

羽田空港D滑走路海域の土質性状
～埋立部を中心とした調査結果報告～

東京空港整備事務所 野口孝俊
 護岸・埋立(I)工区 河村健輔
 護岸・埋立(II)工区 井上 憲
 護岸・埋立(III)工区 川端利和
 ○護岸・埋立(IV)工区 堺谷常廣

キーワード 追加土質調査 層序構成 土質性状 せん断特性 圧密特性 CPT

1. はじめに

東京国際空港D滑走路建設外工事（以下、本工事）は、軟弱な沖積粘土層、その下の砂層を挟んだ粘土層及び礫層からなる地盤上に建設される。設計・施工上の問題として、地盤の変形を許容した設計及び施工を行う必要があり、地盤の強度、沈下、変形を予測する事は極めて重要な課題となっている。

本工事では、設計値の設定および施工条件を確認するため、平成18年12月～平成19年8月にかけて追加土質調査（以下、本調査）を行っている。本報告では、調査結果より、埋立部を中心として地層構成、物理特性、力学特性を報告すると共に、再圧縮法によるせん断強度の評価について述べる。

2. 調査位置及び項目

本調査の位置づけは、設計条件として提示された平成14年度及び平成15年度東京国際空港再拡張土質調査～東京国際空港再拡張土質調査その7（以下、土質調査参考資料¹⁾）を基にした詳細調査という位置づけである。また、再拡張調査後に滑走路法線が7.5度傾いたため、未調査区域が生じており、この部分の物性解明も目的の一つである。公告資料では、A-1～A-14、B1～B-3までの詳細ボーリング調査を行っている。

本調査箇所C～J孔の調査箇所平面図と調査内容を図1-1と表1-1に示す。埋立部ではD孔で詳細調査を行い、C、H、J孔で三成分コーン（以下、CPT）、RI-CPT、電気検層によるサウンディング調査を行っている。接続部は、E-1～E-3孔で詳細調査を行っている。連絡誘導路、棧橋部は、F孔で載荷試験用詳細調査を行い、I、k孔で動的コーンを中心とするサウンディングを行っている。

