

「沖縄防衛局が行った、辺野古海域の 地質調査結果についての解説」



【本日のポイント】

- 土木技術者の使命
- 調査結果を受けての変更点（地盤改良他）
- 環境保全のための工夫（盛上がり土）
- 地盤改良も届かない深い軟弱地盤の存在
- 議論になったB-27地点のコーン貫入試験（CPT）
- Avf-c2層は非常に硬い粘土（でも沈下が大きい土）
- 護岸直下は起伏に富んだ地形であるため、
ケーソン式護岸の沈下量に差が出る可能性
- 沖縄県条例による外来生物侵入防止策

【土木技術者 (Civil Engineer) の使命】

海底の軟弱地盤での構造物建設



羽田空港の建設

へドロ地盤上に空港を建設

→『羽田マヨネーズ層』と呼ばれる

ほどの強度 (土捨場: 浚渫土・掘削残土など)



日本の発展を支えた土木技術

- ・プロジェクトX、テクノパワー (NHK)
など紹介



写真: 羽田マヨネーズ層での工事

【東側のケーソン式護岸の当初設計】

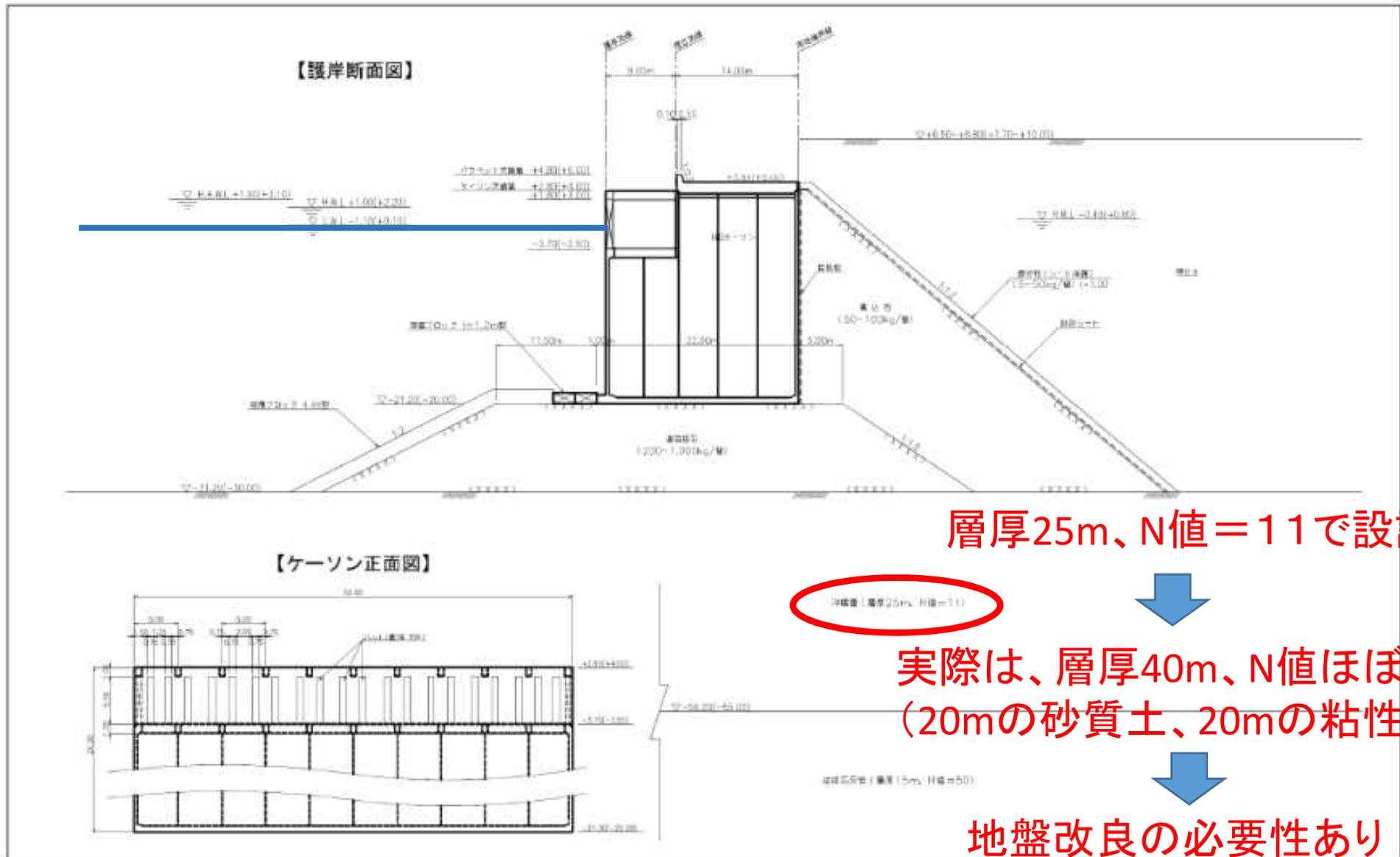
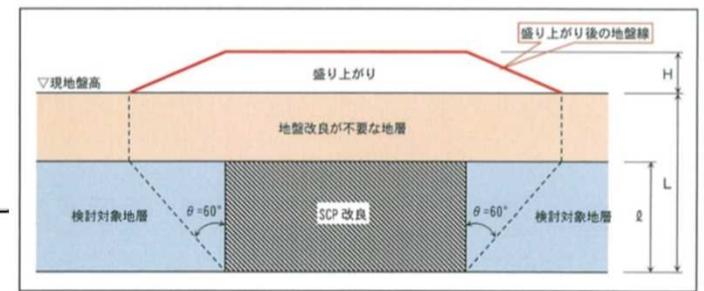
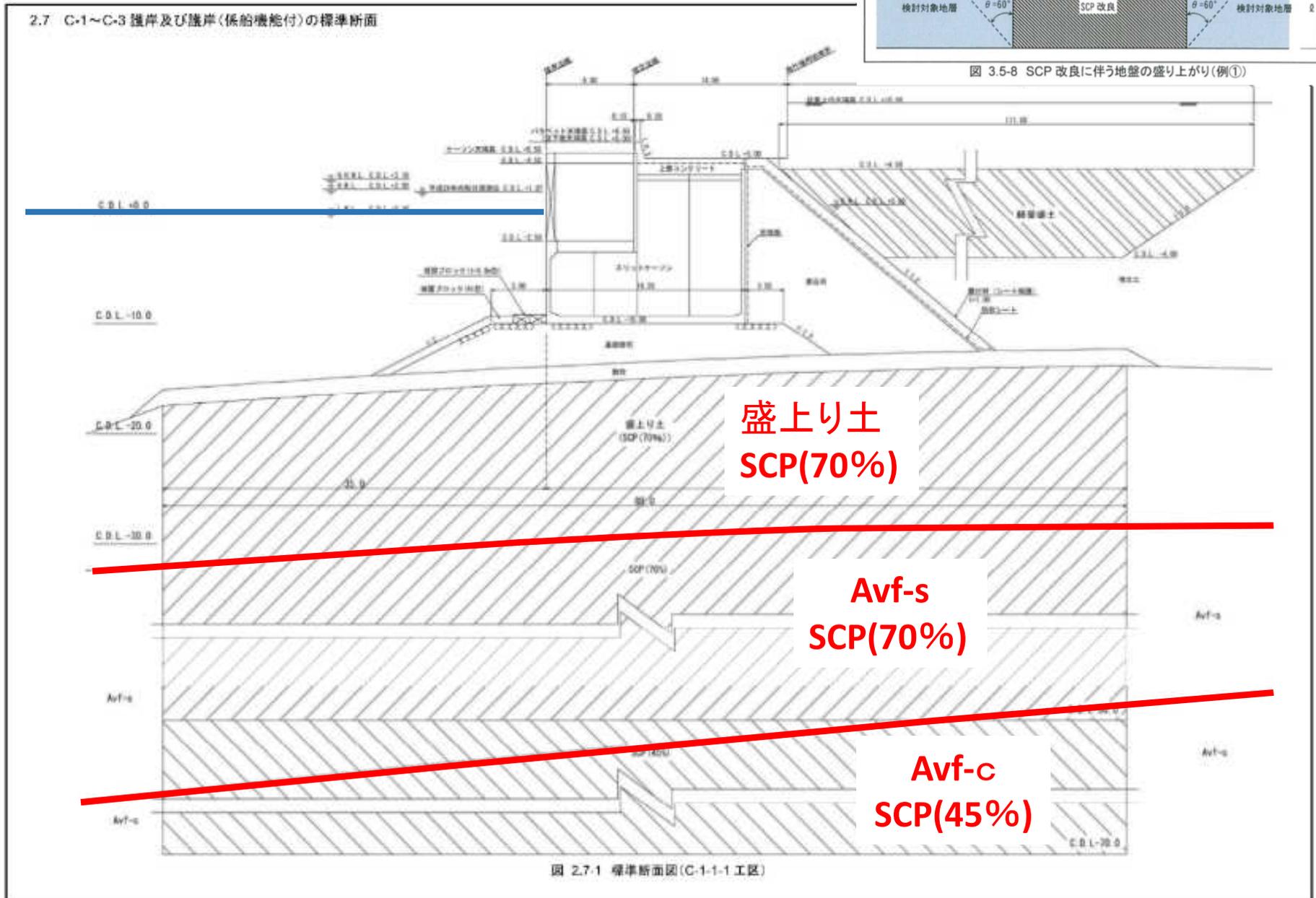


図-2.4.2.5(1) 代替施設本体のケーソン式護岸断面図及びケーソン正面図 (大水深区間)

