

洋上風力地盤調査における単純せん断試験に関する実験的考察

－供試体拘束方法の違いが結果に与える影響－

応用地質株式会社 ○ 岩下智哉、小野正樹

1. はじめに

沖合海上における洋上風車基礎のボーリング調査は極めて高額で、採取した地盤試料も貴重である。この点、欧州で広く普及する単純せん断試験は、供試体サイズが直径5cm、高さ2cm など三軸圧縮試験に比べ小さく、同じ試料量でより多くの試験が実施できる点で有利である。

単純せん断試験は直接せん断試験の一種で、供試体の側方向変位を拘束した K_0 状態で供試体に一樣なせん断ひずみを生じさせて試料の強度・変形特性を求める試験である。本試験は、ASTM（米国試験材料協会）、NORSOK（ノルウェー標準海洋規格）で基準化されているが、日本国内では基準化されておらず、試験ノウハウの蓄積も少ない。実務で多用される単純せん断試験方法には、SGI 型と NGI 型の2種類があり、ASTM ではどちらの方法で試験を行っても良いとされている。SGI 型が薄いリングを積み重ねて（以下、積層リングと称す）供試体を拘束するのに対し、NGI 型ではワイヤーで補強されたメンブレン（以下、ワイヤーメンブレン）で拘束する違いがある¹⁾。本稿は、今後の国内の試験基準化も視野に、供試体の拘束方法の違いが繰返しせん断挙動へ与える影響を実験的に考察したものである。

なお、実験は、波浪外力に対する洋上風車基礎設計のための試験を考慮し、繰返し载荷にて実施した。

2. 積層リングとワイヤーメンブレンの違い

(1) 見かけのせん断抵抗の違い

実験に用いた積層リング（GDS 社製、リング1枚の厚さ1.1mm×22枚）とワイヤーメンブレン（Geonor 社製、メンブレン厚さ0.5mm）を図-1に、単純せん断試験機を図-2に示す。本検討では初めに、これら拘束治具の剛性を把握するための実験を行った。供試体がない状態で通常のメンブレンに積層リングをセットしたケースとワイヤーメンブレンをセットしたケースの2ケースで、押し、引きともに3mm（供試体高さ2cm の場合、せん断ひずみ15%に相当）の繰返し変位を1回加えて、その時の見かけのせん断抵抗値を測定した。



図-1 ワイヤーメンブレン(左)と積層リング(右)

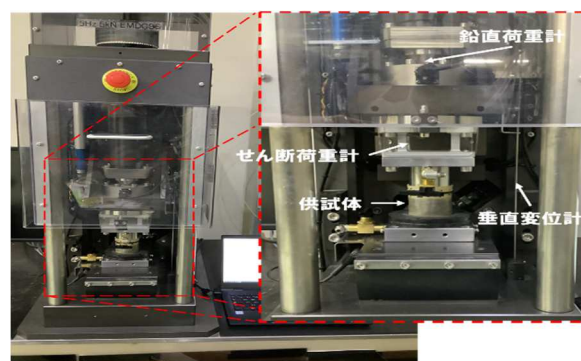


図-2 単純せん断試験機

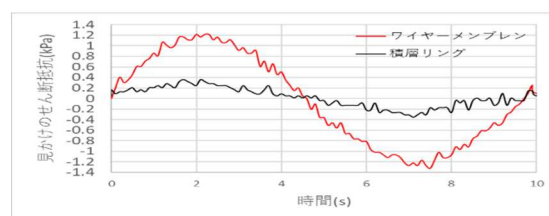


図-3 見かけのせん断抵抗

積層リングでは見かけのせん断抵抗（ $\phi 50\text{mm}$ 供試体を仮定してせん断力を断面積で除した値）が最大で0.36kPa、最小で-0.36kPa となり、ワイヤーメンブレンでは最大で1.23kPa、最小で-1.37kPa となった（図-3）。積層リングよりもワイヤーメンブレンのせん断抵抗が大きく、積層リングではせん断の押し側（+側）と引き側（-側）で見かけのせん断抵抗に差がほとんどないのに対し、ワイヤーメンブレンでは、せん断の押し側と引き側で0.14kPa の差があった。今回使用したワイヤーメンブレンは、ワイヤーのねじれ・歪みに起因したくせのようなものがあり、これが押し引きのせん断抵抗の差を生じさせた要因と考えられる。

(2) 見かけのせん断抵抗の異方性

見かけのせん断抵抗の異方性を確認するために、载荷方向を 30° ごとに $0^\circ \sim 150^\circ$ まで変化させ、繰返し载荷を行った。結果を表-1に示す。積層リングは、载荷方向を変更してもせん断抵抗にほとんど差が見られず、押し側と引き側のせん断抵抗もほぼ同じであった。一方で、ワイヤーメンブレンでは押し側と引き側のせん断抵抗に差が見られ、载荷方向が 0° の時に押し引きの差が最も小さく、载荷方向が 90° の時に最も差が大きい結果となった。

以上から、今回用いたワイヤーメンブレンは、積層リングに比べて载荷時のせん断抵抗が大きく、その大きさは载荷方向によって若干異なること、また押しと引きで異なるせん断抵抗を示す方向があることが分かった。

表-1 各載荷方向の見かけのせん断抵抗

載荷方向°	見かけのせん断抵抗(kPa)					
	0	30	60	90	120	150
積層リング (最大)	0.36	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35
積層リング (最小)	-0.36	-0.36	-0.36	-0.36	-0.35	-0.36
ワイヤーメンブ レン(最大)	1.35	1.22	1.43	1.17	1.32	1.43
ワイヤーメンブ レン(最小)	-1.35	-1.32	-1.22	-1.43	-1.38	-1.22