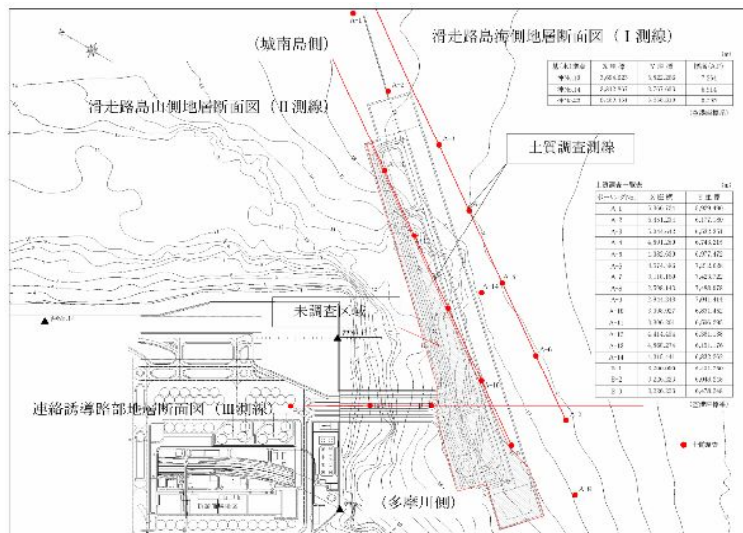


図1-1 土質調査参考資料調査孔と滑走路法線変更による未調査区域の位置

調査地点位置図

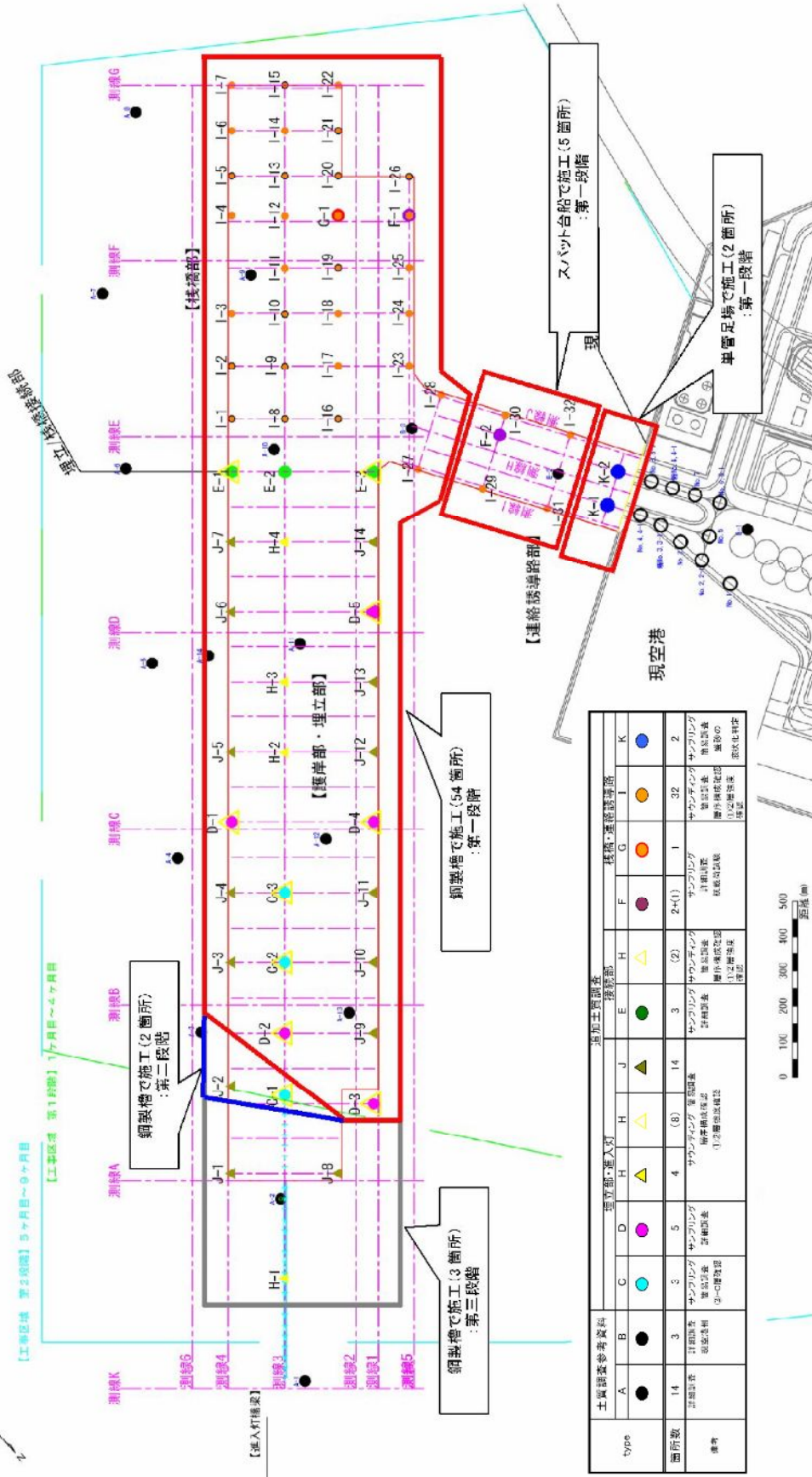


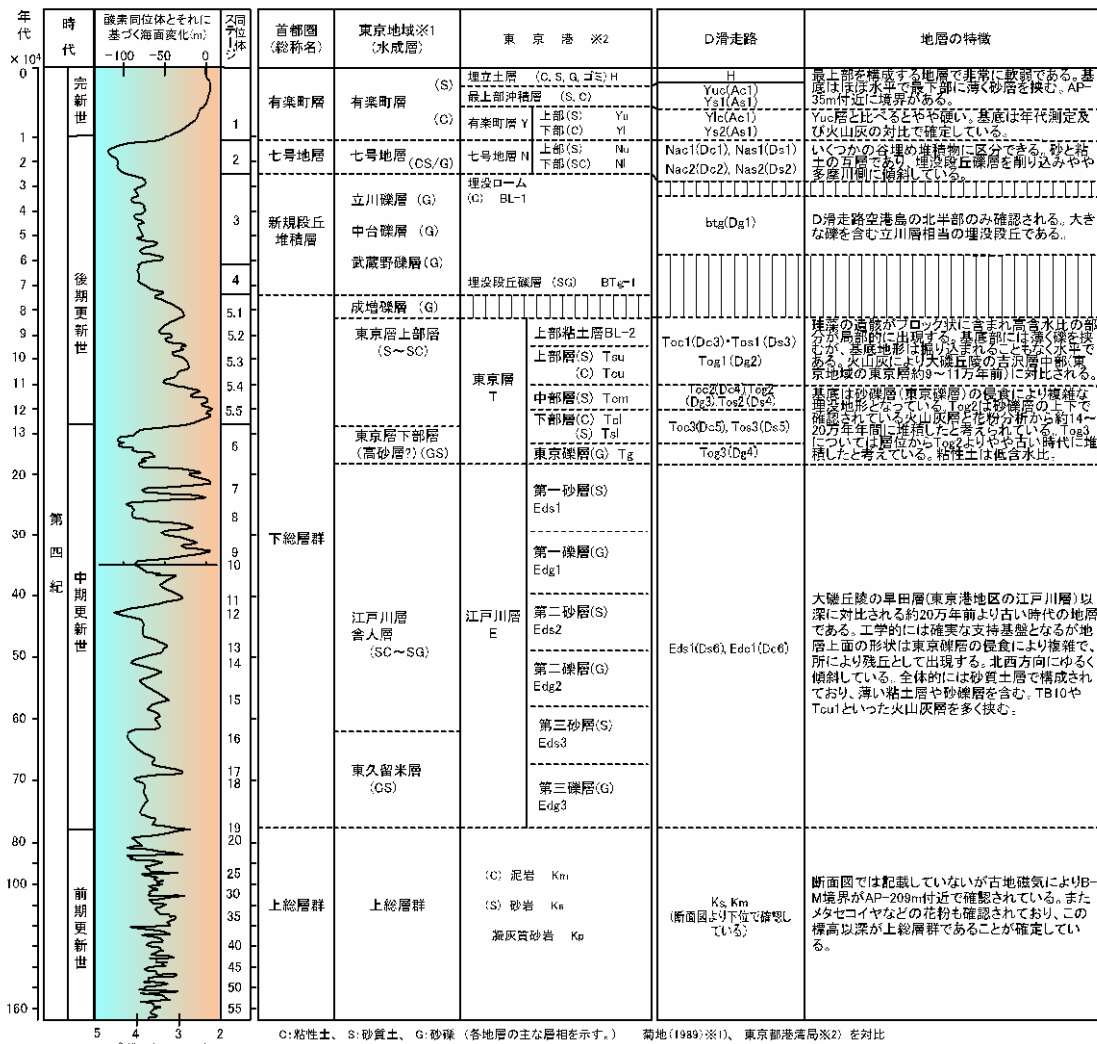
図 1-2 調査位置平面図

3. 地層構成

3-1 地質区分

本調査区域は、現空港島沖合 1 km 程沖合の区域である。昭和初期の東京湾の海図では、水深-20m の平坦な地形であったが、東京都による土砂処分事業、羽田再拡張事業に伴い、沖合に埋立地が拡張され現在の地形となっている。現在では、現空港側から連絡誘導路橋及び埋立部中心部に向かって覆砂等が堆積している。本工事区域の地層構成は、既往資料によると完新世の海面上昇に伴い堆積した、有楽町層を表層として、七号地層、新規段丘地層以下東京層、江戸川層となる。地層構成についての既往資料層序を表 3-1 に示す。地層構成では有楽町層及び七号地層について不整合がみられず、地質学的に同一の層として見なす研究もあるが、本調査では今までの慣例に倣い、有楽町層を沖積層、七号地層を洪積層という区分としている。

表 3-1 既往研究による層序構成とその特徴



3-2 層序の工学的区分

