平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費

海底における斜面の地震時安定評価 に関する基礎検討

平成 28 年 3 月

日本大学工学部工学研究所

要旨

本事業は,海底地すべり起因の津波を考慮した確率論的津波ハザード評価に資するた めに,海底環境下を模した斜面の地すべり実験などを通じ,斜面安定性に関する既往手 法の適用性を把握することを目的とする.

この検証に必要な遠心載荷実験の計画を作成するため以下に示す 2 項目について調 査・研究を行った.

(1) 海底土質パラメータの収集・分析

(2) 地盤模型の設計

(1) については海底の地盤に詳しい国内の3名の研究者から聞き取り調査を行い、 海底地すべりの地形,地質,素因と誘因,海底土質パラメータを収集するための情報ソ ース,海底地盤の原位置強度試験,メタンハードレート関連の研究プロジェクトの研究 成果,海底地すべりを再現するための遠心載荷模型実験の成果,潜水艇を活用した深海 における海底地盤の調査から得られた貴重な情報および海底地すべりによる津波を評 価するための数値解析手法に関する情報を得た.

海底地盤の物性については、IODP(Integrated Ocean Drilling program)プロジェクト のデータを収集した.日本近海については日本海(IODP346),紀伊半島沖の南海トラ フ(IODP 333)を収集した.比較のため海外(メキシコ湾(IODP 308)についても収集 した.また IODP 以外の研究プロジェクト MH21 (メタンハイドレート資源開発研究コ ンソーシアム)の成果も収集した.収集した地盤データは, Shear strength (せん断強さ),

Bulk density(湿潤密度), Porosity(間隙率),

(含水比) である. これらのデータより, 日 本海の海底地盤は比較的軟弱で沖積粘土に 近い性状を示すことがわかった.一方,紀伊 半島沖の海底地盤は低塑性で活性が低い粘 土であり、過圧密履歴を受けていることもわ かった. 各地点の非排水せん断強さを比較し た結果、日本海とメキシコ湾の粘土は直線的 な分布形状であり、その大きさもほぼ等しい ことがわかった.一方,南海トラフは非線形 な分布形状を示し, 強度は日本海の強度と比 べて約3倍以上大きいことがわかった.これ らの検討から遠心載荷模型実験に用いる地 盤材料としては、日本海の粘土のような物理,



強度特性を持つ粘性土を選定し,深さ方向に比例的に強度が増加するような地盤を作製 することとした.

(2)の地盤模型の設計については、文献調査より海底地盤の斜面崩壊モードを整理して、並進破壊(Translational failure)と回転破壊(Rotational failure)の2つのモードを対象と

することとした.遠心載荷実験 は,基礎実験として日本海の海 底地盤を想定した比較的軟弱 な粘性土斜面の回転破壊モー ドを遠心載荷実験により再現 することとした. 地震力は地盤 モデルを傾斜させることで水 平震度として与える静的載荷 実験とする.加えて、海底地盤 特有の条件である静水圧作用 条件を実験で再現する.本報告 では斜面安定解析を実施して 地盤模型の基本仕様を決定し た. さらに実験計画を作成し, 概算のスケジュールと費用に ついても検討した.

動的な地震作用下で検証を 行うための遠心振動実験の計 画を作成した.具体的には急 勾配海底斜面およびの緩勾配 斜面を対象とした実験を行い, 前者は円弧すべり破壊(回転 破壊),後者は並進すべり破壊 による安定解析法の適用性の 検証に資する資料とすること



b)緩勾配斜面モデル

とした.加えて概算のスケジュールと費用についても検討した.

目次

1	はじめ		1
2	海底土的	質パラメータの収集分析	2
	2.1 国际	内外の文献収集と分析	3
	2.1.1	日本海(IODP 346)のデータ ^{1)~9)}	4
	2.1.2	南海トラフ(IODP 333 および MH21)のデータ ^{10)~15)}	11
	2.1.3	メキシコ湾(IODP 308)のデータ ^{16)~20)}	22
	2.1.4	各地点のせん断強さの比較と模型地盤材料の選定	28
	2.2 施二	L・調査記録に基づく地盤情報の収集と分析	30
	2.2.1	国内大規模海洋土木工事に付随した公開ボーリング調査データ	30
	2.2.2	海洋構造物設計時における土質定数について ¹⁹⁾	37
	2.3 得6	られた土質パラメータ情報に関する統計的性質の分析	38
	2.3.1	対象とする土質パラメータ情報	38
	2.3.2	太平洋における土質パラメータの統計的性質	39
	2.3.3	日本海における土質パラメータの統計的性質	41
	2.3.4	海外における海底地盤材料の統計的性質	47
3	地盤模型	型の設計	48
	3.1 斜面	面崩壊モードの整理	48
	3.2 斜面	面安定解析	52
	3.2.1	斜面安定解析の実施について	52
	3.2.1	斜面安定解析 ^{1)~3)}	52
	3.2.2	解析上における土質定数	55
	3.2.3	解析上における土質定数	58
	3.2.4	解析結果	60
	3.2.1	遠心実験実施時における模型斜面形状	63
4	実験計正	画(案)の作成	66
	4.1 基础	巻実験計画(案)の作成	66
	4.1.1	実験の目的	66
	4.1.2	実験概要	66
	4.1.3	実験の詳細	68
	4.1.4	実験工程表	83
	4.1.5	概算費用	84
	4.2 遠	心振動実験計画(案)の作成	84

	4.2.1	実験の目的	84
	4.2.2	実験の概要	84
	4.2.3	実験工程	86
	4.2.4	概算費用	87
5	おわりに		89
6	参考文南	<i>է</i>	91
7	付録		97