3. 拘束方法を変えた粘土の繰返し単純せん断試験

(1) 試料と試験条件

有明海沿岸域で採取された粘土試料（シンウォール採取）を用いて繰返し単純せん断試験を行い、積層リングとワイヤーメンブレンの比較実験を行った。ワイヤーメンブレンについては、せん断抵抗の差が最も小さい載荷方向 0° と、差が最も大きい載荷方向 90° の2つの実験を行い、載荷方向による剛性の違いが繰返しせん断挙動に与える影響を調べた。今回の実験は、NORSOK G-001に準拠して行った²⁾。試験条件は、圧密定体積条件で、載荷周波数 f は0.1Hzとした²⁾。垂直応力 σ_v は60kPa、繰返しせん断応力 τ は17kPaとし、両振幅ひずみ DA が15%に達したときを試験終了とした。供試体の諸元を表-2に示す。

表-2 試料の諸元

拘束治具	載荷方向	供試体寸法	自然含水比(%)	湿潤密度(Mg/m ³)
ワイヤーメンブレン	0°	D=50mm H=20mm	105.6	1.434
	90°		106.4	1.427
積層リング			107.2	1.431

(2) 積層リングとワイヤーメンブレンの試験結果の比較

積層リングとワイヤーメンブレン(載荷方向 0°)の試験結果を図-4に示す。 $DA=15\%$ 時の繰返し回数 $N_{15\%}$ は、積層リングが15回、ワイヤーメンブレンが16回で大きな違いは見られなかった。応力経路(図-5)については、ワイヤーメンブレンでの試験の後半で応力経路が若干いびつになったものの両者の傾向は概ね同じであった。

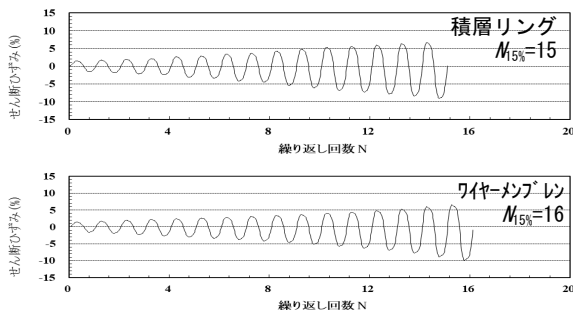


図-4 せん断ひずみ(積層リングとワイヤーメンブレン)

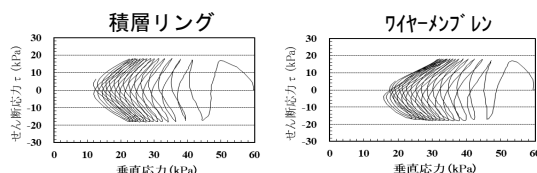


図-5 応力経路(積層リングとワイヤーメンブレン)

(3) 載荷方向が異なるワイヤーメンブレンの試験結果

せん断抵抗の差が小さい載荷方向 0° と、差が大きい載荷方向 90° で繰返し単純せん断試験を行った。載荷方向 0° はひずみが均等に進行していったが、載荷方向 90° では、片側にひずみが進行する結果となった(図-6)。また、載荷方向 0° より、載荷方向 90° の方が、応力経路が一側に偏りいびつになっている(図-7)。

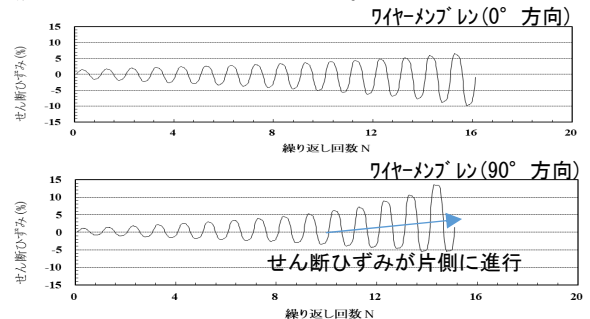


図-6 せん断ひずみ(ワイヤーメンブレン、異なる載荷方向)

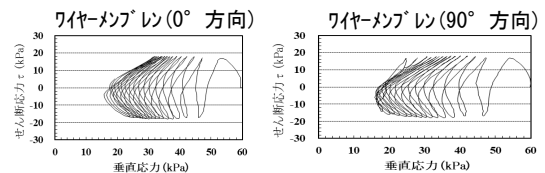


図-7 応力経路(ワイヤーメンブレン、異なる載荷方向)

4. まとめ

積層リングとワイヤーメンブレンを用いて、粘土の繰返し単純せん断試験を行い、供試体側面の拘束方法が繰返しせん断挙動に与える影響について実験的に検証した。実験の結果、①拘束方法を変えても $DA=15\%$ における繰返し回数にほとんど差が無いこと、②ワイヤーメンブレンでは、押しと引きで見かけのせん断抵抗が異なる載荷方向で試験をした場合、せん断ひずみが片側に進行していくことが分かった。②の原因としては、ワイヤーメンブレンにワイヤーを巻く方向や間隔の違いなどにより反力特性に微小な違いがあり、繰返し応力載荷に伴い供試体の剛性が失われていくにつれて、このワイヤーメンブレンのくせと見かけのせん断抵抗の影響が相対的に大きくなったためと考える。今回の粘土を用いた実験からは、繰返し強度を求める場合に拘束方法の違いは大きく影響しなかったが、繰返し載荷中の供試体の剛性低下を詳細に計測する場合、ワイヤーメンブレンの使用には注意する必要がある。

《引用・参考文献》

- 1) M. I. Amer, M. S. Aggour, W. D. Kovacs: SIZE EFFECT IN SIMPLE SHEAR TESTING, Civil Engineering Department, University of Maryland, College Park, MD, 1984.
- 2) 工藤雄次 細田光一 亀谷裕志: 洋上風力地盤調査における繰返し単純せん断試験, 海洋調査(海洋調査協会協会報), 139号41-44, 2020.