本調査では、地質的に分類される構成を、物理特性、力学特性より工学的な観点から地盤特性を整理し区分をしている。工学的区分分類規範は、土質調査参考資料 4.3 工学的な地層区分の判定に倣って整理をしている。実際の判定は、ボーリング孔毎に層相やN値、三成分コーンの値、室内試験結果に、再拡張調査の結果も踏まえ決定している。表 3-2 工学的区分（大区分）表 3-3 工学的区分（小区分）を記載する。次に各層の特徴を示す。

表 3-2 工学的区分（大区分）¹⁾

層名(大区分)	特徴
①	<ul style="list-style-type: none"> 粘性土地盤。 強度増加率が一定で、高含水比を有する。シンウォールサンプリングは可能である。
②	<ul style="list-style-type: none"> 互層地盤。 物性が大きくばらついている。 塑性指数が小さく砂が多い。 砂質土は比較的大きなN値の箇所も存在する。
③	<ul style="list-style-type: none"> 小規模構造物の支持層となりうる層。 砂礫・粘性土・砂質土の互層地盤。 N値 50 以上の箇所もある。
④	<ul style="list-style-type: none"> 中規模～大規模構造物の支持層となりうる層。 一部小さなN値を有する粘土が挟在しているが、N値 50 以上の連続した層が確認できる。
⑤	<ul style="list-style-type: none"> 大規模構造物の支持層となりうる層。 N値 50 以上の連続した層である。