図目次

义	2-1	日本海の調査地点 ¹⁾	5
义	2-2	Site U1422 の地盤調査結果 ²⁾	6
义	2-3	Site U1423 の地盤調査結果 ³⁾	6
义	2-4	Site U1424 の地盤調査結果 ⁴⁾	7
义	2-5	Site U1426 の地盤調査結果 ⁵⁾	7
义	2-6	Site U1427A の地盤調査結果 ⁶⁾	8
义	2-7	Site U1428A と U1429A の地盤調査結果 ⁷⁾	9
义	2-8	Site U1430 の地盤調査結果 ⁸⁾	. 10
义	2-9	粘土中に含まれる植物遺骸の顕微鏡写真の一例 9	. 11
义	2-10	南海トラフ(紀伊半島沖)の調査地点 ¹⁰⁾	. 13
义	2-11	Site C0018 の地盤調査結果 ¹¹⁾	. 14
义	2-12	Site C0011 の地盤調査結果 ¹²⁾	. 15
义	2-13	Site C0012 の地盤調査結果 ¹³⁾	. 16
义	2-14	Site C0018, C0011, C0012 の室内試験結果 ¹⁴⁾	. 18
义	2-15	粒度分布(MH21) ¹⁵⁾	. 18
义	2-16	乾燥密度と土粒子密度(MH21) ¹⁵⁾	. 19
义	2-17	含水比とコンシステンシー (MH21) ¹⁵⁾	. 19
义	2-18	塑性図(MH21)	. 20
义	2-19	細粒分・粘土分含有率と活性度(MH21) ¹⁵⁾	. 20
义	2-20	圧密試験結果(MH21) ¹⁵⁾	. 21
义	2-21	非排水せん断試験の応力経路(MH21) ¹⁵⁾	. 21
义	2-22	非排水せん断強さと強度増加率(MH21) ¹⁵⁾	. 22
义	2-23	メキシコ湾の調査地点 ¹⁶⁾	. 23
义	2-24	Site U1319A の地盤調査結果 ¹⁷⁾	. 24
义	2-25	Site U1320 の地盤調査結果 ¹⁸⁾	. 25
义	2-26	Site U1322 の地盤調査結果 ¹⁹⁾	. 26
义	2-27	Site U1324 の地盤調査結果 ²⁰⁾	. 27
义	2-28	地点毎の非排水せん断強さの比較	. 29
図	2-29	全国港湾内海底地盤の地盤特性(その 1) ⁴⁾	. 32
义	2-30	全国港湾内海底地盤の地盤特性(その 2) ⁴⁾	. 33
义	2-31	大阪湾泉州沖(関西国際空港埋立地)海底地盤の地盤特性 ^{8),9)}	. 34
义	2-32	東京湾羽田沖(東京国際空港 D 滑走路)海底地盤の地盤特性 ¹³⁾	. 36

义	2-33	「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における土粒子密度のヒストグラム ¹⁹
义	2-34	「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における一軸圧縮強さと N 値の関
	係 ¹	9)
义	2-35	IODP による日本周辺における海底地盤のボーリング調査地点 39
义	2-36	太平洋側のボーリング地点における非排水せん断強度と深度の関係40
义	2-37	太平洋側のボーリング地点における密度と深度の関係41
义	2-38	日本海側のボーリング地点における非排水せん断強度と深度の関係44
义	2-39	日本海側のボーリング地点における密度と深度の関係46
义	2-40	C0018の非排水せん断強度の表層(50m 程度)における深度分布47
义	3-1	海底地盤のすべり破壊モード51
义	3-2	斜面分割法の原理 ¹⁾
义	3-3	簡易分割法による細片 i に作用する力 ¹⁾
义	3-4	斜面例
义	3-5	せん断強度低減法の原理 ²⁾
义	3-6	IODP における日本近海のボーリング調査
义	3-7	せん断強度の深度分布例 左: IODP333-C0011 右: IODP346-U1426.57
义	3-8	単位体積重量の深度分布例 左: IODP333-C0011 右: IODP346-U142657
义	3-9	IODP346におけるU1422~U1430の単位体積重量とせん断強度の深度分布
		公西安定留近になけるエデル公西 50
义	3-10	計画女足牌別におけるこうル料面
叉 叉	3-10 3-11	斜面安定解析におけるモデル斜面
図 図 図	3-103-113-12	斜面安定解析におけるモデル斜面
図 図 図 図	3-103-113-123-13	斜面安定解析におけるモデル斜面
<u> 図 図 図 図 図 図</u>	 3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 	斜面安定解析におけるモデル斜面
※ ※ ※ ※	 3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 	料面安定解析におけるモデル斜面
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 3-16	 新面安定解析におけるモデル斜面
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 3-16 3-17	 新面安定解析におけるモデル斜面
	3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 3-16 3-17 3-18	 新面安定解析におけるモデル斜面
	3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 3-16 3-17 3-18 3-19	 新面安定解析におけるモデル斜面
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 3-16 3-17 3-18 3-19 4-1	 計画女定解析におけるモデル斜面
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 3-16 3-17 3-18 3-19 4-1 4-2	 新面安定解析におけるモデル斜面
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 3-16 3-17 3-18 3-19 4-1 4-2 4-3	 料面安定解析におけるモデル斜面
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 3-16 3-17 3-18 3-19 4-1 4-2 4-3 4-4	 新面女定解析におけるモデル斜面
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	3-10 3-11 3-12 3-13 3-14 3-15 3-16 3-17 3-18 3-19 4-1 4-2 4-3 4-4 4-5	 新面安定解析におけるモブル斜面