大深度調査における SPT アナライザーを用いた標準貫入試験の評価方法

中央開発株式会社 ○ 田尾 啓剛

INFLUX OFFSHORE WIND POWER HD 株式会社 坂本 真也

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの活用が世界的に推進されており、日本においても再生可能エネルギーを活用した発電事業が急速に進められている。本業務は、その再生可能エネルギー発電事業の1つである洋上風力発電施設建設に伴い、A 県 B 市の沖合にて傾動自在試錐工法¹⁾により海上地質調査を実施したものである。調査位置は沖合で水深-50m 程度の大水深であった為、標準貫入試験におけるエネルギー伝達効率の減衰が懸念された。そのことから標準貫入試験のエネルギー伝達効率を把握することを目的として、SPT アナライザーを用いた標準貫入試験を実施した。本報告では、その試験方法及び結果等について報告する。

2. 実施方法

(1) 測定方法

標準貫入試験におけるエネルギー伝達効率を計測する為に図-1に示す SPT アナライザーを用いた。SPT アナライザーを使用した標準貫入試験におけるエネルギー伝達効率の計測方法は、図-1に示される測定用のロッドをアンビル直下につなぎ込み、通常の標準貫入試験を実施するのみとなる。測定用ロッドには加速度計及びひずみゲージが2個ずつ装着されており、ハンマーによる打撃の瞬間における両センサーの値を専用 PC でロギングする。

(図-2)



図-1 SPT アナライザー装置

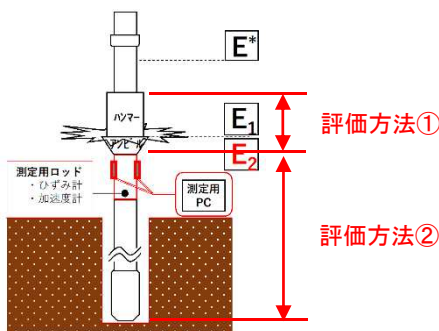


図-2 試験概念図

(2) 評価方法

エネルギー伝達率は、下記①～②の二つに区分して評価し、この2つを合計して全体の伝達効率となる。

①ハンマー～アンビル間のエネルギー伝達率

この区間のエネルギー伝達率は、SPT アナライザーにより自動計算される。例えばある深度の標準貫入試験を行い、N 値が 18 だった場合、すべての打撃に対する(例では 18 個)データが取得されることとなり、1 打撃毎の詳細な解析が可能となる。解析時には、1 打撃毎に計算されたエネルギー伝達効率の平均値をもって、その標準貫入試験のエネルギー伝達効率とするのが一般的である。

表-1 測定結果一覧表(N=18)

Date	Time	LP	EL	BN	CSX	DMX	EFV	ETR	BPM	VMX	FMX	DFN
		m	m		Compression	MaxDisp	TransEnergy	Efficiency	bpm	Velocity	Force	Set
					MPa	mm	J	%		m/s	kN	mm
2021/6/29	17:18:08	53.5	-53.5	1	177.9	46	408	86.3	50.5	3.52	103	46
2021/6/29	17:18:13	53.5	-53.5	2	156	36	395	83.5	11.6	3.35	91	36
2021/6/29	17:18:17	53.5	-53.5	3	162.5	38	409	86.5	15	3.43	94	38
2021/6/29	17:18:21	53.5	-53.5	4	180.8	38	395	83.5	14.1	3.45	105	37
2021/6/29	17:18:25	53.5	-53.5	5	165.5	42	416	88.0	16.1	3.45	96	41
2021/6/29	17:18:29	53.5	-53.5	6	187.3	36	414	87.5	14.4	3.23	109	36
2021/6/29	17:18:33	53.5	-53.5	7	181.8	25	404	85.4	15.8	3.27	106	22
2021/6/29	17:18:36	53.5	-53.5	8	166.1	29	418	88.4	16	3.27	96	28
2021/6/29	17:18:41	53.5	-53.5	9	153.6	29	412	87.1	14.6	3.24	89	29
2021/6/29	17:18:54	53.5	-53.5	10	169.8	29	417	88.2	4.6	3.26	99	29
2021/6/29	17:18:58	53.5	-53.5	11	166.1	24	408	86.3	13.4	3.37	96	22
2021/6/29	17:19:03	53.5	-53.5	12	166.2	26	418	88.4	13.4	3.38	97	24
2021/6/29	17:19:08	53.5	-53.5	13	164.5	26	407	86.1	12	3.35	95	23
2021/6/29	17:19:12	53.5	-53.5	14	166.4	30	413	87.3	13.3	3.42	97	29
2021/6/29	17:19:16	53.5	-53.5	15	160.3	32	410	86.7	13.9	3.32	93	32
2021/6/29	17:19:21	53.5	-53.5	16	164	37	419	88.6	14.7	3.26	95	36
2021/6/29	17:19:24	53.5	-53.5	17	163.2	32	412	87.1	15.3	3.4	95	31
2021/6/29	17:19:29	53.5	-53.5	18	160.5	34	416	88.0	14	3.32	93	34
							平均=	86.8				

②アンビル～SPT サンプラー先端間のエネルギー伝達率

この区間のエネルギー伝達率は、SPT アナライザーにより取得された波形データを解析することにより求めることができる。この波形データについても、すべての打撃に対して取得されるため、1打撃毎の詳細な解析が可能である。

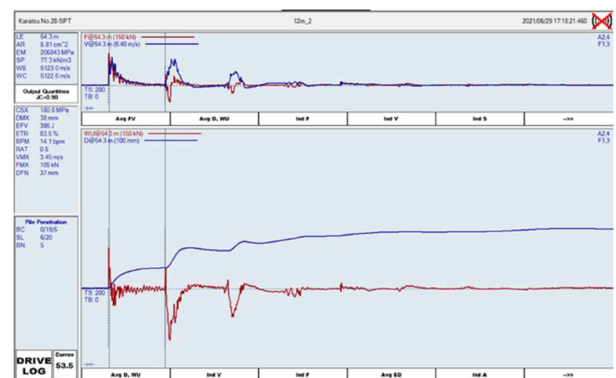


図-3 測定結果(波形データ)