表 3-3 工学的区分（小区分）¹⁾

大区分	小区分	土質	特徴
①	①-H 覆土部	粘性土主体で、一部砂質土を挟在。	* 粘性土を主体とし砂を挟む覆土。最上部層。
	① 1～① 2 Ac1 (AP-20～30m)	粘性土主体。	* 高含水比高塑性指数・間隙比が大きい($w_p > 100, I_p > 60, e > 3$)。
	① 3 Ac1 (AP-30m～)		* 圧密特性により 5m 間隔で区分。 * 単位体積重量は $\gamma_t = 13.5 \text{ kN/m}^3$ 程度。 * 単位体積重量は $\gamma_t = 15.0 \text{ kN/m}^3$ 程度。
②	② 1～② 4 Ac2～Dc1 層	粘性土主体で、②層の下半分に一部	* ①層と比べると粗粒で低塑性な粘性土。 * 圧密特性により 5m 間隔で区分。 * 単位体積重量は $\gamma_t = 18.0 \text{ kN/m}^3$ 程度と粘性土としては大。
	②-S Ac2～Dc1 層一部の砂質土部	に一部砂質土挟在。	* ②層の下半分に位置する砂質土で、厚さは薄く互層状態。
③	③ 1～③ 3 ③ 2 低 Cc 互層の粘性土部	粘性土と砂質土、砂礫の互層。	* 単位体積重量は $\gamma_t = 18.0 \text{ kN/m}^3$ 程度と粘性土としては大。
	③-S 互層の砂質土部		* ③ 1 は高 Cc の層の上、③ 3 は高 Cc の下に位置。 * 低 Cc 箇所は高 Cc と同じ深度。 * N値 50 以上が比較的連続する砂質土。
	③ 2 高 Cc 粘性土の高含水比部		* 単位体積重量は $\gamma_t = 14.5 \text{ kN/m}^3$ 程度と粘性土としては小。 * 珪藻を多量に含み高塑性・一部高含水比で間隙比が大。 * AP-70m 付近に出現。
	③-G 互層の砂礫部		* ③層中に挟まれる段丘礫層 (btg 層)。 * 礫径が 100mm 超。
④	④-C 工学基盤と見なせる可能性のある層 (粘性土部)	砂質土と砂礫が主体で、一部粘性土挟在。	* 粘性土の塑性指数は、比較的低いが $I_p = 10 \sim 40$ と幅を持つ。
	④-S 工学基盤と見なせる可能性のある層 (砂質土部)		* 砂質土を主体とする層。 * N値は 50 以上あるが一部 N値が低下。
	④-G 工学基盤と見なせる可能性のある層 (砂礫部)		* 礫径 80mm 程度。 * N値は 50 以上。
⑤	⑤ 工学基盤層	砂質土主体。	* おおむね砂質土で構成、粘性土の層厚は、薄い。 * N値が 50 以上の連続した層。

3-3 地層構成

3-2 に示した工学的区分により本調査の結果から、工事区域における土層区分を図 3-1~2 に示す。図 3-1~2 では、工学的区分（小区分）に基づいた表記としている。①C 層内の再区分は主として深度方向 5m 毎の区分である。提示した土質参考資料と比較して、概ね層序構成が一致している。

