	12.5	223	
立方体7D	2.07	1.83	13.0	-	-
立方体7S	2.04	1.81	13.0	-	

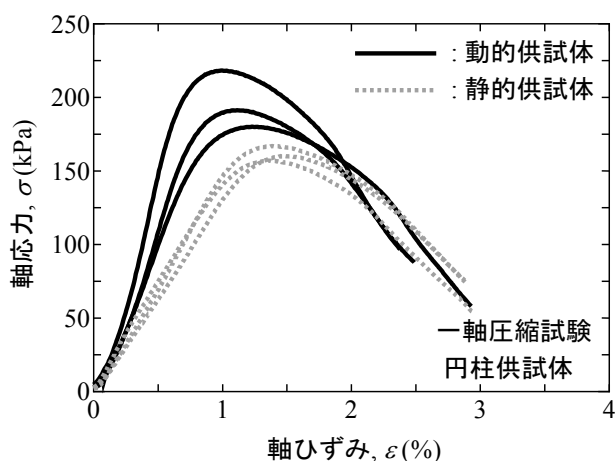


図 5 円柱供試体の  $\sigma \sim \varepsilon$  関係

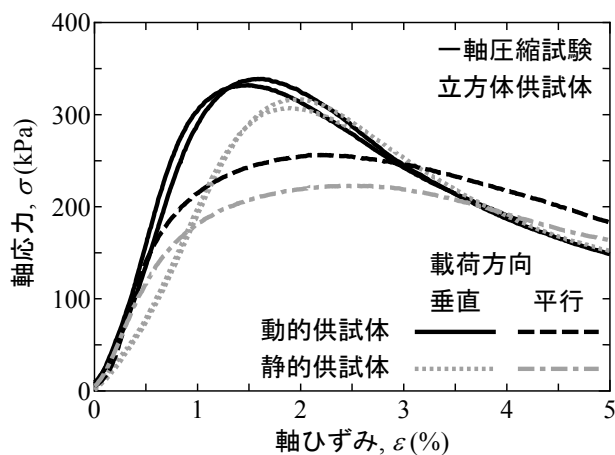


図 6 立方体供試体の  $\sigma \sim \varepsilon$  関係

き起こされるかについては、この結果のみからは判断できない。

図6は $w$ と $\rho_d$ の違いが比較的少ない立方体3DV, 3SV, 5DV, 5SV, 6DH, 6SHの $\sigma \sim \varepsilon$ 関係を比較したものである。層面に対する荷重方向が同じであれば動的供試体の方が強度が大きく、作成方法が同じであれば広く知られているように層面に対して垂直に荷重した方が脆性的かつ強度が大きい。鬼塚ら<sup>7)</sup>は白色粘土において静的供試体と動的供試体では強度異方性が逆になることを示しているが、本試料においてはこのような傾向は見られなかった。図7は立方体供試体で得られた一軸圧縮強度を比較したものである。広く知られているように供試体の $w$ が $w_{opt}$ よりもわずかに小さい方が強度が大きい傾向にある。また、動的供試体と静的供試体で強度異方性の程度に大きな差は無いように見受けられ、本試料では過去の研究で指摘されているような、配向した構造になるために静的供試体の方が異方性の程度が大きくなるという傾向は確認できない<sup>4)~8)</sup>。

表2はBE試験によって得られた $G$ の値と種類、測定位置、測定順をまとめたものであり、図8はこれに対応するBEの測定位置と接触させた方向を示したものである。測定数が多い立方体5DV~7SについてはBE試験に1.5~2時間程度を要するため、供試体が乾燥する影響を考慮して測定する順序を変えている。また、境界条件の違い（底盤との接触面）も考慮して、