3. 調査結果

(1) ハンマー～アンビル間のエネルギー伝達効率

同区間のエネルギー伝達効率は、1 打撃毎の ETR(エネルギー伝達効率)の平均値をもって、その深度における標準貫入試験のエネルギー伝達効率とした。今回 A 地点で実施した 12m(N=29)の結果を表-2 に示す。表に示される通り、この区間の ETR は 89.9～95.1%を示し、極端にエネルギー伝達効率の低い結果は確認されなかった。また、A 地点のすべての深度において 85%を超えるエネルギー伝達効率が確認された。これは、海外において設計に用いる N 値は N₆₀(エネルギー伝達効率 60%の時の N 値)が主流であることから極めて良好な値といえる。

表-2 A 地点 12m の結果一覧

Date	Time	LP	EL	BN	CSX	DMX	EFV	ETR
		m	m		Compression MPa	MaxDisp mm	TransEnergy J	Efficiency %
2021/5/19	13:50:15	18.59	-18.6	1	177	32	444	93.9
2021/5/19	13:50:20	18.59	-18.6	2	192.2	29	441	93.2
2021/5/19	13:50:24	18.59	-18.6	3	196.5	29	449	94.9
2021/5/19	13:50:28	18.59	-18.6	4	179.4	27	439	92.8
2021/5/19	13:50:32	18.59	-18.6	5	188.6	31	441	93.2
2021/5/19	13:50:36	18.59	-18.6	6	185.3	24	440	93.0
2021/5/19	13:50:40	18.59	-18.6	7	195.6	22	436	92.2
2021/5/19	13:50:45	18.59	-18.6	8	178.4	26	445	94.1
2021/5/19	13:50:49	18.59	-18.6	9	168	21	437	92.4
2021/5/19	13:50:53	18.59	-18.6	10	173.9	22	436	92.2
2021/5/19	13:50:58	18.59	-18.6	11	181.1	26	444	93.9
2021/5/19	13:51:02	18.59	-18.6	12	182.4	22	433	91.6
2021/5/19	13:51:06	18.59	-18.6	13	171.9	20	425	89.9
2021/5/19	13:51:10	18.59	-18.6	14	179.9	18	425	89.9
2021/5/19	13:51:14	18.59	-18.6	15	171.4	20	432	91.3
2021/5/19	13:51:18	18.59	-18.6	16	179.6	19	441	93.2
2021/5/19	13:51:22	18.59	-18.6	17	178.7	17	428	90.5
2021/5/19	13:51:26	18.59	-18.6	18	166.6	18	436	92.2
2021/5/19	13:51:30	18.59	-18.6	19	177.2	21	450	95.1
2021/5/19	13:51:35	18.59	-18.6	20	178.2	18	441	93.2
2021/5/19	13:51:39	18.59	-18.6	21	162.4	17	425	89.9
2021/5/19	13:51:43	18.59	-18.6	22	174.4	17	434	91.8
2021/5/19	13:51:47	18.59	-18.6	23	173.6	17	432	91.3
2021/5/19	13:51:51	18.59	-18.6	24	163.2	17	432	91.3
2021/5/19	13:51:55	18.59	-18.6	25	174.1	17	431	91.1
2021/5/19	13:51:59	18.59	-18.6	26	184.2	17	431	91.1
2021/5/19	13:52:04	18.59	-18.6	27	172	16	436	92.2
2021/5/19	13:52:08	18.59	-18.6	28	177.5	16	433	91.6
2021/5/19	13:52:12	18.59	-18.6	29	175.2	31	433	91.6
エネルギー伝達効率の平均値→								92.2

(2) アンビル～SPT サンプラー先端間のエネルギー伝達効率

同区間のエネルギー伝達効率は、取得された波形データの解析によって行われるが、今回取得された波形データは全て非常にきれいな(エネルギーロスが殆どない)結果が示された。図-4に A 地点12m の波形データを、図-5にエネルギーロスが確認された場合の波形データ(例)を示す。

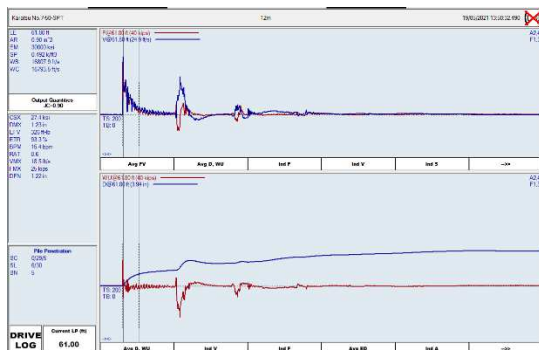


図-4 A 地点12m の波形データ

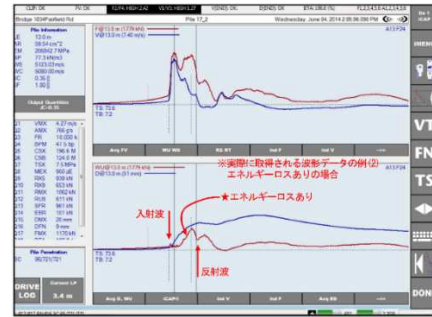


図-5 エネルギーロスのある波形データ(例)

4. まとめ

今回の試験結果については、水深 50m 程度かつロッド長が 100m を超える試験条件を鑑みると極めて良好なものと想定される。このような結果が得られた要因は以下のように考えられる。

①ボーリング孔の鉛直性が極めて良好

今回は傾動自在試錐工法による施工の為、海底まで鉛直にガイドパイプを仮設している。そのガイドパイプを通してロッドを下し掘削を実施する為、鋼製櫓やスパッド台船と比較して鉛直性が保たれ、エネルギーロスが低減されたと想定される。