【東側のケーソン式護岸の設計】

第2回 技術検討会 資料2

2.7 C-1~C-3 護岸及び護岸(係船機能付)の標準断面



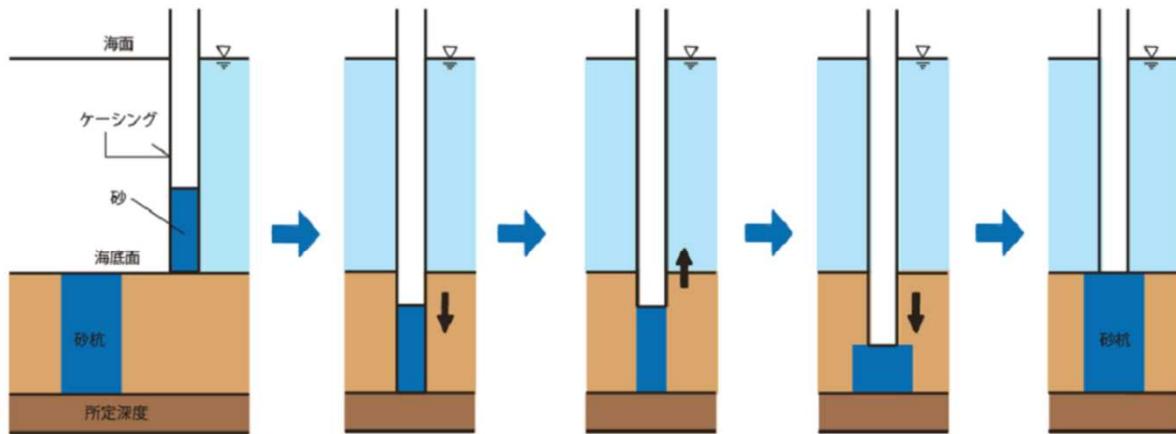
【軟弱地盤を改良するSCP(海上施工)】

S : Sand (砂)

C : Compaction (締固め)

P : Pile (杭)

【 SCP 施工 イメージ 】



① ケーシングを所定の位置に
セットし砂を投入します。

② ケーシングを
所定の深度まで
貫入させます。

③ ケーシングを引き
上げ、ケーシング内
の砂を排出します。

④ 必要砂量を排出後、
ケーシングを打戻して
SCPを造成します。

⑤ ③④を繰り返し、
所定の高さまでSCP
を造成します。



五洋建設 HPより

株式会社 不動テトラ HPより

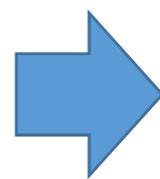
【地盤改良 (SCP, SD) 船】

表 5.2-2 サンドドレーン船(専門工事業者へのヒアリングより)

社名			A社			B社		C社	D社
項 目	船 名	船 種	ばいおにあ	第31不動産	F-11号	第60光号	第80光号	KSC-K75	天成
			第30ブドウ丸						
現 状	船体主要寸法	長 (m)	70.0	61.0	60.0	61.0	66.0	70.0	68.0
		幅 (m)	30.0	26.0	22.0	27.0	27.0	30.0	27.5
		深 (m)	4.8	4.5	3.5	4.0	4.5	4.5	4.3
		噴水 (m)	2.3	2.5	1.7	2.2	2.4	2.3	2.5
	パイプ径 (中間/先端)	(m)	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2
	パイプ間ピッチ	(m)	6.0	4.2	4.2	4.2	6.0	4.2~6.8	4.2
	砂杭径	-50m以浅 (m)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.7~2.0
		-50m以深 (m)	1.8	—	—	—	1.8	1.6	—
	パイプロハンマー	[kw]	240	240	180	300	300	300	300
	槽の高さ	(m)	73.0	64.0	55.0	60.0	75.0	75.0	65.0
最大打込深度 (水底下)	(m)	58.0	42.0	45.0	46.0	61.0	55.0	48.0	
既 後	船体主要寸法	長 (m)	70.0	61.0	—	61.0	66.0	70.0	68.0
		幅 (m)	30.0	26.0	—	27.0	27.0	30.0	27.5
		深 (m)	4.8	4.5	—	4.0	4.5	4.5	4.3
		噴水 (m)	2.3	2.5	—	2.4	2.6	2.3	2.5
	パイプ径 (中間/先端)	(m)	0.8/1.2	0.8/1.2	—	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2
	パイプ間ピッチ	(m)	6.0	4.2	—	6.3	6.3	4.2~6.8	4.2
	砂杭径	-50m以浅 (m)	2.0	2.0	—	2.0	2.0	2.0	2.0
		-50m以深 (m)	1.6	1.6	—	1.6	1.6	1.6	1.6
	パイプロハンマー	[kw]	300	240	—	300	300	300	300
	槽の高さ	(m)	89.0	75.0	—	85.0	85.0	90.0	73.0
最大打込深度 (水底下)	(m)	70.0	53.0	—	70.0	70.0	70.0	56.0	
標準積込期間	(日)	200	50	—	210	210	270	35	
標準積込費	(億円)	3.0	1.0	—	6.6	6.0	3.0	0.3	
SD対応時	パイプ径 (中間/先端)	(m)	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2	0.8/1.2
	パイプ間ピッチ	(m)	6.0	4.2	4.2	6.3	6.3	4.2~6.8	4.2
	SD径	(m)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	最大打込深度 (水底下)	(m)	SCP時と同深さ						

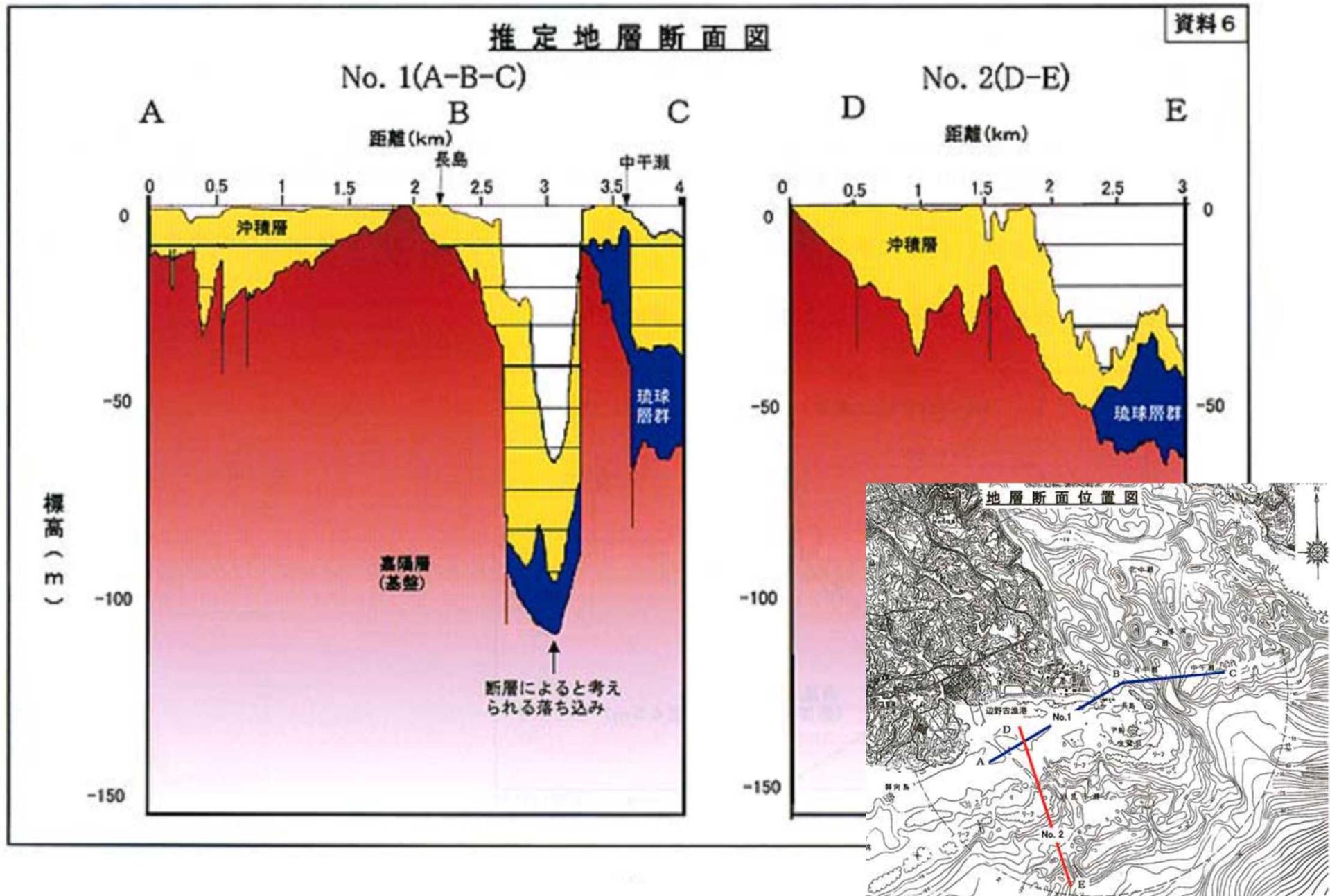
S : Sand (砂)

D : Drain (排水)



対象土: 粘土

【20年前の検討図面(東側護岸海域)】



地盤に係る検討・情報収集

(平成30年10月)