义	4-7	斜面勾配角度 35 度における斜面安定解析(修正フェレニウス法)	の結果
	例		
义	4-8	斜面安定解析による斜面勾配角度 35 度時における水平震度 kh と	安全率 F
	の関	月係	
义	4-9	模型詳細図	
义	4-10	実験イメージ図	74
义	4-11	実験フロー	
义	4-12	強度測定概要図	
义	4-13	地盤作製方法1概要図	
义	4-14	地盤作製方法2概要図	
义	4-15	マーキング概要図	
义	4-16	実験工程表	
义	4-17	計画上想定を行った遠心振動実験装置の概要	
义	4-18	海底地盤モデル	
义	7-1	a-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 5度	
义	7-2	b-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 15度	
义	7-3	c-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 25度	
义	7-4	d-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 35度	100
义	7-5	e-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 45度	101
义	7-6	f-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 55度	102
义	7-7	a-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 5度	103
义	7-8	b-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 15度	104
义	7-9	c-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 25度	105
义	7-10	d-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 35度	106
义	7-11	e-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 45度	107
义	7-12	f-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 55度	108
义	7-13	A-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 5度	109
义	7-14	B-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 15度	110
义	7-15	C-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 25度	111
义	7-16	D-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 35度	112
义	7-17	E-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 45度	113
义	7-18	F-1 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 55度	114
义	7-19	A-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 5度	115
义	7-20	B-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 15度	116
义	7-21	C-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 25度	117
义	7-22	D-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 35度	118

図 7-23	E-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 45度	119
図 7-24	F-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 55度	
図 7-25	修正フェレニウス法 斜面勾配角度 35度	121
図 7-26	せん断強度低減法 斜面勾配角度 35度	
図 7-27	傾斜台図面	
図 7-28	変位計	
図 7-29	圧力計	125

表目次

表	2-1	収集した文献と地盤データ4
表	2-2	収集した文献と地盤データ ^{1)~18)}
表	2-3	大阪湾泉州沖海底地盤のベーンせん断強度 9
表	2-4	「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における代表的な土の単位体積重
	量 ¹	9)
表	2-5	海底地盤材料の水平,深度方向の相関距離47
表	3-1	修正フェレニウス法 (LEM) および せん断強度低減法 (SRM) パラメー
	タ	
表	4-1	使用施設
表	4-2	遠心模型実験装置の諸元
表	4-3	機材一覧表
表	4-4	土質試験実施項目70
表	4-5	斜面安定解析に用いた仮土質定数71
表	4-6	実験ケース一覧74
表	4-7	画像計測確認事項
表	4-8	実験概算費用の見積結果
表	4-9	概略全体工程
表	4-10	ケースの概略工程

1 はじめに

本事業は、海底地すべり起因の津波を考慮した確率論的津波ハザード評価に資するた めに、海底環境下を模した斜面の地すべり実験などを通じ、斜面安定性に関する既往手 法の適用性を把握する.ここで、斜面安定性解析には、主に陸上での地すべりを対象と した方法が用いられている.海底における地すべり崩壊形状を精度よく把握するには、 海底の土質の強度特性などのパラメータや詳細な地形情報、地盤情報等が必要であるが、 海洋という調査の特殊性や、海底という広大な調査範囲等が制約となり、得られる情報 が限られてくる.さらには、海底特有の環境下(完全水飽和状態、高圧力等)における 斜面の崩壊メカニズム等に関しても明らかになっていないことから、現在用いられてい る斜面安定性評価手法を海底地盤の地震時における安定性の評価へ適用する上での課 題を明らかにし、その検証を行うことが必要である.

その検証に必要な地すべり実験の計画を作成するためには,以下に示す2項目,まず, 海底土質のパラメータが必要となる.次に,その情報を踏まえ,現在用いられている斜 面安定性評価手法の課題を踏まえ,その検証に必要な実験モデルの検討を行うための地 盤模型の設計を行うことが必要となる.

・ 海底土質パラメータの収集・分析

地盤模型の設計

それらの検討を踏まえ、検証に必要な実験の計画(案)および概算の作成を行う.

・ 実験計画(案)の作成

2 海底土質パラメータの収集分析

海底土質パラメータの収集分析は国内外の文献資料を収集し以下の方法により行っ た.ここで、海底土質パラメータとは、海底における斜面の安定評価を実施するため に必要な、強度パラメータと密度パラメータである.また海底の土質に関する情報、 具体的には物理特性(土粒子の密度、粒度、コンシステンシー等)に関する情報も収集 することで、後述する実験計画に用いる地盤材料の選定において参考とする.

文献収集に先立ち,海底の地盤に詳しい国内の研究者を訪問し,聞き取り調査を行った.具体的には山口大学大学院理学研究科 川村喜一郎 准教授,日本大学生産工 学部土木工学科 西尾伸也 教授,国立研究開発法人 海洋研究開発機構(JAMSTEC) 坂口 秀 氏の3名である.

川村准教授より,海底地すべりの地形と地質に関する情報,素因と誘因に関する情報,これまでの研究の流れ,海底土質パラメータを収集するための情報ソース,具体的には IODP プロジェクトの研究成果とその情報入手について貴重な助言をいただいた.

西尾教授には,海底地盤の強度を原位置で測定する方法や,教授が参画したメタン ハードレート関連の研究プロジェクトの研究成果をご紹介いただいた.特に紀伊半島 の南海トラフ付近の海底地盤の物理特性,強度特性に関する貴重なデータを紹介いた だき,地盤工学の観点から海底地盤の特徴について示唆に富んだ意見をいただいた. また海底地すべりを再現するための遠心載荷模型実験について研究に着手されており, その成果についてもご説明いただいた.