②ボーリングオペレーターの技術力が高い

ボーリングオペレーターの高い技術かつ丁寧な作業により、孔曲がりの少ないボーリング孔であったことが影響していると想定される。

③半自動落下装置を用いて適切に標準貫入試験を実施

一昔前までは、手動落下法(コーンプリー法、トンビ法)が主流であったが、モンケンが自然落下できていないという問題点があった。しかし、半自動落下装置を用いることにより、極めて自然落下に近い状況で試験が行えたことにより、良好な試験結果が得られたと想定される。

5. おわりに

ロッドの長さによる N 値の補正に関して、以下のような式が提唱されている。²⁾

$$N = N' \left(1 - \frac{x}{200} \right) \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、N' ; 実測 N 値、x ; ロッドの長さ(m)

この式を用いて、修正 N 値を算出すると、ロッド長100m における修正 N 値は、実測 N 値の約50%と評価される。

これに対し、傾動自在試錐工法による標準貫入試験のエネルギー伝達効率は約80%で、既存の提案式に対し、エネルギーロスの少ないデータが得られ、本工法における標準貫入試験の実用性が示されたと考える。

今後も更にデータを蓄積し、傾動自在試錐工法やその他大深度工法における標準貫入試験結果の評価方法について検討していきたい。

《引用・参考文献》

- 1) 運輸省告示第366号港湾に係る民間技術評価第94302
- 2) 地盤調査・土質試験結果の解釈と適用例 p343

(社)地盤工学会

盛土材料のセメント改良工法における攪拌混合度の評価

株式会社ドーコン ○舟根 熙、高橋 秀彰、畠山 潔芽
北海道大学大学院 西村 聡、林 昌一

1. はじめに

近年、堤防盛土材料の改良工法として実績を増やしつつあるプラント等を使用した盛土材料のセメント改良¹⁾では、一定期間の置土養生を行ったのちに破碎し盛土材料として使用する固化破碎土の手法が用いられている。

著者らは、攪拌工法による土とセメントの混ざり具合が材料品質に与える影響を把握するため、攪拌混合度の定量化や混合度と品質管理指標（コーン指数、締固め度）の関連性について検討してきた²⁾。本報告ではセメント攪拌土の画像解析により混合度を定量化する際の評価手法に関する課題について検討したので結果を報告する。

2. 試験条件

改良対象土は $F_c=55.1\sim61.1\%$ の砂質粘土（土質 A）及び $F_c=66.8\sim85.3\%$ の粘土（土質 B）であり、使用セメントは土質 A に対しては高炉 B 種、土質 B に対してはセメント系固化材 ETR3 を用いた。セメント攪拌は、プラント、移動式攪拌工法（移動式）、ロータリースタビライザー（スタビ）の 3 工法にて実施し、各工法 $60\text{kg}/\text{m}^3\sim140\text{kg}/\text{m}^3$ の $20\text{kg}/\text{m}^3$ 刻み 5 パターンのセメントを添加した。

3. 試験結果

(1) 画像解析による混合度評価方法

画像解析による混合度評価は、改良土においてセメントが存在する部分をセメント混合された部分と仮定し、改良土塊の切断面においてフェノールフタレイン反応により着色した部分の面積割合（着色率）を画像解析から求め、着色率=混合度と定義することで評価を行った。画像を HSV 変換した後、Hue（色相：0-255 フルスケール） >180 、Saturation（彩度） >80 、Value（明度） >80 のピクセルを着色部として抽出し、 $\text{Value}\leq 80$ の箇所をマクロ空隙、残りは非着色土塊とみなすことで三値化して表現した。閾値は、目視による印象により校正したものである。なお、着色率はマクロ空隙を除いた面積に対する着色部の面積割合である。

評価を行う供試体サイズはセメントがいきわたっていない未攪拌土塊の径より十分に大きいことが望ましい。また、未攪拌土塊は楕円に近い形状であることが多く、評価を行う切断面と土塊の位置関係が着色率に影響を及ぼすことが考えられた。そこで、手法 1 では内径 $10\text{cm}\times$ 高さ 12.7cm のモールドに改良土を押詰めて作製した供試体における高さ 1cm ごとの 12 断面に対して画像解析を実施することで未攪拌土塊の影響を 3 次元的に評価した。手法 2 では排出された土塊に対し十分な大きさとなる縦 $30\text{cm}\times$ 横 42cm のトレイを使用し未攪拌土塊の最大径の影響を評価した（写真-1-写真-2）。

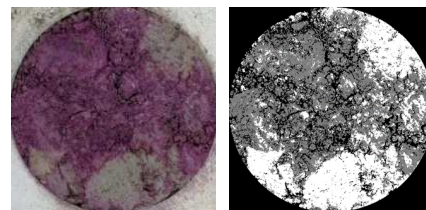


写真-1 着色率測定例(白色部＝非着色部、灰色部＝着色部、黒色部＝マクロ空隙部および対象領域外)内径 10cm モールド・プラント・土質 B・セメント配合量 $100\text{kg}/\text{m}^3$ (左: 原画像, 右: 三値化画像、本断面内の混合度 57%)

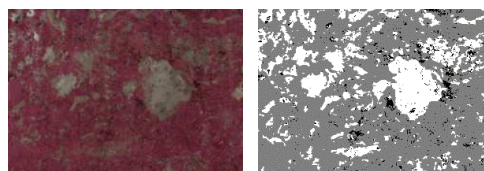


写真-2 色率測定例(白色部＝非着色部、灰色部＝着色部、黒色部＝マクロ空隙部および対象領域外)縦 30cm x 横 42cm トレー・プラント・土質 B・セメント配合量 $100\text{kg}/\text{m}^3$ (左: 原画像, 右: 三値化画像、本断面内の混合度 76%)

(2) 手法 1 モールドの混合度評価結果

モールドの画像解析において 12 断面の平均値を評価した結果、土質 A の着色率（混合度）はプラント、移動式ともに 70～90% 程度、スタビは低配合で 50% 以下、 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 以上の配合量で 60～80% 程度の混合度となり、前述の 2 工法を大きく下回る。土質 B についてはプラント、移動式においても低配合で着色率が低い傾向が顕著であり、スタビでは低配合にて着色がほとんど見られなかった（図-1）。