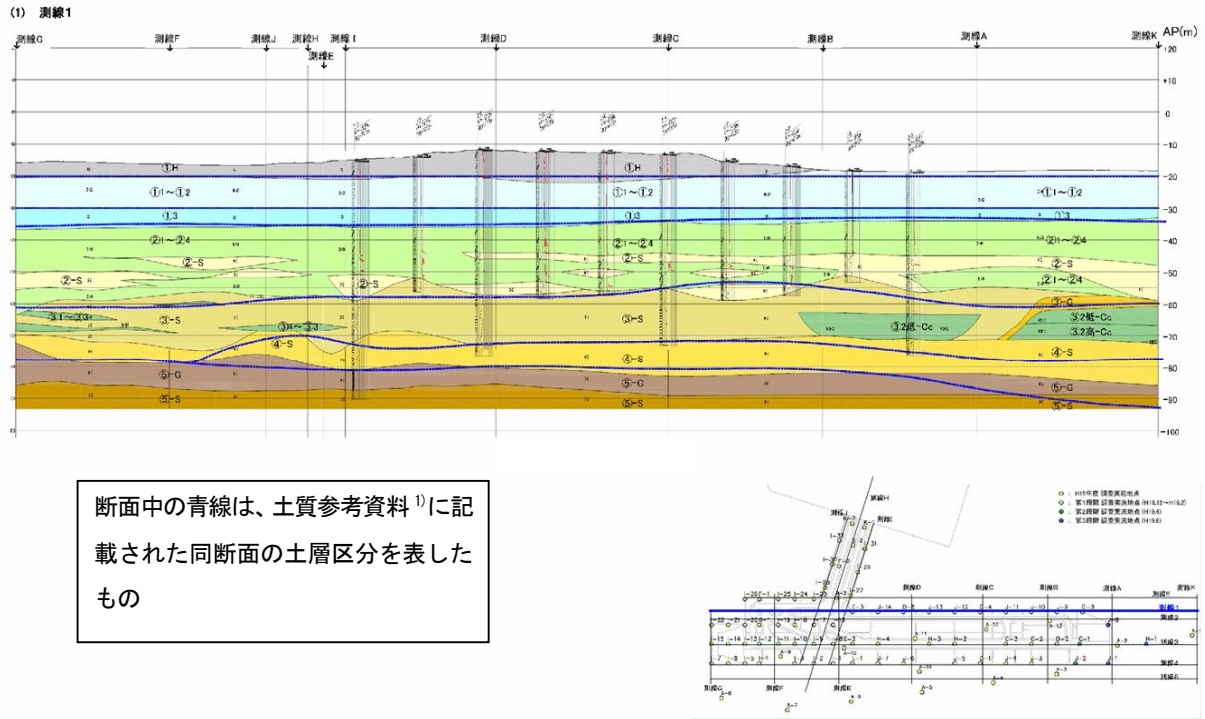


図 3-1 本調査結果による地層区分結果（測線 1 現空港側）

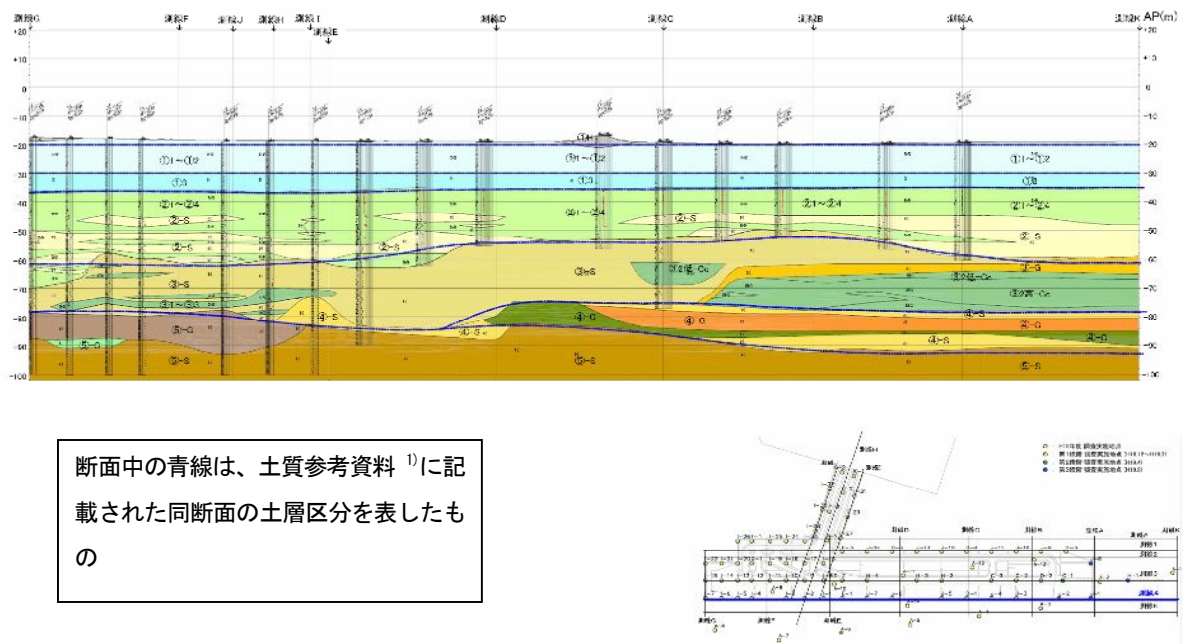


図 3-2 本調査結果による地層区分結果（測線 6 沖側）

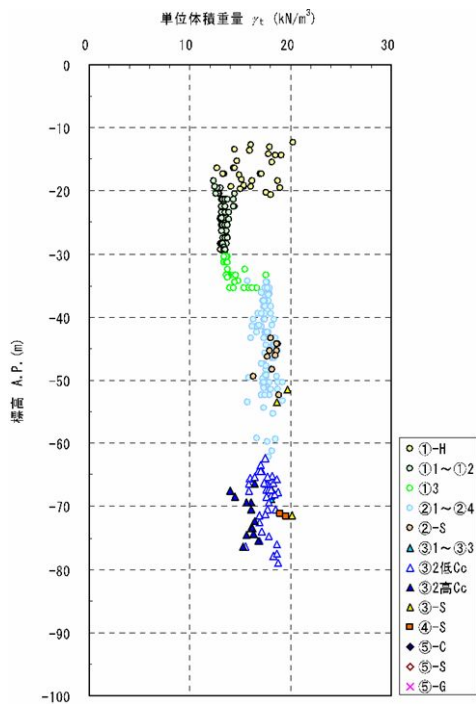


図 3-3 単位体積重量深度分布

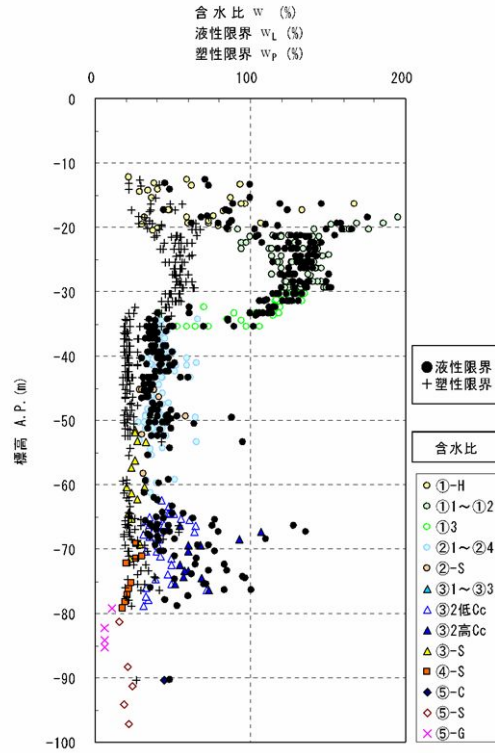


図 3-2 液塑性・含水比深度分布

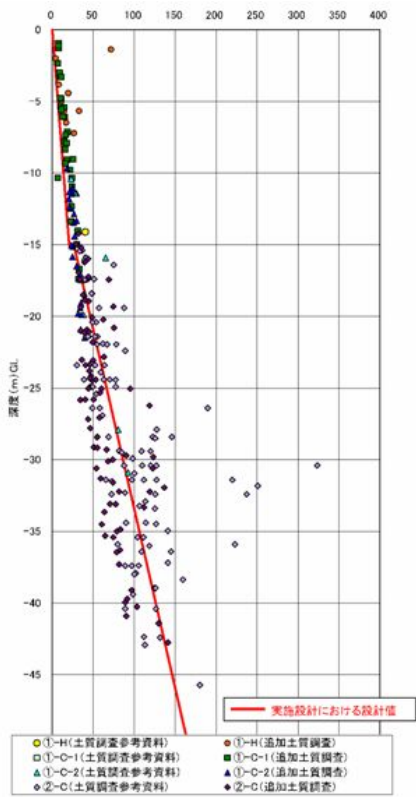


図 3-4 C_u の深度分布