坂口氏には,長年潜水艇を活用した深海における海底地盤の調査から得られた貴重 な情報をレクチャーいただいた.海底地盤はガス等が溶け込んだ影響で不飽和状態で あることや原位置測定強度と採取試料から求めた強度の差異,海底地形が頻繁に変動 していること等興味深い知見をご紹介いただいた.さらに海底地すべりによる津波を 評価するための先進的な数値解析手法についてもご紹介いただき,すべり速度が津波 の励起に及ぼす影響について興味深い結果をご紹介いただいた.

2.1 国内外の文献収集と分析

収集データの一覧を表 2-1 に示す. 日本近海では日本海,南海トラフ,比較のため にメキシコ湾のデータも収集した. 表の●はデジタル化したもの,○は文献収集のみ である. 主な情報ソースは,先の聞き取り調査で紹介された IODP (Integrated Ocean Drilling program) によるものである. このプロジェクトは調査箇所ごとに番号が付され ている. 日本海は 346,南海トラフは 333,メキシコ湾は 308 である. また各プロジェ クトでボーリング調査が実施されており,そのボーリング地点の ID 番号も表に併せて 示した. 今回の地盤データが収集された地点は日本海で 8 地点,南海トラフで 4 地点, メキシコ湾で 4 地点である. 陸上のボーリングデータベースと比べると調査密度は低く, 限られたデータを基に今後の検討が行われていることに留意しておく必要がある. また IODP 以外の研究プロジェクト MH21 (メタンハイドレート資源開発研究コンソーシア ム)の成果の一部も収集した.

収集した地盤データは、Shear strength(せん断強さ), Bulk density(湿潤密度), Porosity(間隙率), Particle density (土粒子の密度), Water content (含水比) である. 斜 面の安定評価に直接用いる指標としては、せん断強さと湿潤密度の2つである. ただし 後述する遠心載荷試験に用いる地盤材料を選定するためには、それ以外の物理試験デー タも必要であるため併せて収集した. なおせん断強さは非排水せん断強さ su である. こ れは、採取したコアを船上で半割にして、自動ベーンせん断試験 (AVS) を実施したも のである. また AVS に加えてコーン貫入試験を実施した地点もある. ベーンせん断試 験方法は、十字の形状をした羽(ベーン)を試料に突き刺し、回転させて測定したトル クからせん断強さを求める方法である. 測定は短時間で行うため、非排水状態の強度が 得られること、さらにベーンを突き刺すことができるのは比較的柔らかい粘土に限定さ れることから、軟弱な粘性土を対象とした短期安定強度を求めるための試験方法である. この試験方法が適用できることは、いずれの地点においても強度の違いはあるものの地 盤の堆積物は粘性土が主体であることを意味している. また MH21の非排水せん断強さ は拘束圧を作用させた三軸試験(圧密非排水試験:CU 試験)より得られてものであり、 圧密による強度増加を加味した試験結果であることに留意する必要がある.

3

					0				14/ . 1
	Project	No.	Bo, No.	場所	Snear	Bulk	Poro	Particle	water
					strength	density	sity	density	content
1	IODP	346	U1422	日本海			0	0	0
2	IODP	346	U1423	日本海			0	0	0
3	IODP	346	U1424	日本海			0	0	0
4	IODP	346	U1426	日本海			0	0	0
5	IODP	346	U1427A	日本海			0	0	0
6	IODP	346	U1428A	日本海			0	0	0
7	IODP	346	U1429A	日本海			0	0	0
8	IODP	346	U1430	日本海			0	0	0
9	IODP	333	C0018	太平洋南海トラフ					
10	IODP	333	C0018	太平洋南海トラフ					
11	IODP	333	C0011	太平洋南海トラフ					
12	IODP	333	C0012	太平洋南海トラフ					
17			MH21	太平洋南海トラフ		0	0	0	0
18	IODP	308	U1319	メキシコ湾	0	0	0	0	
19	IODP	308	U1320	メキシコ湾	0	0	0	0	
20	IODP	308	U1321	メキシコ湾					
21	IODP	308	U1322	メキシコ湾	0	0	0	0	
22	IODP	308	U1323	メキシコ湾					
23	IODP	308	U1324	メキシコ湾		0	0	0	
					デジタイズ				
					文献収集	0			

表 2-1 収集した文献と地盤データ

2.1.1 日本海(IODP 346)のデータ^{1)~9)}

ここからは、収集したデータを示すものとする.まず日本海のデータ(IODP 346)につ いて示す.U1422~U1430のボーリング地点を図 2-1 に示す.北は北海道の西側から南 は九州の西側にいたる合計 8 地点で調査が行われている.各地点の調査結果を図 2-2~ 図 2-8 に示す.日本海では有機物を含む粘性土が主体である.図 2-9 に粘土中に含ま れる植物遺骸(珪藻:Diatom)の顕微鏡写真の一例を示す.珪藻は写真にあるように多 孔質であり、軽量であることが特徴である.この珪藻を粘土中に多く含むことにより土 粒子の密度は小さくなる.一般的な沖積粘土の土粒子の密度は 2.5~2.75 g/cm³である. 海底地盤の土粒子密度は 2.4~2.7g/cm³で珪藻を含む箇所が局所的に低い値を示すもの の、概ね沖積粘性土に近い値を示している.含水比は沖積粘性土の測定結果は 50~80% と言われている.U1422~1426および1430では概ねこの範囲内であるが、U1427~U1429 の含水比は 40%以下の含水比であり低めの値を示した.