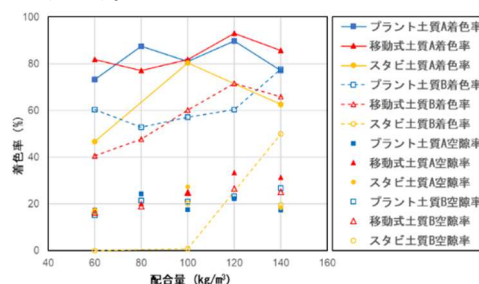


図-1 セメント配合量と着色率(混合度)、空隙率の関係

土質 B は土質 A と比較して細粒分が多く粘性が強いことにより攪拌されにくく、低配合のもの程土塊中にセメントが行きわたらない傾向が顕著であった。これは各工法から排出された攪拌土の目視状況と一致する（写真-3）。また、スタビは母材上にセメントを載せて攪拌するため、攪拌しにくい土質 B では上側にセメントの偏りを目視で確認できた。混合度評価試料はセメントの混ぜ残り部分を避けて下側を採取したことにより、比較的セメントが

添加されていない部分が多かったと考えられる。



写真-3 施工機械から排出された改良土
(左:プラント土質 A 右:プラント土質 B)

(2) 手法2 トレーの混合度評価結果

トレーの画像解析結果より、土質 A の混合度はプラント、移動式においてセメント配合量80kg/m³以上で85%～95%、スタビでは30%～50%、140kg/m³で90%程度となった。土質 B においてはプラント、移動式で60%～90%、スタビでは1%～65%程度である。両解析結果の比較から、各セメント配合量でモールドの着色率はトレーの着色率に比べ15%～30%低い傾向にあった(図-2-図-3)。

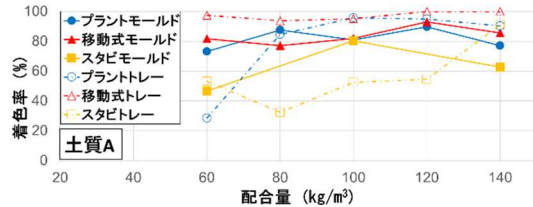


図-2 モールド・トレーの画像解析比較(土質 A)

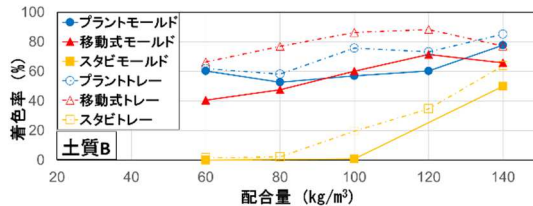


図-3 モールド・トレーの画像解析比較(土質 B)

(3) 適切な混合度評価手法の検討

2つの手法の差異は、未攪拌土塊の影響が主要因と推定される。手法1のように土塊サイズに対し供試体サイズが十分ではない場合、供試体サイズ以上の土塊の除去による着色率の過大評価、供試体サイズに近い土塊を用いることによる着色率の過小評価が生じやすい。今回の評価では、供試体サイズの未攪拌土塊により極端に混合度の低い断面が生じ、全体の混合度を低下させる傾向を確認したことから、後者の影響が強かったと想定される(図-4)。

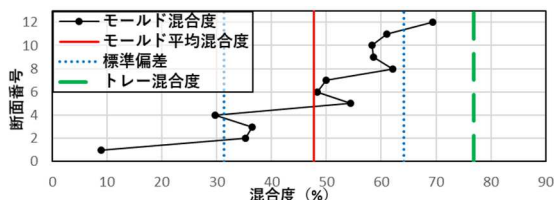


図-4 未攪拌土塊による混合度低下の例(モールド・移動式・土質 B・セメント配合量 80kg/m³)

手法2で確認された未攪拌土塊の最大径は土質 A で最大6cm程度、土質 B で最大15cm程度であった。土質 A の配合量80～120kg/m³では未攪拌土塊の最大径は4cm程度であり、土塊径の影響を受けにくかったのか2手法の

差異が小さいが、比較的混合度が低く(40～80%程度)、未攪拌土塊の最大径が10cm以上と大きい土質 B では2手法の差異が大きかった(図-5)。

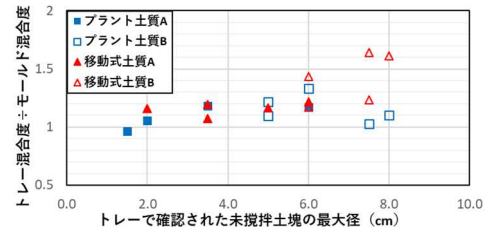


図-5 未攪拌土塊の最大径と2手法の混合度差の関係

一方、手法1の1cm毎の断面の着色率をみると未攪拌土塊の最大径が大きい供試体ほど着色率の最大値と最小値の差が大きくなる傾向がみられ、土塊の最大径が概ね供試体径の1/3～1/5以下になると着色率の最大値と最小値の差が概ね20%以下となる(図-6)。着色率のバラツキが大きい供試体では未攪拌土塊の最大径に対し供試体サイズが不足しており、最低でも土塊の最大径の3倍以上の供試体サイズが必要と考えられる。

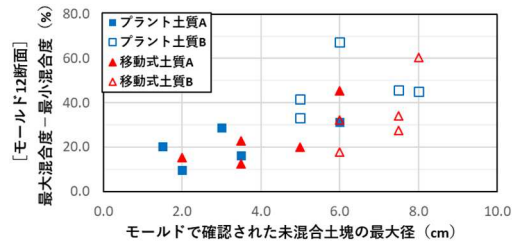


図-6 モールドの12断面画像解析における混合度のばらつきと最大径の関係

4. まとめ

セメント改良土の画像解析による混合度評価は、現地で目視により確認した改良土の状況を比較的良好に数値化できており、土質による攪拌の状況や機械による攪拌効率の差を表現しうるものと考えられる。また、評価手法について供試体サイズと未攪拌土塊の三次元的な影響を検討した結果、供試体サイズは未攪拌土塊の最大径に対し最低3～5倍の大きさを取ること、供試体サイズが小さい場合には数cm間隔のスライスを解析し三次元的な評価を行うことが望ましいと考えられる。今後は、供試体サイズやスライス手法の影響に関するデータを積み重ね、混合度評価手法を確立したいと考えている。