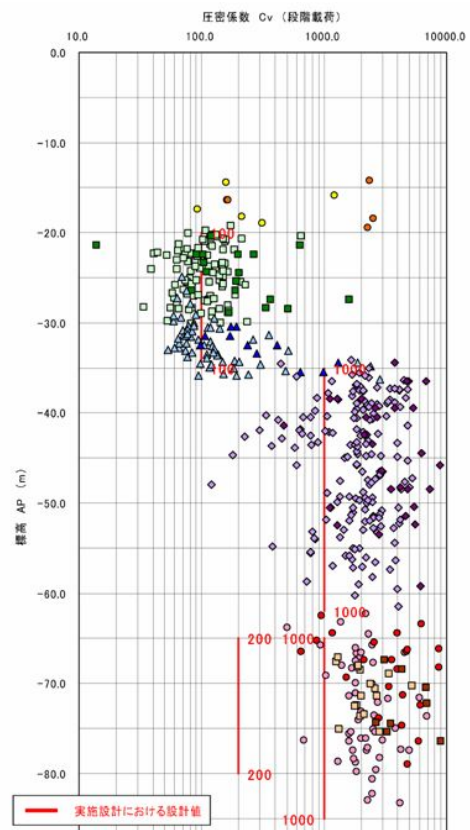


図 3-5 C_v の深度分布

4. 設計定数の比較・評価

4-1 せん断特性

土のせん断強度は、護岸構造及び埋立部中仕切堤設計において重要なパラメーターである。本工事で対象となる地盤は、軟弱な粘性土地盤である。軟弱地盤上に载荷を行う場合、载荷直後には排水がほとんど起こらず圧密も含水比の変化も生じない状態となる。このような場合には、原地盤の载荷荷重による非圧密非排水試験及び所定の荷重による圧密を考慮した圧密非排水試験の結果を用いて安定計算を行う。我が国では、粘性土地盤の設計用せん断強度は、一軸圧縮強度の1/2により決定されている。一軸圧縮強度による強度決定法は q_u 法と呼ばれている。