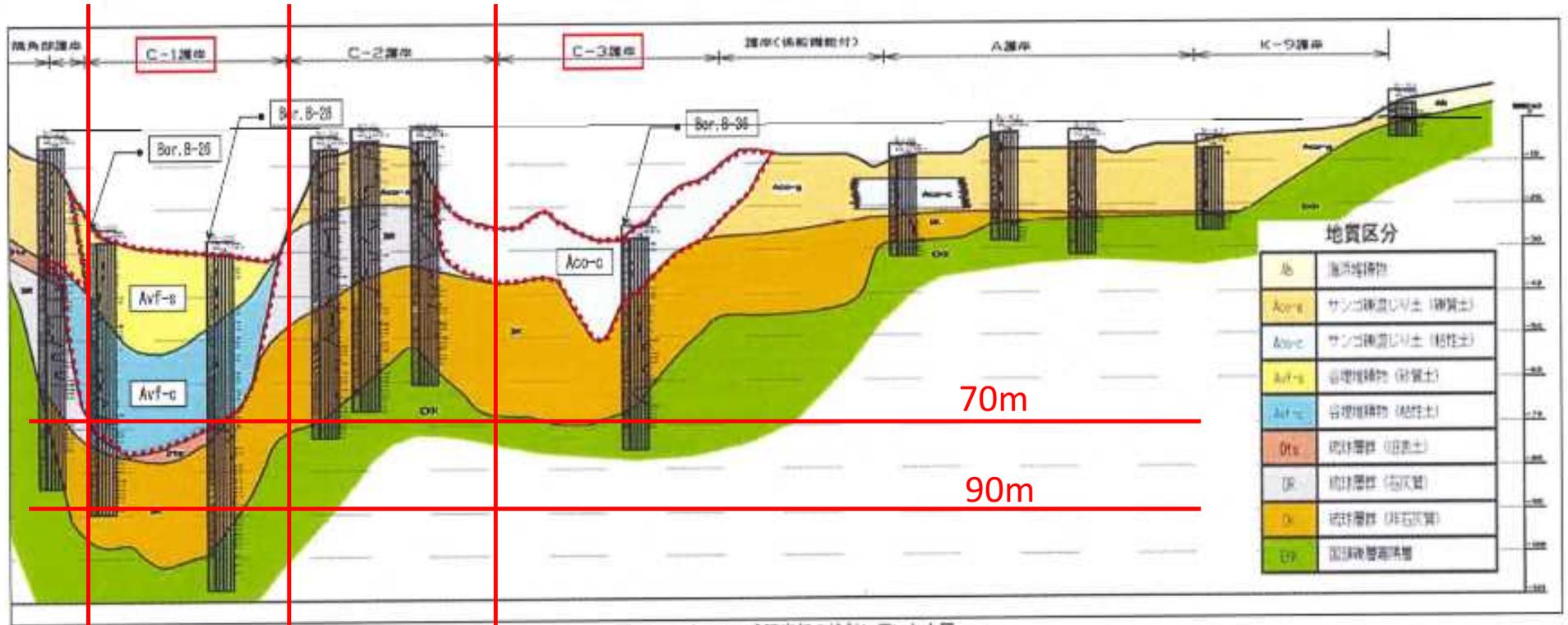
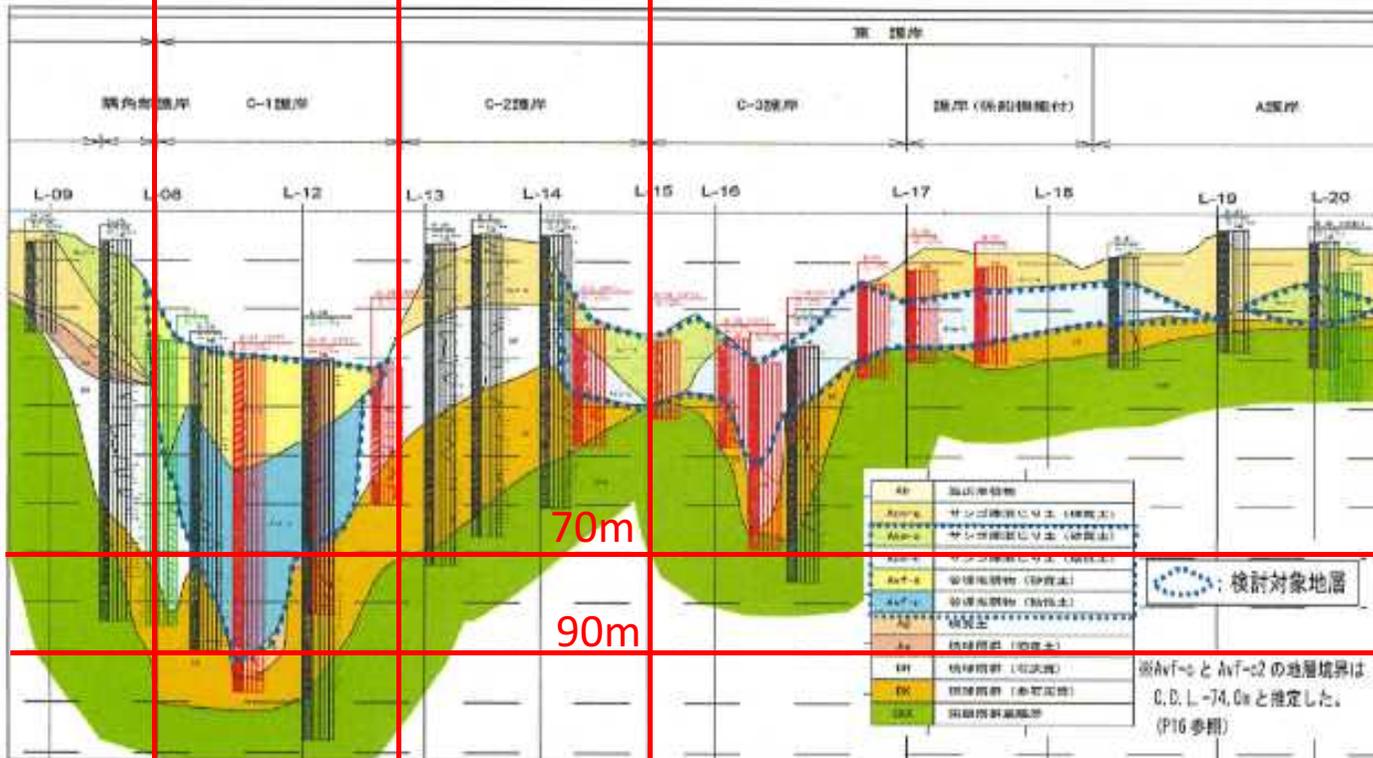


図 2.1-3 ケーソン式護岸部の検討に用いた土層

地盤に係る設計・施工の検討結果

(平成31年1月)



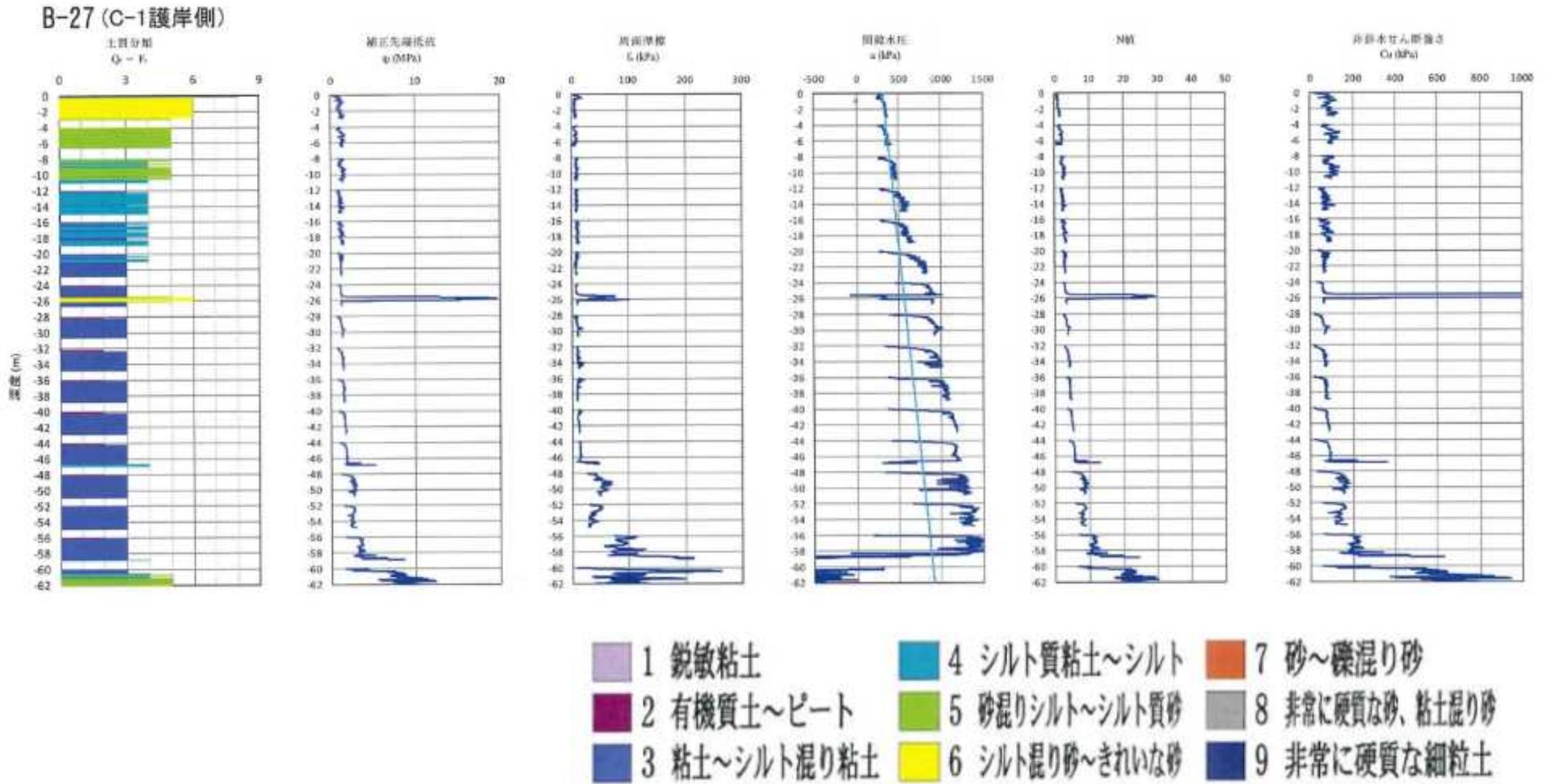
【その後の
推定断面図】

【一部加筆あり】

- ・ 赤線
- ・ 海面からの深度(m)

※Avf-cとAvf-c2の地層境界は
C.D. L-74, 0mと推定した。
(P16参照)