謝辞 今回の試験施工データは国土交通省北海道開発局岩見沢河川事務所により賜った。協力に深甚な謝意を表す。

《引用・参考文献》

- 1) 田中大地、仲条元、岡田幸七:北村遊水地における堤防盛土材の改良工法について—固化破碎土による施工報告と今後の展望—, 第64回(2020年度)北海道開発技術研究発表会, pp.309-314, 2021.
- 2) 舟根熙、高橋秀彰、西村聡、林昌一、畠山潔芽:盛土材料のセメント改良工法における品質評価に関する考察, 第62号地盤工学会北海道支部技術報告集, p336-345, 2022.1

深層混合処理におけるコア採取時期について

東邦地水株式会社 ○ 古市 良樹, 谷奥 幸雄

1. はじめに

セメントおよびセメント系固化材を用いた深層混合処理では、形成された改良体が設計書で示されている品質を確保しているかどうかを検査する必要がある。

検査手法としては、ロータリー式ボーリングマシンによるチェックボーリングと、一軸圧縮試験が一般的に実施されている。チェックボーリングでは「採取コアの目視による改良体の連続性の確認」、一軸圧縮試験では「採取コアを用いた強度確認」が行われる。なお、一軸圧縮試験は材齢 28 日の強度を測定して評価することが多い。

改良体の強度発現を阻害する要因はコンクリートと同様であり、養生時における振動・衝撃・温度等が挙げられる。このため、コアを採取する時期については改良体の強度発現を考慮して、試験材齢の直前で実施することが望ましいとされている。しかしながら、深層混合処理工の施工範囲・工程といった現場状況から、試験材齢の直前にチェックボーリングを実施することが困難な場合が多い。また、原則として材齢 28 日の強度を確認するため、万一所定の品質（強度）を満足しない結果が出た場合、施工面で致命的な手戻りが発生する懸念もある。

今回、深層混合処理の品質管理のうち、コア採取時期（材齢）と一軸圧縮試験結果から求められる強度発現の関係を評価し、適切なコア採取時期について提案した。

2. 品質検査場所の地形・地質

実施場所の大部分は、愛知県・岐阜県・三重県に広がる木曽三川を中心とした伊勢湾北部地域の濃尾平野および臨海部の、いずれも沖積低地にあたる。

ここで、当該地域の地層層序表を示す。（表-1）

同表より、検査対象地の地層構成は、最上位に第四紀完新世の沖積層、その下位に第四紀更新世の洪積層、さらに下位に第三紀鮮新世の東海層群が基盤層を形成する状況である。また、基盤層には養老山地を構成する美濃帯が分布する地域もある。

このうち、改良対象層の多くは第四紀完新世の沖積層である。沖積層は砂質土および粘性土を主体としており、

N値は砂質土で10程度以下、粘性土で5程度以下で、層厚は最深部で40～50m に達する。

3. 品質検査方法

深層混合処理の品質検査はチェックボーリングと一軸圧縮試験で行った。

(1) チェックボーリング

チェックボーリングは、改良範囲で以下のサンプラーを用いたオールコアボーリングを実施し、採取したコアを目視することにより、改良体の連続性および攪拌状態の確認を行った。ここで、コア採取（試料採取）に用いられるサンプラーの種類と適用地盤を示す。（表-2）

表-2 サンプラーの種類と適用地盤²⁾

サンプラーの種類		地盤の種類											
		粘性土			砂質土			砂礫			岩盤		
		軟質	中くらい	硬質	ゆるい	中くらい	密な	ゆるい	密な		軟岩	中硬岩	硬岩
		N値の目安											
		0~4	4~8	8以上	10以下	10~30	30以上	30以下	30以上				
固定ピストン式シンワールサンプラー	エクステンション式ロッド式	◎	○		○								
	水圧式	◎	◎	○	○								
ロータリー式二重管サンプラー			◎	○									
ロータリー式二重管サンプラー			◎	◎	○	◎	◎		○				
ロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプラー			○	○		○	○			◎	◎	◎	
ブロックサンプリング		◎	◎	◎	○	○	◎		○	○			
ロータリー式チューブサンプラー				○						◎	○		

注) ◎最適、○適

セメントおよびセメント系固化材を用いた深層混合処理の改良体をコア採取する場合、当該地では上記のうちロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプラーを用いた。このサンプラーによるコア採取の利点は以下の2点である。

- ①強度に対してある程度広い適用範囲がある。（改良体の設計基準強度にバラツキがあるため）
- ②コアがサンプラーのインナーチューブに内蔵された半透明のプラスチックフィルム製のスリーブに包まれて採取されるため、採取直後にコアの目視観察が可能で、さらに採取コアの乾燥をある程度防ぐことができる。

(2) 一軸圧縮試験（JIS A 1216）

改良体が設計書で示されている品質（強度）を確保しているかを確認するため、一軸圧縮試験を行った。

ここで、品質規格値の例を示す。（表-3）なお、試験に供する供試体は、改良長を概ね三分（上層・中層・下層）し、それぞれの代表箇所のコアを選定して供試体を作製することが多い。

表-1 地層層序表¹⁾

地質年代	地質系統	
第四紀	完新世	北勢沿岸低地地下層序
		濃尾平野地下層序
		富田浜層
	更新世	四日市港層
		南陽層
		伊勢神戸層
		濃尾層
		第一礫層
		熱田層
		古伊勢湾層
第三紀	鮮新世	第二礫層
		海部累層
		第三礫層
		米野累層
		弥富累層
		東海層群