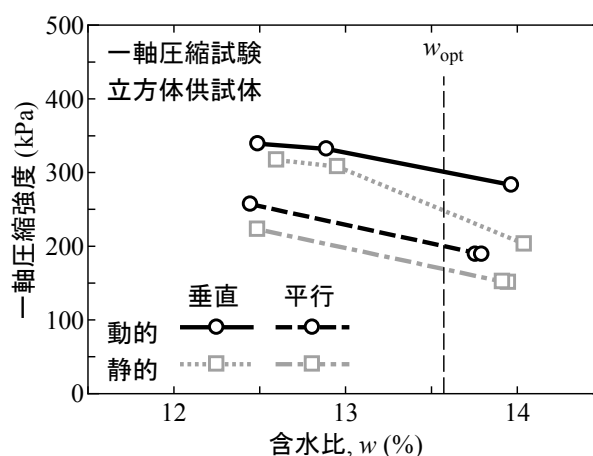


図7 一軸圧縮強度の比較

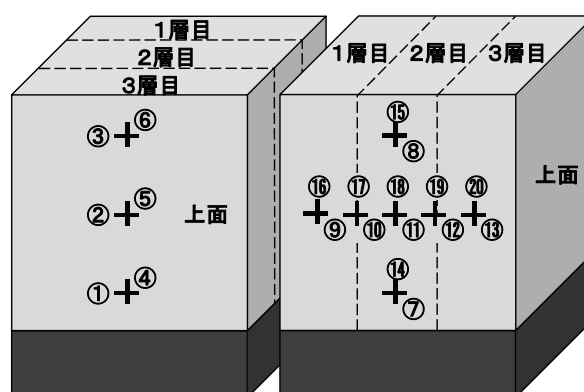


図8 BEの測定位置と向き（表2と対応）

表2 BE試験によって得られた $G$ の値、種類、測定位置、測定順のまとめ

$G$ の種類		$G_{vh}$ (MPa)						$G_{hh}$ (MPa)						$G_{hv}$ (MPa)						分散 $\sigma$		
測定位置		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳		
立方体1DV	$G$	-	153.2	-	-	-	-	-	-	-	-	162.7	-	-	-	-	-	-	166.5	-	-	-
立方体1SV	$G$	-	124.8	-	-	-	-	-	-	-	-	122.4	-	-	-	-	-	-	126.4	-	-	-
立方体2DH	$G$	-	143.8	-	-	-	-	-	-	-	-	156.7	-	-	-	-	-	-	155.4	-	-	-
立方体2SH	$G$	-	115.9	-	-	-	-	-	-	-	-	114.0	-	-	-	-	-	-	116.7	-	-	-
立方体3DV	$G$	-	184.9	-	-	-	-	-	-	-	-	186.1	-	-	-	-	-	-	188.0	-	-	-
立方体3SV	$G$	-	172.7	-	-	-	-	-	-	-	-	166.6	-	-	-	-	-	-	166.3	-	-	-
立方体4DH	$G$	-	136.5	-	-	-	-	-	-	-	-	130.0	-	-	-	-	-	-	143.8	-	-	-
立方体4SH	$G$	-	113.6	-	-	-	-	-	-	-	-	101.8	-	-	-	-	-	-	110.0	-	-	-
立方体5DV	$G$	180	174	178	173	177	172	-	-	219	210	213	179	164	-	-	217	241	222	201	161	23.9
	平均	175.6						196.9						208.2						-		
	測定順	6	5	4	3	2	1	-	-	11	10	9	8	7	-	-	16	15	14	13	12	-
立方体5SV	$G$	181	162	164	167	157	161	-	-	163	156	155	168	167	-	-	166	185	176	187	157	9.8
	平均	165.3						161.8						174.1						-		
	測定順	6	5	4	3	2	1	-	-	11	10	9	8	7	-	-	16	15	14	13	12	-
立方体6DH	$G$	231	207	225	202	200	205	212	214	205	210	200	193	173	199	192	176	209	198	187	161	16.2
	平均	211.7						201.0						189.0						-		
	測定順	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	-
立方体6SH	$G$	195	201	187	178	177	174	178	168	173	172	173	172	159	172	170	154	183	182	175	138	13.3
	平均	185.2						170.7						167.7						-		
	測定順	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	-
立方体7D	$G$	212	217	231	206	207	233	229	249	276	247	236	220	215	241	241	260	286	253	257	220	21.8
	平均	217.5						238.6						251.0						-		
	測定順	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	-
立方体7S	$G$	193	181	189	178	179	186	185	197	168	180	204	191	188	182	201	161	211	197	213	187	12.8
	平均	184.3						187.4						193.1						-		
	測定順	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	-

供試体の設置方向を変えて試験もしたが、この影響については特に見られなかった。表 2 からわかるように、各  $G$  ( $G_{vh}$ ,  $G_{hh}$ ,  $G_{hv}$ ) の平均値は測定する順に幾分大きくなる傾向にあるため、供試体の乾燥によって生じるサクシジョンの増加が  $G$  の大きさに影響していることが伺える。また、供試体を直交異方弾性体だと仮定すれば  $G_{vh}$  と  $G_{hv}$  は等しくなることを加味して、弾性係数の異方性については測定した  $G_{vh}$  と  $G_{hv}$  の全ての平均  $AVG(G_{vh}, G_{hv})$  と  $G_{hh}$  の平均  $AVG(G_{hh})$  を用いて検討することにした。