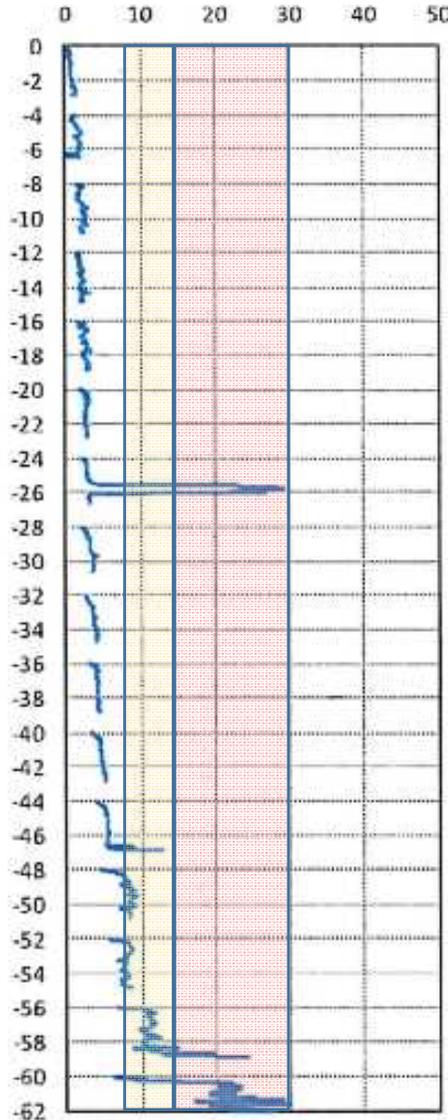
【B-27地点で実施された地盤調査(コーン貫入試験)の結果】



【コーン貫入試験から推測される値(B-27地点)】

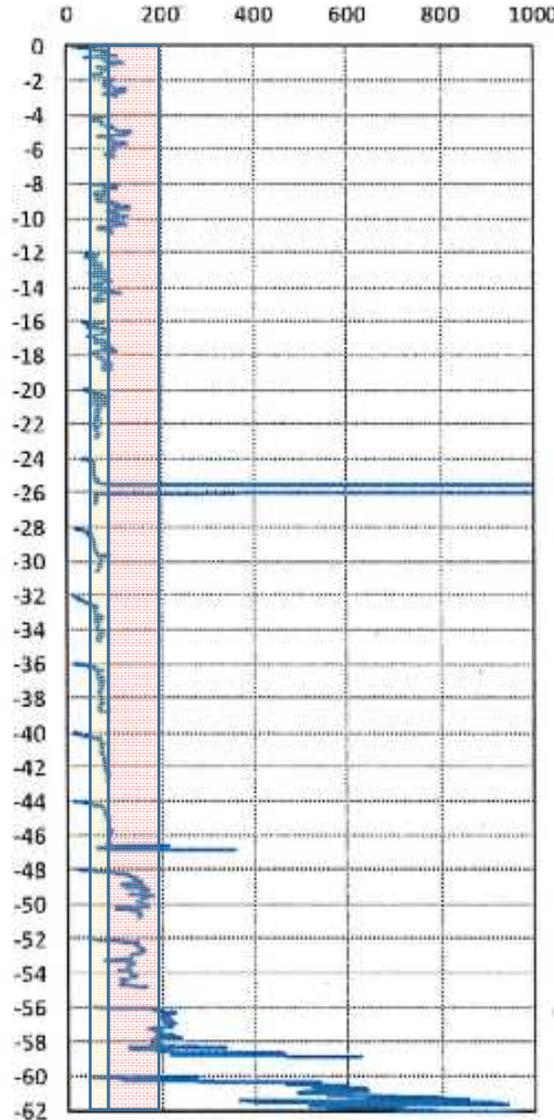
N値

N値



非排水せん断強さ C_u

非排水せん断強さ
 C_u (kPa)



非排水せん断強さ C_u



この値は、
一軸圧縮強度 q_u の $1/2$ に
なります

表 2.1-6 コンシステンシー、N 値及び一軸圧縮強さの関係

N 値	q_u (kN/m ²)	コンシステンシー
0~2	0.0~24.5	非常に柔らかい
2~4	24.5~49.1	柔らかい
4~8	49.1~98.1	中位の
8~15	98.1~196.2	硬い
<u>15~30</u>	<u>196.2~392.4</u>	<u>非常に硬い</u>
30~	392.4~	固結した

出典:「地盤調査の方法と解説」p308

海底面からの深さ (m)

【粘土層を2つに分類（Avf-c層、Avf-c2層）】

- Avf-c : 細粒分含有率が 85%程度で粘性土的な挙動を示す。ただし、圧縮指数は 0.3 程度で一般の粘性土に比べると小さい。また、一軸圧縮強度は 50～200(kN/m²)程度で、コンシステンシーは「中位～硬い」に区分される。
- Avf-c2 : Avf-c の下部に堆積している土層で、目視観察では有機物を含んだ黒灰の色調を示し、上部の Avf-c と異なる。力学的な特徴は Avf-c と同様に粘性土的な挙動を示すが、有機物混入の影響で Avf-c に比べて土粒子の密度 ρ_s が小さく、細粒分含有率は約 70%程度である。また強度は Avf-c に比べて大きく、一軸圧縮強度は 200～400(kN/m²)程度で、コンシステンシーは「非常に硬い」に区分される。以上の通り、同じ谷埋堆積物ではあるものの Avf-c 層とは特徴が異なるため区分した。

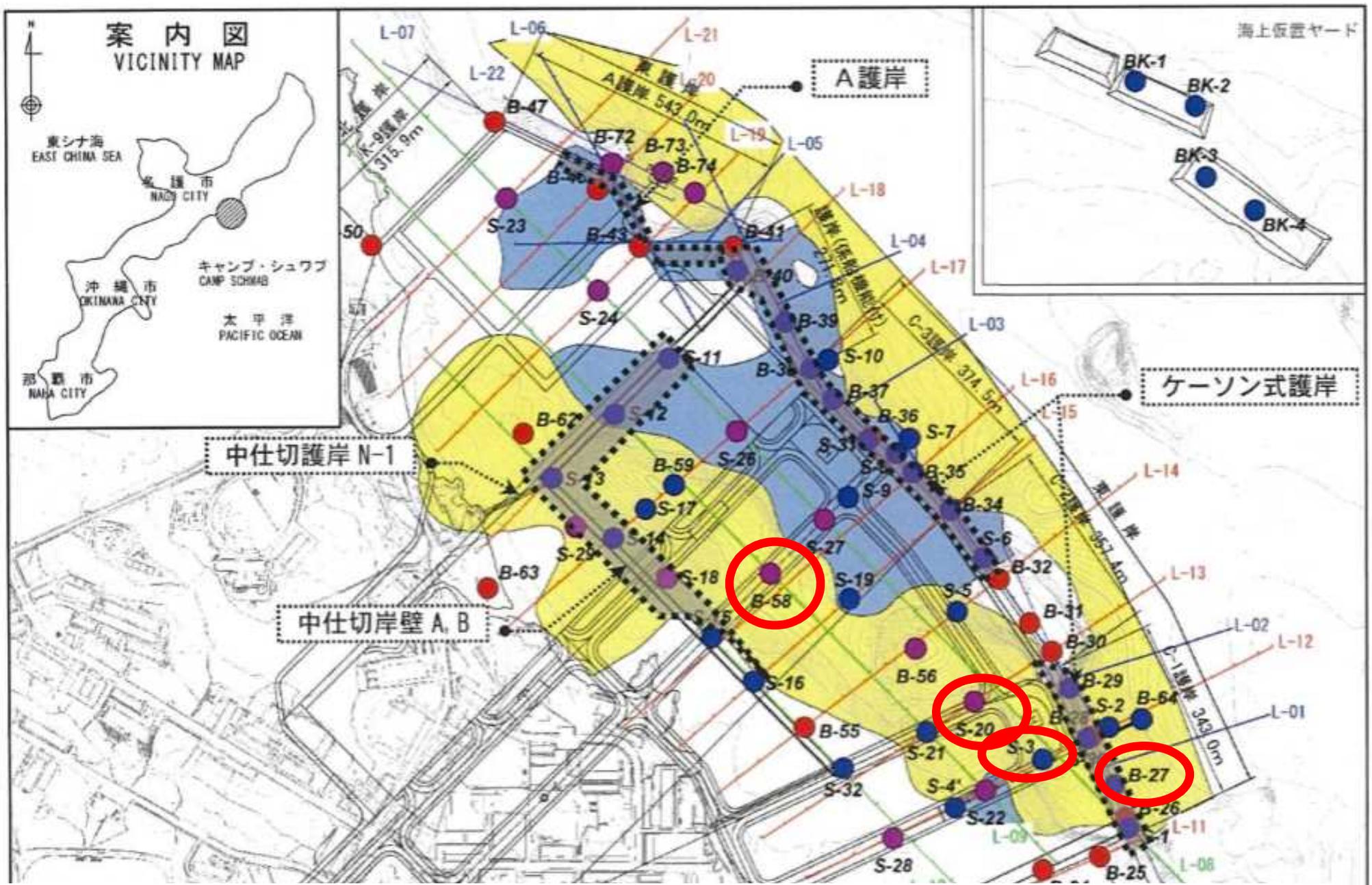
【非常に硬い粘土(Avf-c2層)のデータ】

表 2.1-11 非排水せん断強度の変動係数の算定結果(Avf-c2)