一般的な沖積粘土の湿潤密度は1.5~1.8g/cm³であるが,日本海のそれは1.4~1.8g/cm³ 程度であり,沖積粘性土と概ね近い値を示した. 非排水せん断強さについては,強度の深度方向分布形状は直線分布に近いことがわか る.また非排水せん断強さの大きさについて考察する.海底下 100m における非排水せ ん断強さは 40~60kPa (kN/m²)程度である.一方,日本の沖積粘性土の強度増加率 (su/p²) は約 0.3 であることが知られている.日本海の粘土も同等の強度増加率を示すと仮定す れば,調査結果の湿潤密度の代表値を 1.5 g/cm³ とすれば,水中単位体積重量 γ' は 5kN/m³ となる. 100m 位置における有効土被り $E p' = \sigma' = 500$ kN/m² となる.これに強度増加率 0.3を掛けると非排水せん断強さ suは 150kN/m² となる.この差異が生じた原因としては, 海底地盤そのもの強度特性を反映している,あるいは,サンプリングによる応力解放や 試験開始まで試料運搬や整形(半割)の乱れによるもの,の2 つが考えれれるが,後者 の乱れの影響が大きいものと推定される.したがって,調査結果をそのまま今後の検討 に用いると、非排水せん断強さを過小に見積もる恐れがあり、模型地盤作製では調査結 果の強度をそのまま再現できない可能性もある.



図 2-1 日本海の調査地点¹⁾



Figure F35. Discrete bulk density, grain density, porosity, water content, and shear strength. Site U1422.



Figure F35. Discrete bulk density, grain density, porosity, water content, and shear strength. Site U1423. Dashed horizontal lines = lithologic subunit boundaries, solid horizontal line = lithologic Unit I/II boundary.







Figure F39. Discrete bulk density, grain density, porosity, water content, and shear strength. Site U1424. Solid symbols – measurements in dark layers. Lowest dotted line – potential hiatus in lithiologic Subunit IIIi.



Figure F44. Discrete bulk density, grain density, potosity, water content, and shear strength, Site U1426. Dashed horizontal line = lithologic subsmit boundary, solid horizontal line = lithologic unit boundary.



図 2-5 Site U1426 の地盤調査結果⁵⁾



Figure F48. Discrete bulk density, grain density, porosity, water content, and shear strength, Hole U1427A. Shaded blue areas indicate clay-rich sediment interval and remains are biogenic component-rich sediment intervals.

図 2-6 Site U1427A の地盤調査結果⁶⁾



Figure F52. Discrete bulk density, grain density, porosity, water content, and shear strength, Hole U1428A. Solid horizontal line = lithologic Unit A/B boundary.

Figure F53. Discrete bulk density, grain density, porosity, water content, and shear strength, Hole U1429A. Solid horizontal line = lithologic Unit A/B boundary.



図 2-7 Site U1428A と U1429A の地盤調査結果 ⁷⁾



Figure F45. Discrete bulk density, grain density, porosity, water content, and shear strength, Site U1430. Dashed horizontal lines = lithologic subunit boundaries, solid horizontal lines = lithologic unit boundaries.



Figure F19. Diatom Anachmodiscus spp. (Sample 346-U1422C-31H-CC).



図 2-9 粘土中に含まれる植物遺骸の顕微鏡写真の一例 9)

2.1.2 南海トラフ(IODP 333 および MH21)のデータ ^{10)~15)}

南海トラフ(紀伊半島沖)のデータ(IODP 333)について示す. C0018, C0011, C0012 ボーリング地点を図 2-10 に示す. 各地点の調査結果を図 2-11~図 2-13 に示す. 一般 的な沖積粘土の土粒子の密度は 2.5~2.75 g/cm³である.海底地盤の土粒子密度は 2.4~ 2.8g/cm³とかなりばらついていることがわかるが,沖積粘性土によりも若干広い範囲に 分布している.

一般的な沖積粘土の湿潤密度は 1.5~1.8g/cm³ であるが、南海トラフのそれは 1.4~
2.1g/cm³程度である. 200m前後までの浅い部分では 1.4~1.8g/cm³程度であり、沖積粘
性土と概ね近い値を示した.

非排水せん断強さの深度方向分布形状は,深度の増加とともに増加するが,比較的浅 い位置における増加割合が大きくなる非線形な挙動を示すことが特徴である.また非排 水せん断強さの大きさは,海底下 100m における非排水せん断強さは 50~200kPa (kN/m²)程度である.この値は先に述べた日本海のデータと比べると最大値で見ると 3 倍以上になっている.この差異が生じた原因は,粘土の材料の違いと粘土が受けた応力 履歴が影響しているものと思われる.

図 2-14 に室内試験結果を示す. 図より粒度分布に着目すると,細粒分がほぼ 100% であり粘性土であるが,細粒分の内訳を見ると,粒径が大きいシルト分がその半分を占めていることがわかる. すなわち粒度分布より比較的粒径が大きい粘性土であるといえる. また,過圧密比 (Overconsolidation ratio)が1を超える範囲が表層を中心に存在していることがわかる. これは過去にこの層のさらに上部に堆積層が存在し,何らかのイベントでその層が移動したことを裏付けるものである. この過圧密履歴により土のせん断強度が大きくなったものと考えられる.

この傾向は、MH21 プロジェクトで得られた試験結果にも現れている. 図 2-15 の粒 度分布より粘土分(粒径 5mm 以下)は40~70%であり、IODP のデータと類似している. また図 2-17 の含水比と塑性指数をもとに、液性限界 w_Lと塑性指数 I_Pを読み取り塑性図 による分類を行った. 図 2-18 に塑性図を示す. 図よりこの細粒土は CL(粘土低液性限 界)に分類されることがわかる. すなわち、粒径としては粘土にはなるものの、液体状 になる含水比は小さいため、ぱさぱさとして砂に近い性状を示すことがわかる. 一方、 後述する東京湾や大阪湾の粘土は CH(粘土高液性限界)に分類され、より含水が多い 粘土である. また、粘土の活性度を図 2-19 に示す. ここで活性度は I_pを 2µm 以下の 粘土分含有率(%)で除した量で定義され、粘性土の活性を表す指標である. 活性度が 0.75 未満は非活性粘土といわれる.この地点の粘土は 0.5~1.0 の範囲のあり,非活性粘土に相当するデータが多数を占めている.活性が高い粘土は,他の物質を吸着し,化学的に結合する傾向が強い粘土である.この地点の粘土は非活性であるため,サラサラとして砂に近いような性状を示す粘土であることが推定される.