中瀬²⁾は、我国の軟弱地盤において、港湾構造物を中心にすべり破壊事例を多く収集し解析を行い、一軸圧縮強度 q_u の平均値の1/2を地盤の非排水せん断強度として、修正フェレニウス法で計算した円弧すべりの安全率が破壊事例をよく説明出来る事を示した。

しかしながら、 q_u 法が真のせん断強度と等価であることは”Lucky Harmony”と呼ばれ、試料の乱れや強度低下を前提として成り立っていると推測される。 q_u 法の問題点を上げると、

- ① 真のせん断強度を評価するために試料採取時の乱れが必要である。
- ② 砂分の多い粘性土は拘束圧解除による強度低下が大きい。
- ③ 採取試料内のクラックの影響が大きい。 などの問題点がある。

本工事では、設計用せん断強度に用いるせん断強度を決定するために、 q_u 法の問題点を克服する目的のため再圧縮法を合わせて行っている。再圧縮法は、原位置での有効応力状態を室内試験で再現する事により、乱れの影響を除去し、その後せん断試験を行い、強度を決定する方法である。再圧縮法によって求められた強度が軟弱地盤の安定にどの程度適用出来るかは半沢ら(1982)の研究によって明らかにされており、半沢らの方法は修正ベールラム法と呼ばれている。修正ベールラム法は、不攪乱試料を原位置の有効土被り圧で k_0 圧密した後、圧縮強度と伸張強度の平均を安定解析に用いるものである。

東京湾夏島地区粘土の試験結果により q_u 法による強度と修正ベールラム法による強度はほぼ一致している。修正ベールラム法は、高度な試験技術とともに試験コストが大きなものとなる。したがって、本試験では修正ベールラム法と等価な室内試験法として、簡易 C_u 試験³⁾(土田1989)及び一面せん断試験による地盤の強度評価⁴⁾(半沢1989)を採用している。その結果

$$C_u \doteq q_u/2 \doteq 0.75 \cdot Su_{(SCU)} \doteq 0.85 \cdot Su_{(DST)}$$

$Su_{(SCU)}$: 簡易 C_u 試験によって得られたせん断力、

$Su_{(DST)}$: 一面せん断試験によって得られたせん断力

という関係が明らかになっている。

4-2 せん断試験結果

室内試験結果より得られたせん断強度は、設計用せん断強度として比較検証を行っている。一面せん断試験結果と一軸圧縮試験結果及び簡易 C_u 試験及び一面せん断試験の結相関図を図4-1～4-2に示す。図のプロットは①C-H～②-C毎にプロットしている。既往の研究のとおり、 $q_u/2$ と再圧縮法による設計用せん断力の評価は①C層では良い一致をみている。しかし、②C層は砂の挟在、応力解放の影響により $q_u/2$ にばらつきが大きくなっている。再圧