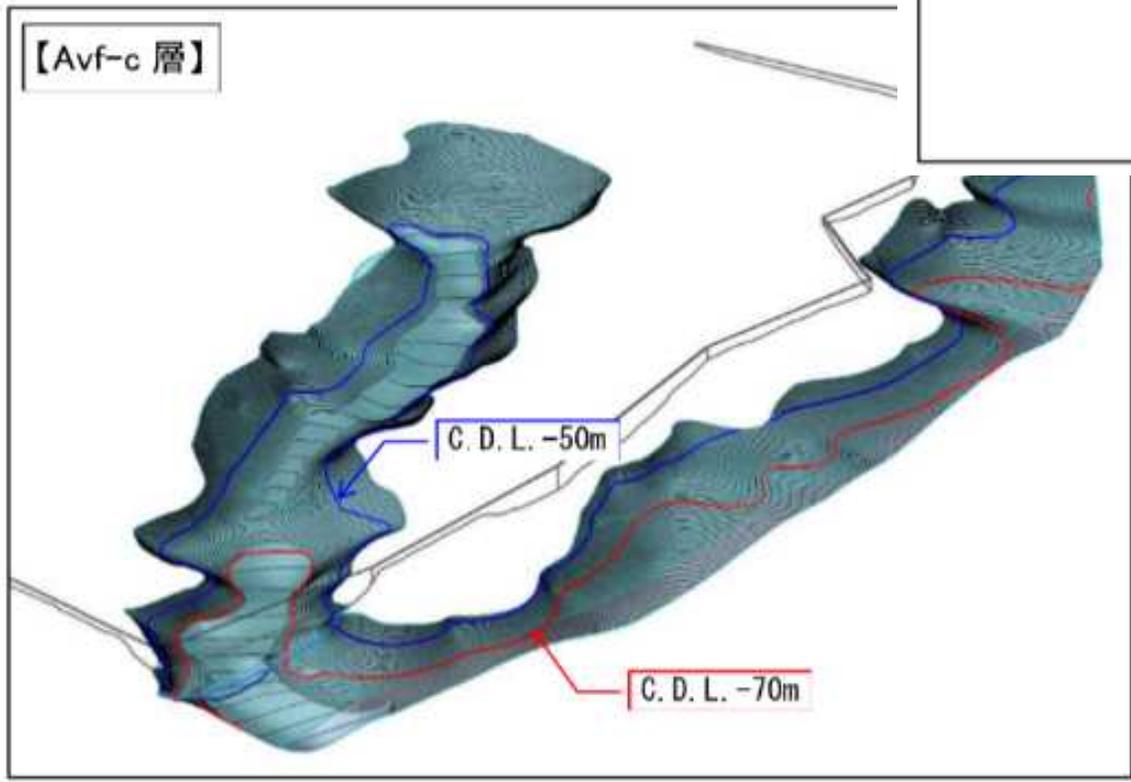
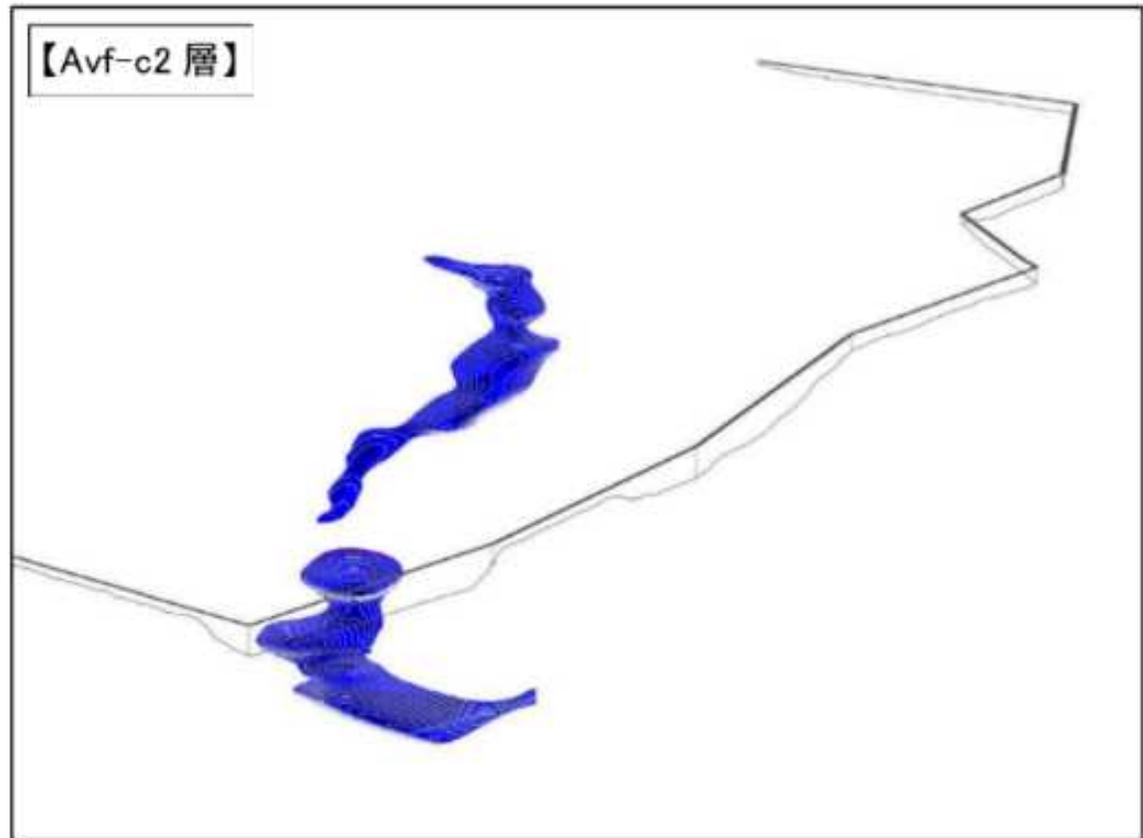
・粘着力(Avf-c2)	c0	117.78
	k	3.50
・変動係数	COV	0.18
・データ数	n	13.0
・補正係数	b1	0.90
	b2	1.00

Bor	試料名	種別	Z (m)	EL (m)	a	a*	a/a*	変動係数 COV
S-3	S3T-42	簡易CU(最大主応力差×0.75)	42.45	-75.15	271.0875	266.4	1.018	0.176
S-3	S3S-45	簡易CU(最大主応力差×0.75)	45.5	-78.2	343.965	277.1	1.241	
S-3	S3S-48	簡易CU(最大主応力差×0.75)	48.5	-81.2	216.765	287.6	0.754	
S-20	S20S-48	簡易CU(最大主応力差×0.75)	48.4	-72.43	292.11	287.2	1.017	
S-20	S20S-51	簡易CU(最大主応力差×0.75)	51.5	-75.53	244.515	298.1	0.820	
S-20	S20S-54	簡易CU(最大主応力差×0.75)	54.5	-78.53	353.0025	308.6	1.144	
S-20	S20S-57	簡易CU(最大主応力差×0.75)	57.425	-81.455	265.395	318.8	0.832	
S-20	S20S-60	簡易CU(最大主応力差×0.75)	60.2	-84.23	376.665	328.5	1.146	
B-58	B58S-43	簡易CU(最大主応力差×0.75)	43.5	-66.69	212.88	270.1	0.788	
S-3	S3T-42	一軸	42.45	-75.15	301.5	266.4	1.132	
S-3	S3T-42	一軸	42.45	-75.15	311.3	266.4	1.169	
S-3	S3T-42	一軸	42.45	-75.15	302.9	266.4	1.137	
B-58	B58T-39	簡易CU(最大主応力差×0.75)	39.45	-62.64	205.455	255.9	0.803	

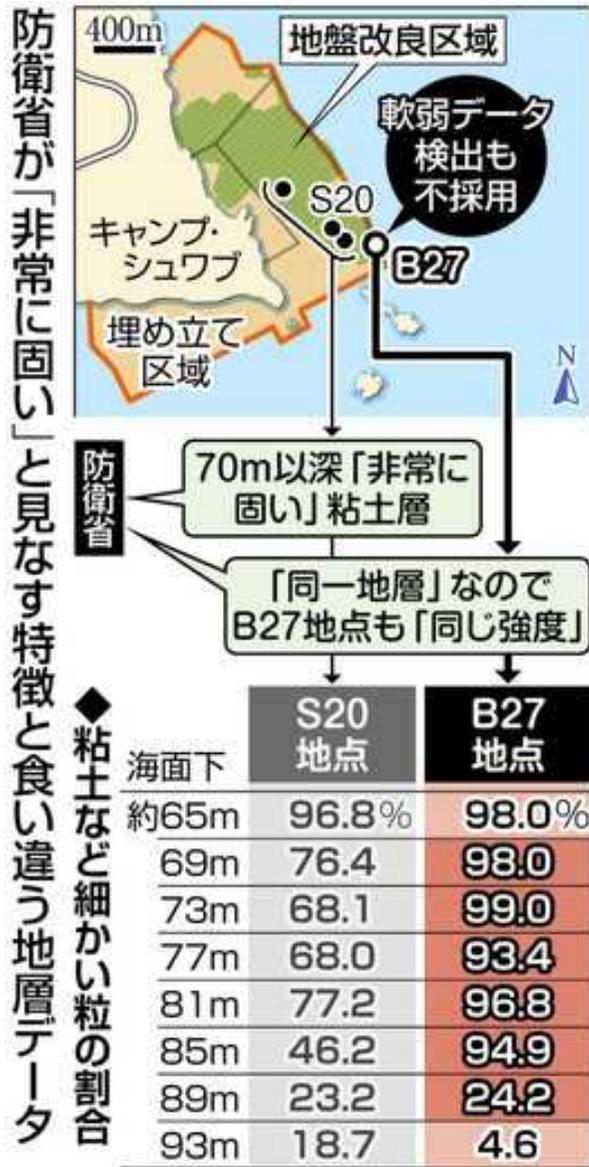
【各調査地点の位置関係(B-27地点の強度試験は無し)】



【地層構成(3D)】



【非常に硬い粘土(Avf-c2層)の分類条件は？】



細粒分(砂粒より小さい)含有量のデータ

	B27地点	S20地点	B58地点	S3地点
約65m	98.0%	96.8	75.7	97.1
69m	98.0	76.4	73.7	91.2
73m	99.0	68.1	63.5	82.8
77m	93.4	68.0	-	79.3
81m	96.8	77.2	-	38.1
85m	94.9	46.2	-	22.7
89m	24.2	23.2	-	-
93m	4.6	18.7	-	-