図 9 は BE 試験を実施した全ての立方体供試体における  $AVG(G_{hh})$  と  $AVG(G_{vh}, G_{hv})$  を比較したものである。一般に、 $G_{hh}/G_{vh}(G_{hv})$  が 1 より大きくなるほど、より配向した構造にあると判断されるが<sup>11), 12)</sup>、両者にその違いはほとんど見られず、むしろ傾きは動的供試体の方がわずかに大きいことが分かる。このように、本試料では動的供試体と静的供試体の間で強度、剛性ともに異方性の明らかな差異が確認できなかったが、比較試料では  $G_{hh}$  が  $G_{vh}$  よりも 2~3 割程度大きいことが報告されている<sup>4)</sup>。本試料と比較試料に相違点が少ないことを考えると、作成方法によって生じる異方性の程度差がダイレイタンス挙動や強度特性の違いに関与している可能性があると言えよう。

図 10 は供試体側面で測定した  $G_{hv}$  と  $G_{hh}$  を比較したものである。表 2 および図 9 から確認できるが、静的供試体の方が全体的に  $G$  の値が小さい。弾性波は硬質な部分を通る性質があるため、この違いが直接強度差に結びついていると断言はできないが、せん断中に発揮されるダイレイタンス以外にもこのような初期状態における剛性の違いそのものが強度差を誘引している可能性もあり、今後作成した供試体のサクシジョン計測も試みたいと考えている。次に、動的供試体の方が  $G$  のばらつきが大きく、下層に近づくほど大きくなる傾向にあることが分かる。このことは表 2 に示した分散の違いからも確認できる。写真 4 は観察用に作成した動的・静的供試体の断面画像を比較したものである。1 層分の締固め試料を中心部で鉛直方向に分割し、その断面を観察したものが鉛直断面、分割された片方を層の高さ中央 (2cm) で水平方向に分割し、その断面を観察したものが水平断面である。画像のみから違いを判別することは困難であるが、動的供試体の方が大きい粒径の礫が下方に多く位置するように見受けられる。これは図 10 に示した結果とも整合しており、比較試料を用いて実施した X 線 CT スキャン画像から得られた密度 (GL 値) 分布からも同様な結果が得られていることを考えると<sup>13)</sup>、砂質土では締固め方法の違いによって生じる共通な現象なのかもしれない。次に、動的供試体の方が鉛直断面において礫の長軸が比較的水平に近く、水平断面で礫の断面が大きく見えることから、粒径の大きな礫に関しては静的供試体よりも配向しているように見受けられ、これについてもわずかなではあるが確認された図 9 の結果と整合しているように思われる。また、静的供試体では大きな礫の周辺に比較的ゆるい部分 (クラック) が確認され、このような弱部の存在が強度低下に影響している可能性もある。今後は層境界や層間の違いを確認するためにも多層供試体の断面観察も試みたいと考えている。また、土質 (粒度) が異なる試料についても同様な検討を行い、締固め方法によって変形・強度特性が異なる要因について更に検討していきたいと考えている。