表-3 品質規格値の例³⁾

試験項目	試験方法	規格値
一軸圧縮試験	JIS A 1216	①各供試体の試験結果は改良地盤設計基準強度の85%以上
		②1回の試験結果は改良地盤設計強度以上。なお、1回の試験とは3個の供試体の平均値で表したものの。

4. コア採取時期による強度発現への影響

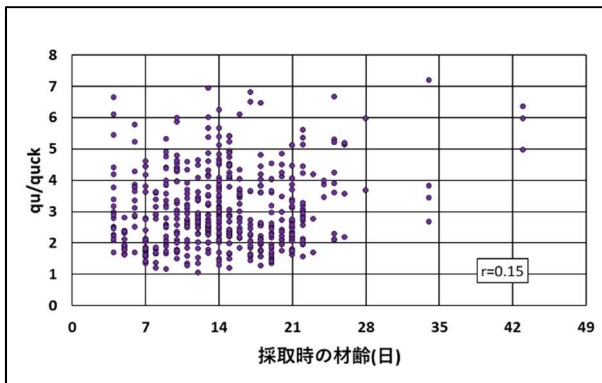
コア採取時期（材齢）による強度発現への影響について検討を行った。ただし、強度（設計基準強度）は現場毎に要求される品質がことなるため、単純に比較は出来ない。ここで、平均一軸圧縮強度（ q_u ）/設計基準強度（ q_{uck} ）と材齢を比較した。各図の作成にあたり縦軸を q_u/q_{uck} 横軸を採取時における改良体の材齢とした。なお、使用したデータ数、範囲は下記に示すとおりである。

- ・総データ数：497
- ・設計基準強度（ q_{uck} ）：200～1,320kN/m²
- ・採取時の改良体の材齢： $\sigma 4 \sim \sigma 43$

(1) 全データによる比較

全データの比較図を示す。（図-1）

相関係数は $r=0.15$ である。これによれば、データは図中の材齢 $\sigma 4 \sim \sigma 26$ 区間に一様に散らばっており、コア採取時期による強度発現への明確な影響は認められない。ただし、材齢が $\sigma 28$ （一般的な強度確認材齢）以降では $q_u/q_{uck} \geq 2$ と、材齢は長いほど強度発現が大きい。

図-1 採取時の材齢と q_u/q_{uck} (全データ)

(2) 改良土層毎の比較

次に、改良土層毎の検討を行った。ここで改良土層は構成土質から粗粒土（礫質土、砂質土）と細粒土（シルト、粘土）に区分した。

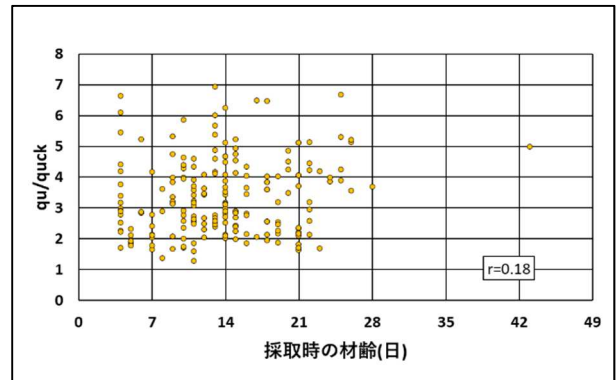
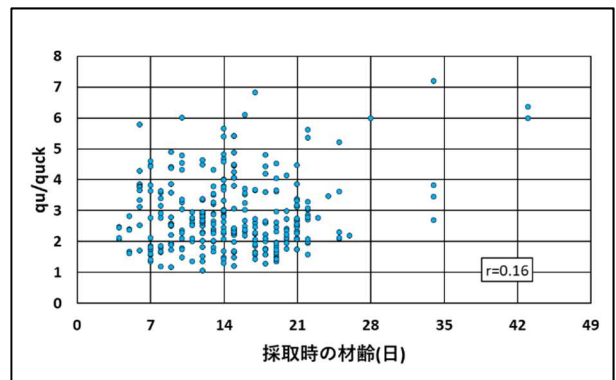
粗粒土、細粒土の比較図を示す。（図-2、図-3）

①粗粒土の改良土

相関係数は $r=0.18$ である。データは不規則に散らばっており、採取時の材齢による強度発現への明確な影響は認められない。

②細粒土の改良土

相関係数は $r=0.16$ である。データは不規則に散らばっており、粗粒土に比べ q_u/q_{uck} は若干小さい傾向があるものの、採取時の材齢による強度発現への明確な影響は認められない。

図-2 採取時の材齢と q_u/q_{uck} (粗粒土)図-3 採取時の材齢と q_u/q_{uck} (細粒土)

5. まとめ

今回の検討では、採取時期による強度発現への明確な影響が認められないため、材齢4日以降の改良体であれば、チェックボーリングによる改良体のコア採取が可能であると判断された。

しかしながら、改良体はセメントと水の水和反応により強度増加が起こるため、水和反応時に振動や衝撃が加わると強度増加に影響を与えることが懸念される。さらに、一般的には材齢7日以降に水和反応が落ち着くことを考慮すれば、やむを得ない事情が無い限り、材齢7日以降にチェックボーリングを実施することが望まれる。

今回の検討結果より、コア採取時期は一軸圧縮試験の直前でなくても可能であるとの結論を得た。これにより、コア採取時期を流動的に調整し、円滑な工程管理が可能になるものと考えられる。

今後更なるデータの蓄積により、固化材・添加量別の検討も行えば、さらに踏み込んだコア採取時期の提案も可能と考える。

《引用・参考文献》

- 1) 建設省計画局・愛知県・三重県編：伊勢湾北部臨海地域の地盤（都市地盤調査報告書第1巻），p. 1, 1962. 8
- 2) 社団法人セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル[第5版]，p. 233, 2021. 10
- 3) 社団法人セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル[第5版]，p. 234, 2021. 10