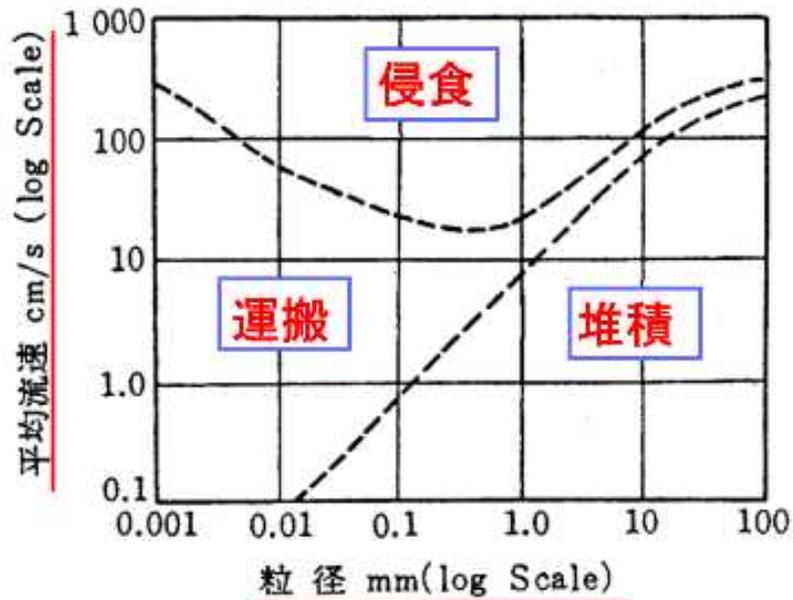


【地層の成り立ち】

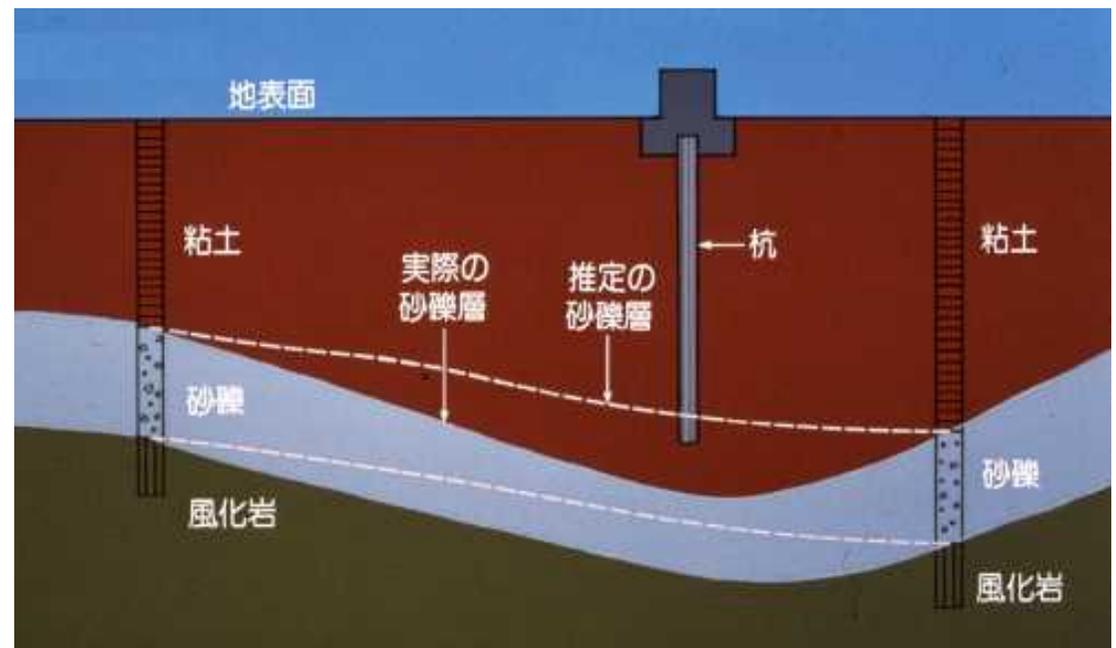
地層累重の法則 (Law of Superposition)

第1法則: 水平に堆積、 第2法則: 側方に連続、
第3法則: 下方の堆積物が古い

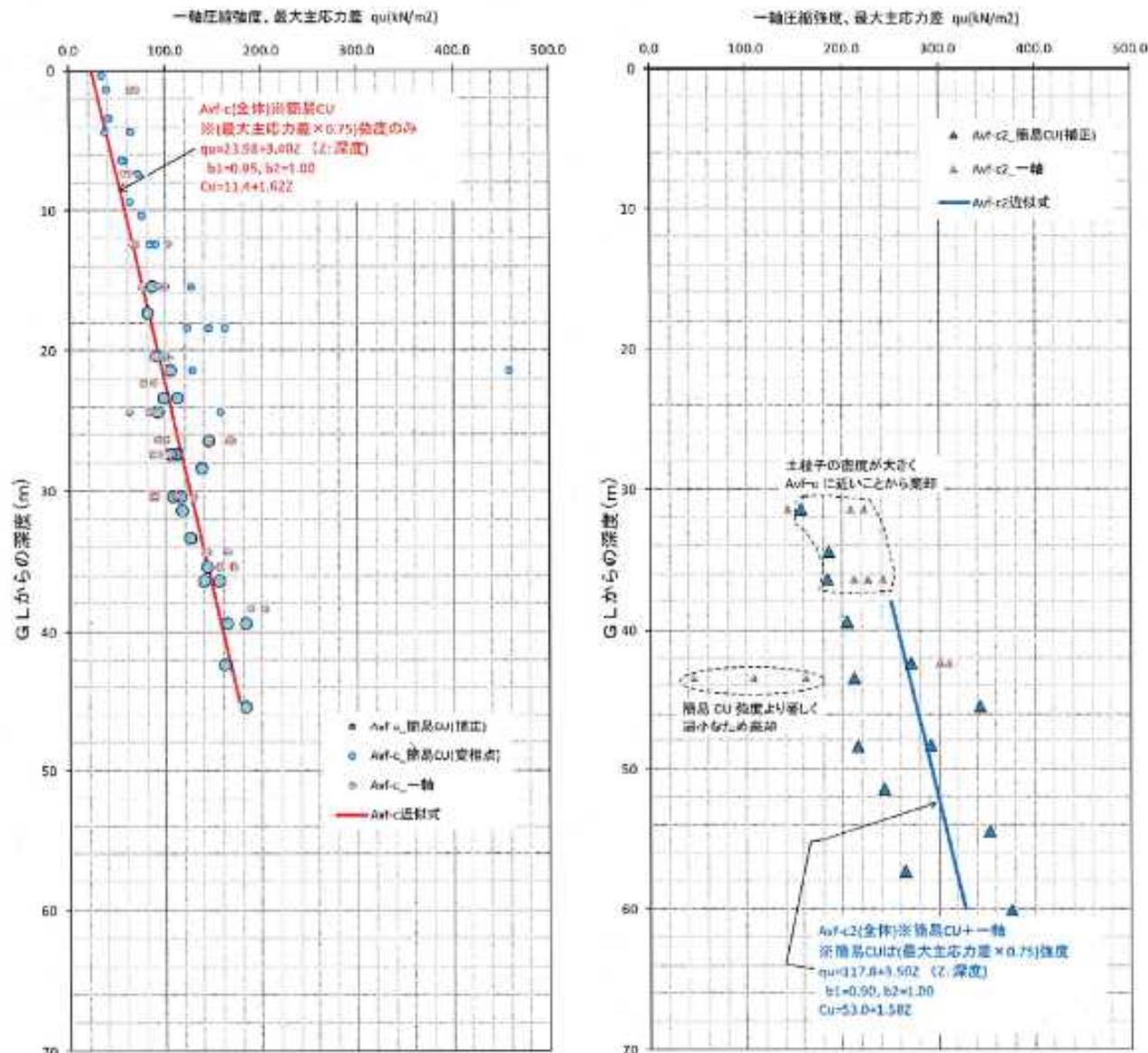
【土の粒子大きさと堆積環境】



【地層の推定と実際(調査の実施例)】

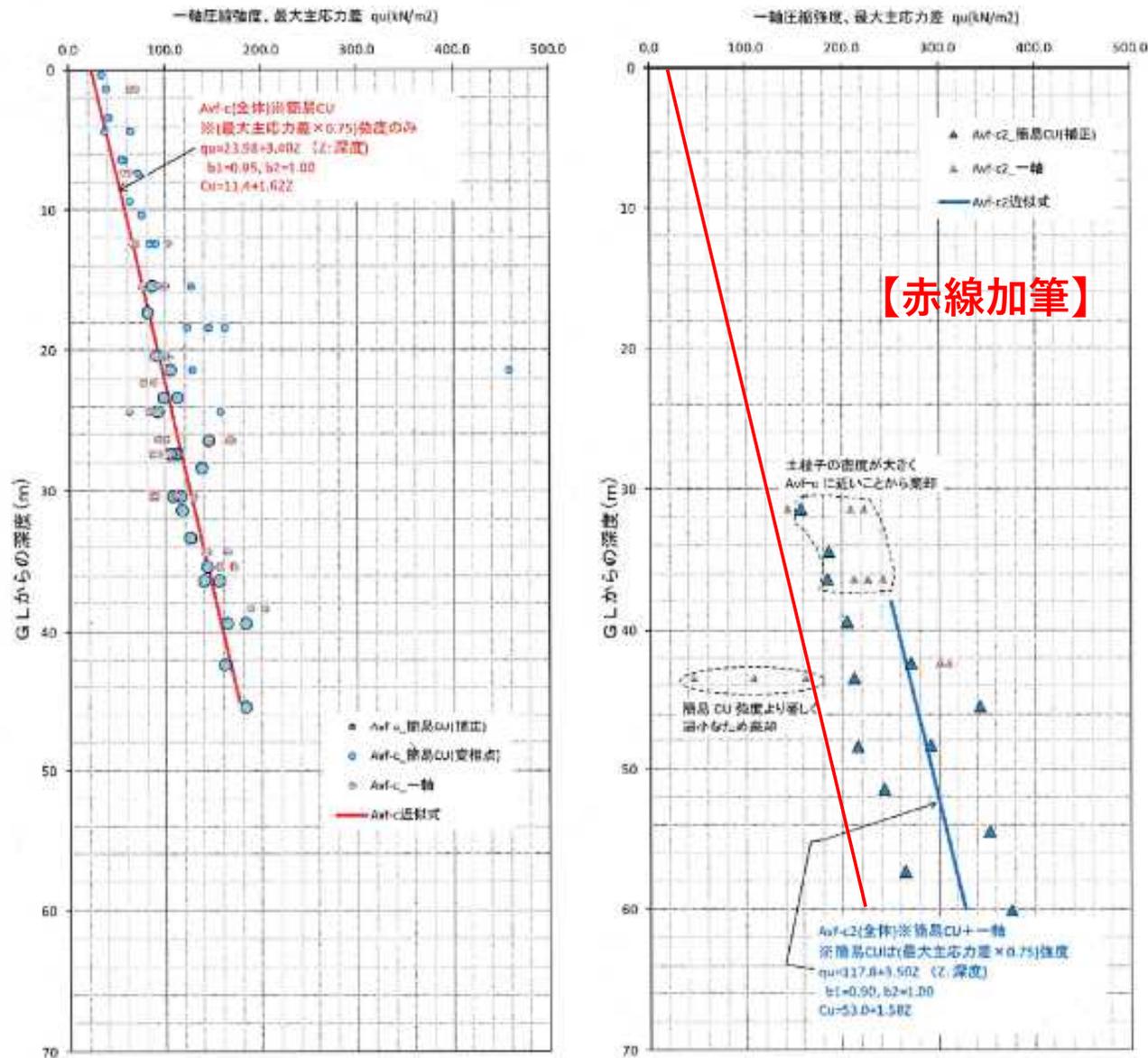


【非常に硬い粘土は42m以深(Avf-c2層)】



※Avf-c層とAvf-c2層は、物理試験・力学試験の結果より、地盤強度等の特性が異なることから分離した。
 地層境界は、C-1護岸周辺ではC.D.L.-74.0m程度であり、上記グラフ中のGLからの深度42m付近となる。