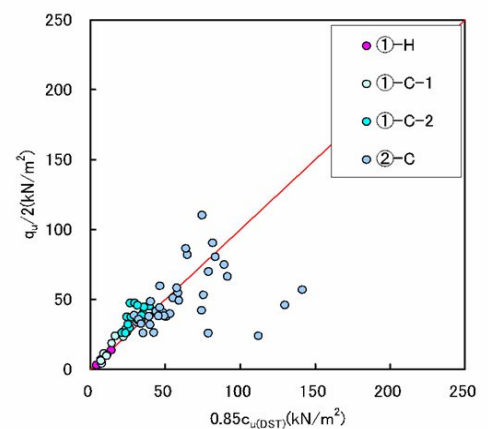


図4-1 $q_u/2 \sim 0.85 \cdot Su_{(DST)}$ の関係

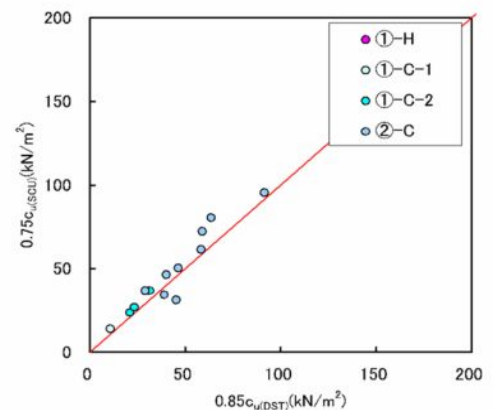


図4-2 $0.85 \cdot Su_{(DST)} \sim 0.75 \cdot Su_{(SCU)}$ の関係

縮法の比較（図 4-2）をみると①C層、②C共に比較的良い一致をみている。この結果より再圧縮法は、中間土についても適正に評価が可能と考えられる。このことから、①C層及び②C層共に設計用せん断強度の評価に再圧縮法を採用した。

4-3 圧密特性

本調査では、各圧密定数の統計的評価を行い、土質調査参考資料との比較を行っている。圧縮指数、圧密係数及び二次圧密係数に関して土質調査参考資料の本調査の結果は概ね同程度のばらつきであり、採用された設計値は概ね妥当であると考えられる。過圧密比は、①層は土質参考資料と比較して、概ね同等の評価ができるが、②層については、若干小さめに分布している。圧密特性の統計的評価について表 4-1 に示す。

表 4-1 圧密特性の統計的評価

		圧縮指数 C_c	圧密係数 c_v (cm^2/day)	過圧密比 OCR	二次圧密係数 C_α	
①-H	実施設計の設計値	0.50	100	1.30	0.020	
	土質調査参考資料	平均値	0.50	398	2.84	—
		標準偏差	0.19	462	1.65	—
		変動係数	38.1 %	116.0 %	58.1 %	—
	追加土質調査	平均値	0.65	1502	3.03	0.012
		標準偏差	0.27	1224	1.45	0.004
変動係数		41.6 %	81.5 %	47.8 %	35.3 %	
①-C-1	実施設計の設計値	1.41	100	1.30	0.057	
	土質調査参考資料	平均値	1.42	118	1.78	0.021
		標準偏差	0.20	73	0.70	0.006
		変動係数	13.7 %	61.8 %	39.4 %	27.2 %
	追加土質調査	平均値	1.36	294	1.36	0.021
		標準偏差	0.20	364	0.43	0.007
変動係数		14.6 %	123.8 %	31.6 %	31.7 %	
①-C-2	実施設計の設計値	1.30	100	1.30	0.052	
	土質調査参考資料	平均値	1.30	239	1.54	0.066
		標準偏差	0.37	508	0.35	0.015
		変動係数	28.1 %	212.3 %	22.7 %	23.1 %
	追加土質調査	平均値	1.17	419	1.38	0.024
		標準偏差	0.33	399	0.24	0.009
変動係数		28.0 %	95.2 %	17.5 %	35.6 %	
②-C	実施設計の設計値	0.39	1000	2.50	0.016	
	土質調査参考資料	平均値	0.40	2131	2.49	0.011
		標準偏差	0.15	1140	1.05	0.003
		変動係数	38.2 %	53.5 %	42.3 %	31.8 %
	追加土質調査	平均値	0.40	3733	2.35	0.010
		標準偏差	0.07	2075	0.73	0.005
変動係数		18.7 %	55.6 %	30.9 %	49.0 %	

5. まとめ

本調査は、再拡張調査の補完及び未調査区域の物性把握という性格を持っている。本調査の結果、土質調査参考資料に提示されたように、原地盤表層より、①層、②層以下洪積層に分類される層序構成が確認されている。各層は明確に区分される物理特性、力学特性を有している。①層は、比較的均一な層であるため、サンプリングなどの情報にローカル性が少なく、予測解析が比較的容易なものである。これに比べて②層は、砂層が狭在する層であるため、複雑な層であることが改めて確認された。③層は、砂層を主体とする層であるが、粘性土層が狭在している。③C層の沈下量が総沈下量に占める割合は小さいが長期的な沈下となる可能性がある。

本調査の結果を初期値として設計は行われているが、解析結果と実現象が乖離する事は起こりうる事であるため、本施工では各層の挙動を把握し、注意深く動態観測結果を反映させ、安全で健全な埋立を行う。

【参考文献】

- 1) 土質調査参考資料 平成 17 年 国土交通省関東地方整備局
- 2) Nakase (1967) " The $\phi=0$ analysis of stability and unconfined compression strength"
- 3) 土田 (1989) 「一軸圧縮時化と三軸圧縮試験を併用した新しい粘性土地盤強度決定法」
- 4) 半沢 (1989) 「地盤のローカル性と技術の地域格差を克服するためのひとつの試み」