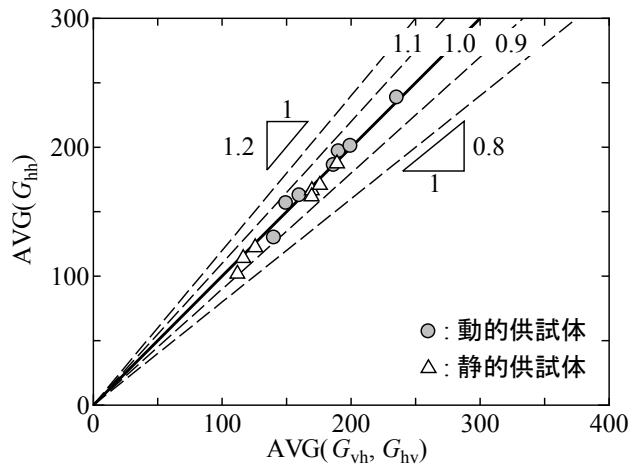


図 9  $AVG(G_{hh})$  と  $AVG(G_{vh}, G_{hv})$  の比較

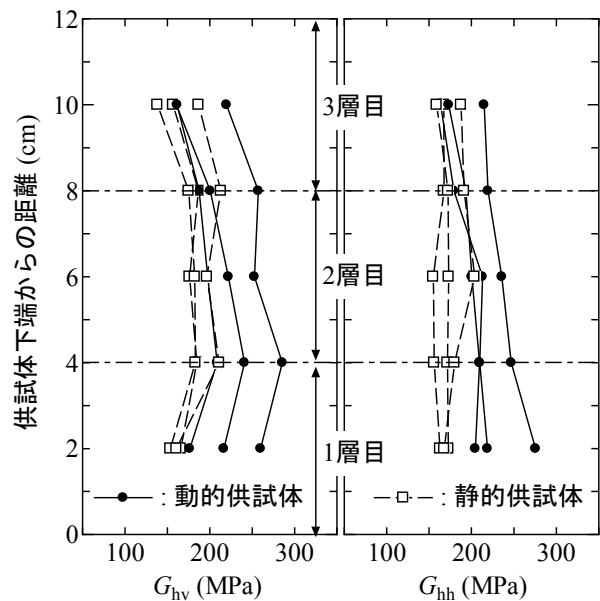


図 10 供試体側面で測定した  $G_{hv}$  と  $G_{hh}$  の比較

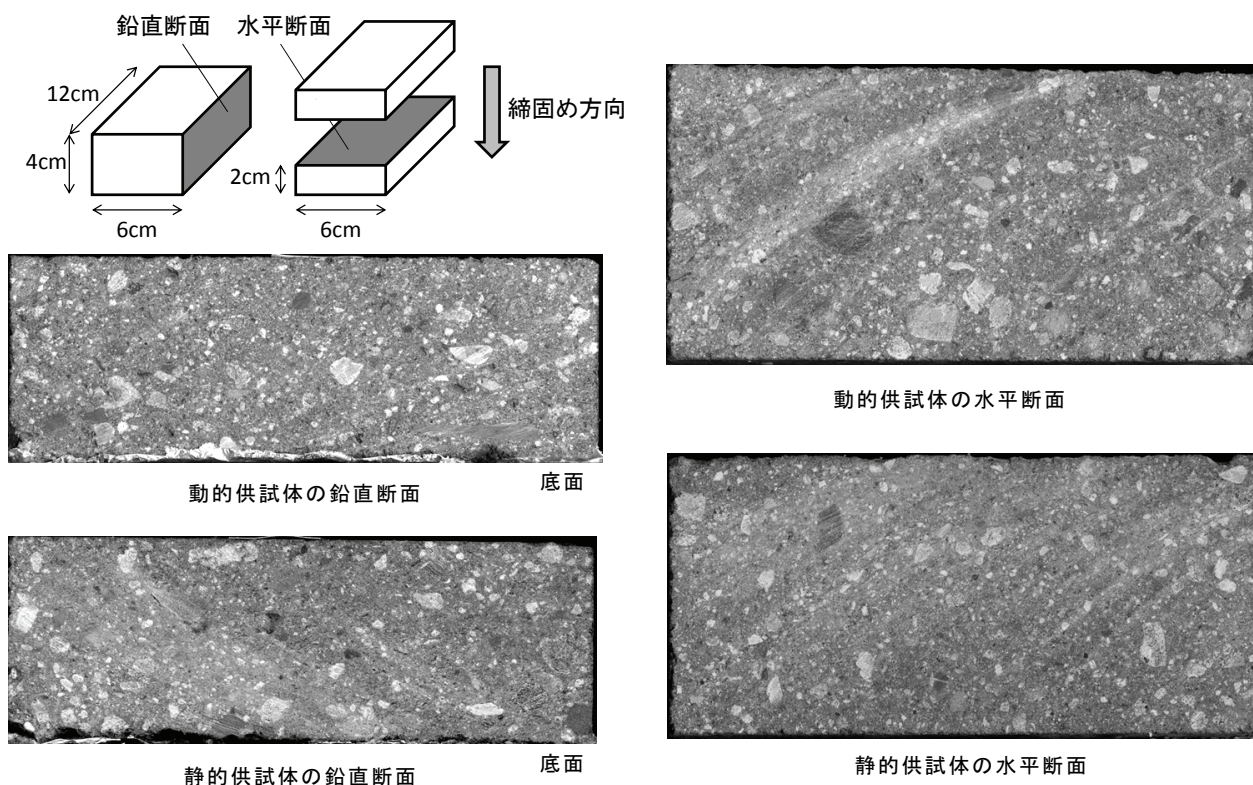


写真 4 観察用供試体の断面画像

#### 4. まとめ

本研究では、締め固め方法による強度・剛性の違いとその原因を探るために、細粒分質礫質砂に分類される土試料を動的、静的の 2 種類の方法で締め固め、異方性に着目して一軸圧縮試験、BE 試験、供試体断面の観察を行った。これより得られた結果を以下にまとめる。