【非常に硬い粘土は42m以深(Avf-c2層)】



※Avf-c層とAvf-c₂層は、物理試験・力学試験の結果より、地盤強度等の特性が異なることから分離した。
 地層境界は、C-1護岸周辺ではC.D.L.-74.0m程度であり、上記グラフ中のGLからの深度42m付近となる。

【非常に硬い粘土(Avf-c2層)の土性値】

表 2.1-4 検討に用いた土質条件一覧表

土質	土性	平均 N値	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	非排水強度 ^{※1}			排水強度 ^{※1}			圧縮 指数 Cc ^{※6}	初期 間隙比 e0	二次圧縮 指数 Ca ^{※7}	圧密係数 Cv (cm ² /day)
					Cu (kN/m ²)	ϕ (度)	設定の考え方	Cd (kN/m ²)	ϕ_d (度)	設定の考え方				
Avf-s	中間土 ^{※2}	6.5	18.4	18.0	15.0+2.94Z (Zの基準: GL±0.0)	0	簡易CU ^{※3} (変相点)	0	37	CD強度(b1=0.95, b2=1.00 で補正)	0.29	1.02	0.0116	300000
Avf-c	粘性土	4.5	18.3	18.2	11.4+1.62Z (Zの基準: GL±0.0)	0	簡易CU ^{※3} (最大主応力差×0.75)	強度増加率 m=0.2で考慮 ^{※4}	強度増加率は、安全側に一般値 の下限値採用を採用	0.33	0.99	0.0132	100000	
Avf-c2	粘性土	-	17.4	17.1	53.0+1.58Z (Zの基準: GL±0.0)	0	簡易CU ^{※3} (最大主応力差×0.75)	強度増加率 m=0.2で考慮 ^{※4}	強度増加率は、安全側に一般値 の下限値採用を採用	0.45	1.14	0.0180	300000	
Aco-c	中間土 ^{※2}	1.0	18.7	18.1	12.1+2.06Z (Zの基準: GL±0.0)	0	簡易CU ^{※3} (変相点)	0	40	CD強度(b1=0.95, b2=1.00 で補正)	0.25	0.99	0.0100	100000
Aco-s	砂・礫質土	3.0	19.3	18.8	-	-	-	0	34	CD強度(b1=0.95, b2=0.75 で補正)	-	-	-	-
Aco-g	砂・礫質土	20.9	19.1	18.3	-	-	-	0	38	CD強度(b1=0.90, b2=1.00 で補正)	-	-	-	-
Dts	粘性土	42	20.5	20.4	252	0	推定値(C=6N)	-	-	-	-	-	-	-
DK	砂・礫質土	50以上	20.3	19.8	-	-	-	0	34	CD強度(n=2地点のため 最小値採用し、補正なし)	-	-	-	-
EKK	基盤	50以上	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- ※1: 粘性土・中間土については、ケーソン掘付から完成までの各施工段階に応じたせん断時の間隙水圧の発生を考慮して、非排水強度及び排水強度を以下の通り適切に使い分けて安定性を評価する。
- ※2: Avf-s は、細粒含有率が平均 30.6%(1.5~97.0%, n=168)で、「粘性土(非排水強度)」と「砂・礫質土(排水強度)」の中間的な土性を有する。透水係数は、平均 9.1×10^{-4} (cm/s)と、比較的透水性が高いことから、せん断強度は、非排水強度と排水強度の両者を設定するものとした。使用区分としては、ケーソン設置までが非排水強度、埋立完成時は排水強度を用いる。Aco-c も細粒含有率が平均 56.2%(7.6~98.5%, n=120)で、透水係数は平均 2.0×10^{-4} (cm/s)であるため、同様に強度定数を設定した。
- ※3: 粘性土及び中間土の強度評価は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説 H30.5」p333~334 に記載の一軸と三軸を併用した強度(簡易 CU 試験※間隙水圧計測)を用いて評価した。ただし、一軸圧縮試験は採取試料の砂分混入、低塑性の土性を踏まえ、試験供試体が安定しないことから実施していない。簡易 CU 試験結果からの非排水せん断強度の評価に際しては、「港湾の施設の技術上の基準・同解説 H30.5」p331 に示される、「経験的に 0.75 倍する」補正を行って用いた。また、簡易 CU を用いた排水強度のうち、砂分が多くダイレージョンの傾向を示すものについては、「京野他、砂・シルト分を多く含む地盤の非排水せん断強度決定法について(その 3)、第 46 回地盤工学研究会発表会、2011.7」等の文献を参考に、変相点(間隙水圧最大時で評価)の強度を採用した。
- ※4: Avf-c、Avf-c2 の長期強度は強度増加率 m と圧密度 ρ_r を考慮して設定する。強度増加率は「港湾の施設の技術上の基準・同解説 H30.5」p333 に記載の $m=0.2 \sim 0.25$ より、現段階では安全側に下限値の $m=0.2$ を採用した。
- ※5: Dts 層も中間土的な性状を示す部分があるが、護岸の安定性に及ぼす影響が小さいと考えられることから、現段階では安全側に非排水強度で評価する。
- ※6: 圧密試験は「定ひずみ速度載荷による圧密試験」を採用した。同試験の採用理由は、対象土質に砂分含有量が多い土質や硬質粘土があり、より試験の対象土質の運用範囲が広い(例えば、地盤材料試験の方法と解説 p500)試験を採用したためである。
- ※7: 二次圧縮指数 Ca は、これまでに入手している長期圧密試験結果を踏まえ、「港湾の施設の技術上の基準・同解説 H30.5」p742 に記載の推定式 ($Ca = (0.03 \sim 0.05)Cc$) と同等の傾向を示すことから、 $Ca = 0.04Cc$ として設定した。今後は、現在も継続して実施中である長期圧密試験結果も踏まえ詳細な分析を行い、二次圧縮指数 Ca を設定することとする。

【非常に硬い粘土 (Avf-c2層) の土性値】

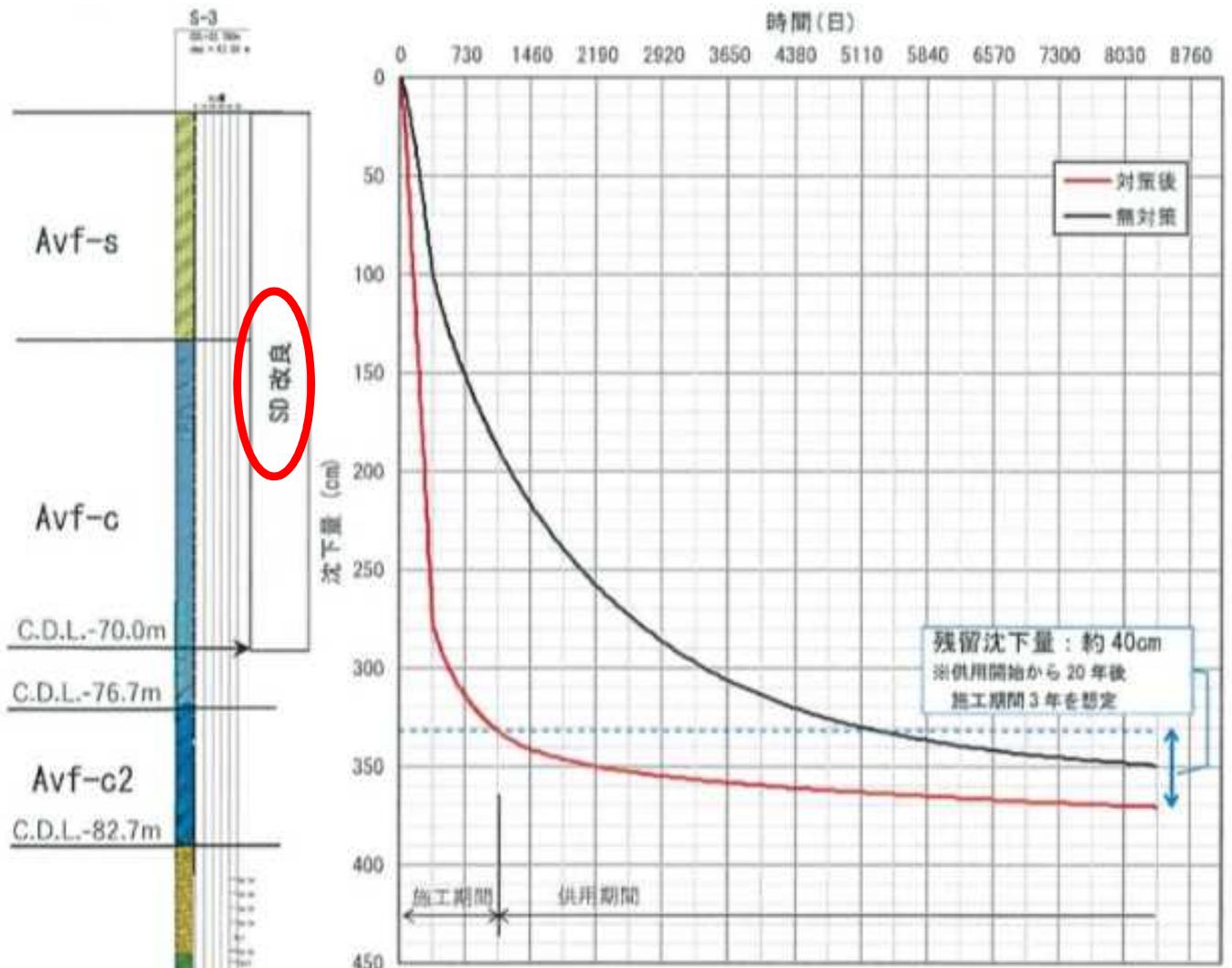
土質	土性	平均 N値	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	(略)	圧縮 指数 Cc ^{※6}	初期 間隙比 e0	二次圧縮 指数 Ca ^{※7}	圧密係数 Cv (cm ² /day)
Avf-s	中間土 ^{※2}	6.5	18.4	18.0	(略)	0.29	1.02	0.0116	300000
Avf-c	粘性土	4.5	18.3	18.2		0.33	0.99	0.0132	1000
Avf-c2	粘性土	—	17.4	17.1		0.45	1.14	0.0180	300

単位体積重量 (土の重さ)

圧密沈下のパラメータ

- ・ 圧縮指数が**大** → 沈下量が**大**
- ・ 間隙比が**大** → 隙間が**大**
- ・ 二次圧縮係数が**大** → 長期沈下が**大**
- ・ 圧密係数が**小** → 圧密沈下が**長い**