図 2-20 には圧密試験結果を示す. 圧密降伏応力 pc が有効土被り圧(図中の直線)を 超えていることから,過圧密状態にあり, IODP のデータと同様の傾向を示している. 図 2-21 には非排水せん断試験における有効応力経路を示す. 有効応力経路は破壊線に 沿って有効応力が上昇する(応力点が右側に移動する)膨張傾向を示す. これは過圧密 粘土や密な砂が示す挙動に類似している.

図 2-22 には非排水せん断強さと強度増加率 (*s*_u/*p*)を示す.非排水せん断強さは IODP333 のデータと同様に表層部の強度増加割合が高く,非線形性を示すことがわかる. これを反映するように,表層部の強度増加率が1を超えて最大4強程度と過圧密の影響 を強く受けていることがわかる.また,それより深い部分の強度増加率は0.5程度であ り,一般的な日本の粘性土の0.3よりも大きめの値をとることが特徴である.

Figure FL Bathymetric map, with 2-D MCS profile locations. NanTroSEEE Stage 1 and 2 drill sites (white circles), and Expedition 333 drill sites (red circles). White barbed line = position of deformation front of accretionary prim, yellow arrow = estimated far-field vectors between Philippine Sea plate and Japan (Seno et al. 1993; Heki, 2007).



図 2-10 南海トラフ(紀伊半島沖)の調査地点¹⁰⁾



Figure F31. Site C0018 bulk density, porosity, and grain density from discrete MAD samples. Blue = mud and silt samples, red = observed sand or ash samples, gray shading = mass transport deposit (MTD) 6.

Figure F32. Strength measured with a pocket penetrometer and a varie shear device, Hole C00018A. Gray shading = mass transport deposit (MTD) 6.



図 2-11 Site C0018 の地盤調査結果¹¹⁾

Figure F31. Bulk density, porosity, and grain density data, Site C0011. Red = noted sand or ash samples, filled symbols = Hole C0011C/C0011D, open symbols = Expedition 322 Hole C0011B.



Figure F33, Penetrometer and vane shear measurements from Site CO011 plotted with porosity from MAD measurements and lithologic units.



図 2-12 Site C0011 の地盤調査結果¹²⁾





Figure F36. Strength provided by penetrometer and varie shear measurements from Site C0012 plotted with porosity from MAD measurements.



図 2-13 Site C0012 の地盤調査結果¹³⁾





Figure F6. Iterality of CRS consolidation, methylene blue, and grain size measurements, Site C0011. A. Permeability at initial poinsity (ii₀). B. Compression index (C₁): C. Overconsolidation ratio: D. Specific surface (S₀). E. Median grain diameter (D₁₀). F. Sand, silt, and clay mass fractions.



次ページに続く



Figure F7. Results of CRS consolidation, methylene blue, and grain size measurements, Site C0012. A. Permeability at initial porosity (k_0). B. Compression index (C_a). C. Overconsolidation ratio. D. Specific surface (S_b). E. Median grain diameter (D_{50}). F. Sand, silt, and clay mass fractions.

図 2-14 Site C0018, C0011, C0012の室内試験結果¹⁴⁾





図 2-16 乾燥密度と土粒子密度(MH21)¹⁵⁾



図 2-17 含水比とコンシステンシー (MH21)¹⁵⁾



図 2-19 細粒分・粘土分含有率と活性度(MH21)¹⁵⁾



図-7 圧密試験から求めた(a)圧縮指数と(b) $\Delta e/e_0$

図 2-20 圧密試験結果(MH21)¹⁵⁾



図 2-21 非排水せん断試験の応力経路(MH21)¹⁵⁾



2.1.3 メキシコ湾(IODP 308)のデータ^{16)~20)}

メキシコ湾のデータ(IODP 308)について示す. U1319~U1324のボーリング地点を図 2-23 に示す. 各地点の調査結果を図 2-24~図 2-27 に示す. 一般的な沖積粘土の土粒子 の密度は 2.5~2.75 g/cm³ である. 海底地盤の土粒子密度は 2.7g/cm³前後であり概ね沖積 粘性土に近い値を示している.

一般的な沖積粘土の湿潤密度は 1.5~1.8g/cm³ であるが、メキシコ湾のそれは 1.4~
2.1g/cm³程度である. 100m前後までの浅い部分では 1.4~1.8g/cm³程度であり、沖積粘
性土と概ね近い値を示した.

非排水せん断強さの深度方向分布形状は日本海と同様に直線分布に近いことがわかる.また非排水せん断強さの大きさについて考察する.海底下100mにおける非排水せん断強さは日本海と同様に40~60kPa (kN/m²)程度である.さらにメキシコ湾のデータには残留状態の非排水せん断強さおよびピーク強度が併記されている.ピーク強度を残

留強度で除した鋭敏比も示させているが, 鋭敏比は概ね4以上の値を示し鋭敏であるこ とが特徴である.したがって, 海底地盤は建設機械の走行や地震等の外乱により強度低 下を引き起こし不安定化しやすい粘土であることがわかる.