- ・ 載荷方向によらず一軸圧縮強度については動的供試体の方が大きかった。これより、試料やせん断方法によっては動的供試体の方が大きい強度を有する場合があることが確認された。
- ・ 同じ試料を用いた非排水三軸圧縮試験では強度の大小関係が逆になったことから、強度の違いにはダイレイタンスーが密接に関与していると考えられる。
- ・ 動的供試体と静的供試体には強度異方性の程度に大きな差は無く、過去の研究で報告されているような、静的供試体の方が配向した構造になるために異方性の程度が大きくなるという傾向は確認されなかった。
- ・ 本試料ではせん断弾性係数についても大きな異方性の違いは確認されず、他の試料との比較から作成方法によって生じる異方性の程度差がダイレイタンスー挙動や強度の違いに影響している可能性が示唆された。
- ・ せん断弾性係数は動的供試体の方が全体的に大きく、このような初期状態における力学特性の差異がせん断時のダイレイタンスー挙動や強度の違いに関与している可能性が示唆された。
- ・ 動的供試体の方が  $G$  のばらつきが大きく、下層に近づくほど大きくなる傾向にあり、これは断面観察結果とも整合しているように見受けられた。

## 参考文献

- 1) 龍岡文夫：盛土の締固め管理と設計の協働の必要性，基礎工，Vol.37，No.7，2009.
- 2) 平川大貴，川原園美幸，龍岡文夫：砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響，土木学会論文集 C，Vol. 64，No. 2，pp.253-266，2008.
- 3) 上本雄也，澁谷啓，橋元洋典，川尻峻三：砂礫盛土材の締固め特性および変形・強度特性に及ぼす粒度特性の影響，地盤工学ジャーナル，Vol.6，No.2，pp.181-190，2011.
- 4) 川尻峻三，川口貴之，澁谷啓，高橋正和：締固めた地盤材料の変形・強度特性に及ぼす締固め時の含水比および締固め方法の影響，土木学会論文集 C，Vol.67，No.4，pp.532-543，2011.
- 5) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. : Introduction to Soil Behavior, Macmillan, 1966. (山崎不二夫，山内豊聡 監修・訳：土質工学の基礎，鹿島出版会，1972.)
- 6) Seed, H. B., Mitchell, J. K. and Chan, C. K. : Structure and strength characteristics of compacted clays, Journal of SMFD, Proc. of ACSE, SM5, pp.87-125, 1959.
- 7) 鬼塚克忠，林重徳，吉武茂樹，大石英隆：締固めた土の圧縮及び強度異方性について，土質工学会論文報告集，Vol.19，No.3，pp.113-123，1979.
- 8) 鬼塚克忠，吉武茂樹：締固めた混合土の強度異方性について，土質工学会論文報告集，Vol.23，No.4，pp.149-156，1983.
- 9) 山崎新太郎・千木良雅弘：エポキシ樹脂とパラフィンを用いた脆弱な破砕帯物質・風化岩の断面標本作製法，応用地質，Vol.50，No.5，289-294，2009.
- 10) 高橋正和，川口貴之，鳥居宣之，澁谷啓：締固め方法が細粒分質礫質砂の三軸試験結果に及ぼす影響，地盤工学会北海道支部技術報告集，No.52，2012（印刷中）.
- 11) 山下聡，堀智仁，鈴木輝之：異方応力状態でのせん断波速度に及ぼす伝播方向と堆積方向の影響，土木学会論文集，No.722/III-61，pp.387-392，2002.
- 12) Kawaguchi, T., Yamashita, S., Kawajiri, S., Kataoka, S. and Shibuya, S. : Inherent and induced anisotropy of three natural sedimentary clays reflecting on the elastic shear modulus, Proc. of 4th International symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Atlanta, Vol.2, pp.575-578, 2008.
- 13) 高橋正和，川尻峻三，川口貴之，澁谷啓，水谷崇亮：締固め方法及び含水比がシルト質土の内部構造に及ぼす影響について，第 46 回地盤工学研究発表会 CD-ROM，pp.345-346，2011.