【非常に硬い粘土 (Avf-c2層) の土性値】



注) 横軸の「0」は、ケーソン工事の着手時期を示し、施工期間 3 年は着手時期から S-3 地点の埋立完了までを想定。

図 3.5-22 時間-沈下曲線(S-3 地点)

【起伏に富む東側護岸直下】



東側護岸

出典：「辺野古・大浦湾 アオサンゴの海 生物多様性が豊かな理由(わけ)」
「日本自然保護協会」・「WWF ジャパン」

<http://www.nacsj.or.jp/archive/files/katsudo/henoko/pdf/henoko-090423-01-hokoku.pdf>

【ケーソン護岸建設時の安定性の検討(地盤改良後)】

基準作用耐力比	$F_s =$	1.000	
円弧すべり作用耐力比	$=$	0.991	≤ 1.0 (OK)
円弧の中心	$X =$	-40.00	(m)
	$Y =$	24.00	(m)
半径	$R =$	113.00	(m)
抵抗モーメント	$M_R =$	2786805.8	(kN・m)
起動モーメント	$M_D =$	2761896.3	(kN・m)
調整係数	$m =$	1.00	

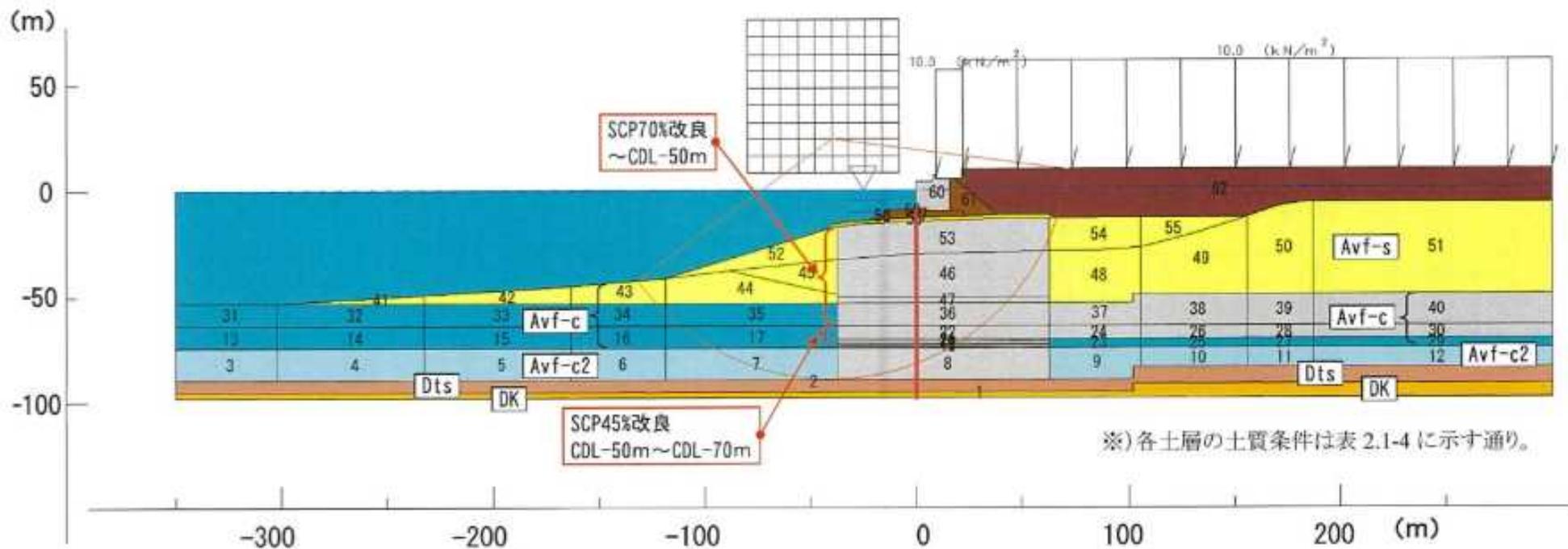


図 3.5-11 円弧すべり照査結果(C-1 護岸)地盤改良時

【ケーソン護岸建設時の安定性の検討(地盤改良後)】

(5) 護岸等直下の安定性照査結果

円弧すべりの照査結果より、検討対象地層を SCP 改良により地盤改良すれば、護岸等の安定性を満足する(作用耐力比 1.0 以下)ことが確認できた。

表 3.5-4 地盤改良による護岸等の円弧すべり照査結果

代表工区	円弧すべりの作用耐力比 [※]	備考
C-1 護岸	0.991 (OK)	CDL-50m 以浅:SCP70%改良 CDL-50m 以深:SCP45%改良
C-2 護岸	—	注 1)
C-3 護岸	0.832 (OK)	CDL-50m 以浅:SCP70%改良 CDL-50m 以深:SCP45%改良
隅角部護岸	—	注 2)
護岸(係船機能付)	0.734 (OK)	全層:SCP70%改良
A 護岸	0.898 (OK)	二重矢板間のみ:SD 改良
中仕切岸壁 A:-10.0m	0.589 (OK)	全層:SCP70%改良
中仕切岸壁 A:-7.5m	0.544 (OK)	全層:SCP70%改良
中仕切岸壁 B:-7.5m	0.539 (OK)	全層:SCP70%改良
中仕切護岸 N-1	0.851 (OK)	全層:SCP70%改良

※作用耐力比は、最小となる円弧すべりの結果として記載。1.0 以下の場合、安定と判断する。

注 1) 公有水面埋立承認願書に記載した C-2 護岸の基本断面の位置には検討対象地層は存在しないが、図 2.1-3 に示す通り C-2 護岸工区には検討対象地層が一部存在している。当該箇所を検討対象地層の分布深度は隣接する C-3 護岸工区よりも浅いことから、分布深度のより深い C-3 護岸の検討結果に準じて検討する。

注 2) 構造物直下の地盤改良は不要であるが、護岸背面に分布する検討対象地層に関しては、埋立地内の地盤改良により対応する。

【埋立土砂等について】

沖縄県土砂搬入規制条例(2015)

(公有水面埋立事業における埋立用材に係る外来生物の侵入防止に関する条例)

条例は、外来生物の侵入を防ぎ、環境を保護することを目的に掲げた。公有水面埋め立て事業の事業者に対し、**沖縄県外から土砂や石材**を持ち込む場合、搬入予定日の90日前までに資材の種類や用途を知事に届け出るよう義務付けたほか、**外来生物の防除対策**を求めた。従わない場合、知事は搬入中止の勧告や立ち入り調査ができるとした。

【県外】岩ズリ

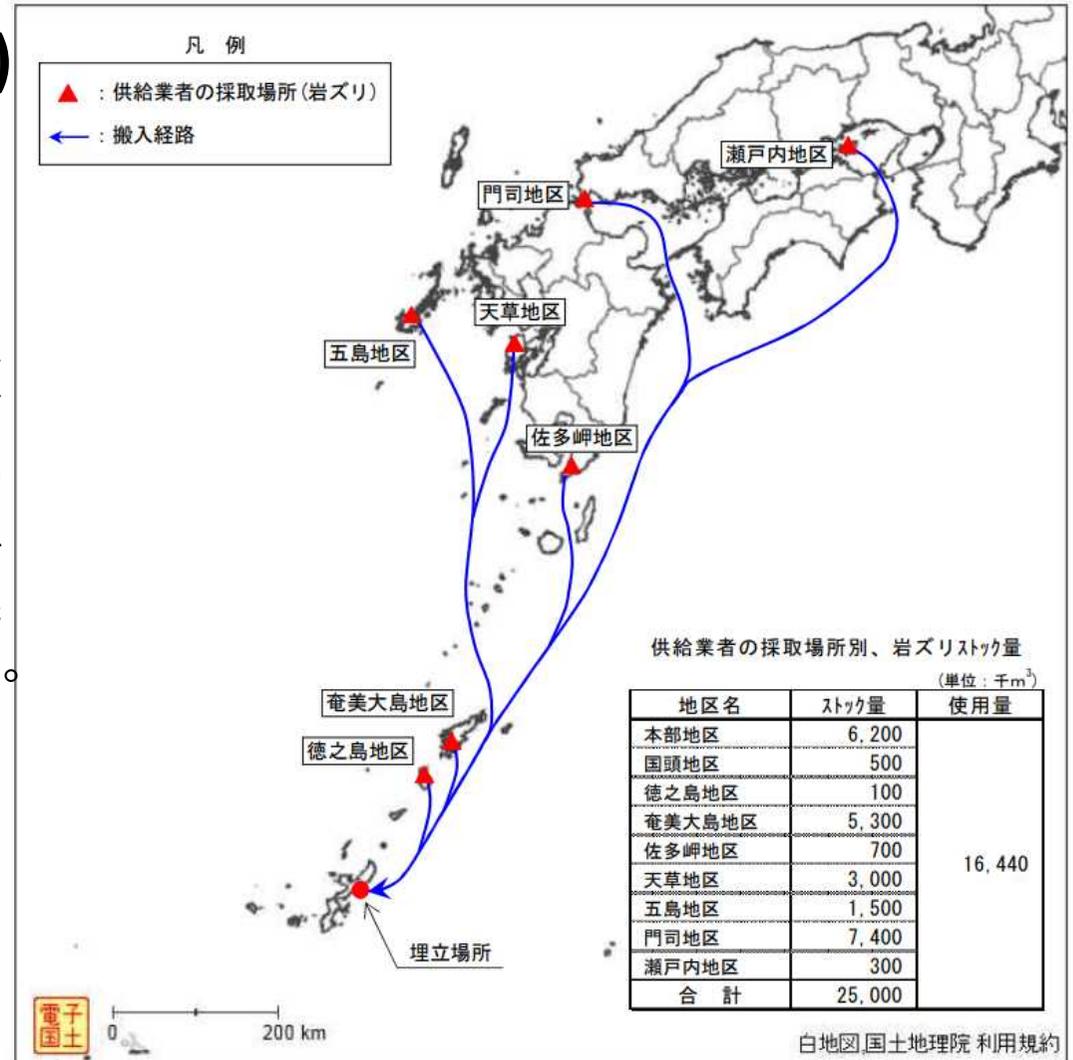


図 4.1 埋立土砂等の採取場所及び搬入経路図(1)