IODP Expedition 308 Site Map

図 2-23 メキシコ湾の調査地点 16)



Figure F34. (A) flatk density from moisture and density (MAD), multisensor back (MST), and measurement while didling (MWD). (B) grain density, and 9.5 pomsity, along with lithestratigraphic units and setumic peffectors (SE = seafford).

Figure E37. (A) Peak and residual undrained shear strength from vane shear texts. (B) peak undrained shear strengths measured using the vane and pecket peretrometer, and (C) sensitivity (peak/residual undrained shear strength), along with lithoetratigraphic units and seismic seffectors (SE+seafloor).



図 2-24 Site U1319A の地盤調査結果¹⁷⁾
Figure F27. (A) Bulk density from mentione and density (MAD), multisemore track (MST), and menurement while drilling (MWD); (B) grain density; (C) portodly and P-wave velocity from the MST suppermost 20 m only, probably due to voids and cracks), along with lithostiat[graphic annual and seismic reflection (SF) scaffood).



Figure FRL (A) Peak and estidual undialized shear strength from yare shear tosts, (B) peak undialized shear strengths measured using the vare and the perchet penetrometers, and (C) semimetry (peak/residual undralized shear strength), along with lithostratigraphic units and seismic reflection (SE = scafform).



図 2-25 Site U1320 の地盤調査結果¹⁸⁾

Figure F34. A. Bulk density determined from moisture and density (MAD), multisensor track (MST), and measurement while drilling (MWD: image derived density [IDRO]). B. Grain density from MAD measurements. C. Porosity from MAD measurements and also calculated from IDRO assuming a constant grain density of 2.7 g/cm³ and a pore water density of 1.024 g/cm³. Yellow = mass transport deposits (see "Lithostratigraphy"). Bithostratigraphic units and seismic reflectors (SF = scaffoor) are also shown.



Figure F39, (A) Peak and residual undramed shear strength from varie shear tests, (B) comparisons of peak andrained shear strengths increased by varie and peak and residual undrained shear strength using AVS). Vellow = mass transport deposits over "Lithootratigraphy"), lithootratigraphic units and securic reflectors (AF = scalinor) are also shown.



図 2-26 Site U1322 の地盤調査結果¹⁹⁾

Egure F34. A. Ilulk density determined from gamma ray attenuation (GRA) on amplit cores and from mnintane and density (MAD) measurements on discrete samples. Image-density (DRD) from logging-while-shilling (LWD) data are overlain for comparison. B. Grain density profile determined from MAD measurements. C. Porosity obtained from MAD measurements and pensity calculated from IDRO density assuming a constant grain density of 2.7 g/cm³ and a pore water density of 1.024 g/cm³. Yellow = mass transport depositie tree "Lithostratigraphy"). SF = seafloor.



Hgune F39: A. Ivok and residual undrained shear strength from vane shear tests. B. Comparison of the peak undrained shear strengths measured by the shear vane and the peaket penetroinetes. C. Sensitivity. Seismic reflection (SE = walloor; see "Background and objectives") are shown. Vellow = main transport deposits.



図 2-27 Site U1324 の地盤調査結果²⁰⁾

2.1.4 各地点のせん断強さの比較と模型地盤材料の選定

日本海,南海トラフ(紀伊半島沖)およびメキシコ湾の非排水せん断強さを比較した 結果を図 2-28 に示す. 図より,日本海(U1422)とメキシコ湾(U1342)の粘土は直線 的な分布形状であり,その大きさもほぼ等しいことがわかる.一方,南海トラフ(C0012) は非線形な分布形状を示し,強度は約3倍以上大きいことがわかる.また同じ南海トラ フでもC0012とMH21を比較するとMH21が2倍程度大きくなっていることがわかる. 両者がほぼ同じ粘土であるとするならば,この強度差が生じた原因はせん断強度の求め 方の差により生じたものと考えられる.すなわち,MH21は原位置の有効拘束圧で圧密 した試料について三軸試験により求めている.したがって,試料を再圧縮することでサ ンプリングによる乱れの影響が小さくなったために強度が大きくなったものと思われ る.

以上より,模型地盤作製に用いる地盤材料としては,南海トラフの粘土は物性および 上載圧(過圧密)履歴から判断するとかなり特殊な粘土であり強度も高く模型で再現す ることが難しいため,日本海の粘土のような物理,強度特性を持つ粘性土を選定し,深 さ方向に比例的に強度が増加するような地盤を作製することが望ましいものと考えら れる.一方で,強度の大きさについては,サンプリングの乱れの影響や粘土自体が不飽 和状態であることを加味すると強度の絶対値を明確に規定することは現段階では困難 である.従って,入手が容易にできる海底粘土またはそれに準ずる物理特性を有する粘 土を用いて深度に比例して強度増加するような地盤を作製することが望ましい.

28



図 2-28 地点毎の非排水せん断強さの比較

2.2 施工・調査記録に基づく地盤情報の収集と分析

港湾施設や沖合空港事業など国内臨海部における大規模開発プロジェクト実施時に 実施された地盤調査の内,国立研究開発法人港湾空港技術研究所や国土交通省関東地方 整備局等によって公開された情報について調査を行い日本国内臨海部の地盤の情報に ついて整理した.

2.2.1 国内大規模海洋土木工事に付随した公開ボーリング調査データ

国土交通省(旧運輸省)所管の大規模海洋土木工事については,設計あるいは施工管 理段階で実施された海底地盤ボーリング調査について国立研究開発法人港湾空港技術 研究所あるいは所轄の地方整備局技術調査事務所にて学術的・工学的にデータが分析さ れ,論文あるいは報告書で公開されている.データが公開されている報告書は表 2-2 の通りである^{注1)}.内容について大別すると1)海底ボーリングマシンの機材開発に伴う 研究報告^{1),2},2)国土交通省所管の港湾施設の港湾内の土質の概略^{3)~6)},3)大阪湾(関 西国際空港開発)^{7)~10)},4)知多半島沖(中部国際空港開発)¹²⁾,5)東京湾(羽田国際 空港開発)^{13)~18)}である.ここでは,全国港湾内地盤の傾向および大阪湾,東京湾(羽 田)の海底地盤の土質傾向について示す.なお,中部国際空港開発に伴う海底地盤調査 結果の資料については,地形・地質(理学)を取りまとめた資料のみの入手であったこ とから今回の調査ではまとめていない^{注2)}.

注 1):この他, 土木学会や地盤工学会等の学会年次大会にて報告されているものも散 見されるがまとまった資料としては, 港湾空港技術研究所が報告しているものが主とな る.

注 2):海上空港建設の他にも港湾における沖合防波堤・防潮堤築造時に実施されたボ ーリングデータ等も一部公開されているが,設計に必要な N 値の把握のみに主眼を置 いているなどし,今回の整理とそぐわないデータが多かった為除外している.

30

		タイトル	著者			内容
1	その他1	大水深におけるボーリングおよびサンプリングの現状 (第2報) 一海底着座型,不攪乱試料自動採取装置について	松本一明, 堀江宏保, 小川富美子, 小林茂雄	港湾空港技術研究所 資料 0295	1978年6月	大水深海底地盤の ボーリング,サンプリン グ技術の紹介
2	その他2	海底着座型長尺サンブル採取装置(MAS-76)の 開発について	松本一明, 堀江宏保, 小川富美子, 小林茂雄	港湾空港技術研究所 資料 0306	1978年9月	大水深海底地盤の ボーリング,サンプリン グ技術の開発
3	全国港湾1	港湾地域における土の工学的諸係数の相関性につ いて(第1報)	松本一明,小川富美子	港湾空港技術研究所 資料 0071	1969年6月	日本全国の港湾内の 土質特性(一次的性質 について)
4	全国港湾2	港湾地域における土の工学的諸係数の相関性	小川富美子,松本一明	港湾空港技術研究所 報告 017-03-01	1978年9月	日本全国の港湾内の 土質特性(一次的性質 について)
5	全国港湾3	土質調査結果に及ぼす人為的要因の影響	土田孝, 小林正樹, 菊 池喜昭	港湾空港技術研究所 資料 0546	1986年3月	日本全国の港湾内の 土質特性(一次的性質 について)
6	全国港湾4	地盤の調査方法が沿岸域に分布する土の物性評価 に与える影響の研究	田中政典	港湾空港技術研究所 資料 1068	2003年12月	日本全国の港湾内の 土質特性(一次的性質 について)
7	大阪湾1	大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質(その1) ボーリング及びサンプリング	堀江宏保, 善功企, 石 井一郎, 松本一明	港湾空港技術研究所 資料 0498-01	1984年9月	大阪湾粘土の特性そ の1, サンプリング方法 等
8	大阪湾2	大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質(その2) 物理的性質・圧密特性・透水性	石井一郎, 小川富美 子, 善功企	港湾空港技術研究所 資料 0498-02	1984年9月	大阪湾粘土の特性そ の2,物理的性質,圧密 特性,透水性
9	大阪湾3	大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質(その3) 静的せん断特性	土田孝, 菊池喜昭, 中 島謙二郎, 小林正樹	港湾空港技術研究所 資料 0498-03	1984年9月	大阪湾粘土の特性そ の3,静的強度試験
10	大阪湾4	大阪湾洪積粘土の構造の評価と力学特性	土田孝, 渡部要一, 姜 敏秀	港湾空港技術研究所 報告 041-02-03	2006年6月	大阪湾粘土の特性
11	川崎湾1	海底地盤の剛性率に関する現地および室内実験	M. Badiey, 善功企, 山﨑浩之, 鈴木英男	港湾空港技術研究所 報告 029-04-01	1990年12月	川崎港粘土の強度特 性
12	名古屋1	「中部国際空港」海域(知多半島常滑市沖)の海底地 形・地質	豊蔵勇・岡田篤正・牧 野内猛・堀川義夫・長 谷川淳	地学雑誌 Vol. 108 (1999) No. 5 P 589-615	1999年11月	知多半島沖海底地質 の特性 (地形・地質について)
13	東京湾1	東京国際空港D滑走路の事前海底地盤調査結果に 関する一考察	渡部要一,田中政典, 佐々真志,野口孝俊, 宮田正史	港湾空港技術研究所 報告 048-02-05	2009年6月	東京湾粘土の特性
14	東京湾2	信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地 盤定数設定法の提案	渡部要一,田中政典, 佐々真志,菊池喜昭	港湾空港技術研究所 報告 048-02-06	2009年6月	東京湾粘土の特性
15	東京湾3	東京国際空港(羽田空港) 建設技術報告会(第四 回)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〜	野口孝俊,河村健輔, 井上 憲,川端利和,堺 谷常廣	国土交通省関東地方 整備局東京空港整備 事務所 東京国際空港建設技 術報告会(第四回)技 術報告集	2007年12月	東京湾粘土の特性
16	東京湾4	東京国際空港(羽田空港) 建設技術報告会(第四 回)羽田空港D滑走路 埋立部の圧密沈下~感度分 析を踏まえた沈下予測~	河村健輔, 三木隆之, 澤資浩, 勝山克二, 水 野健太, 田代聡一	国土交通省関東地方 整備局東京空港整備 事務所 東京国際空港建設技 術報告会(第四回)技 術報告集	2007年12月	東京湾粘土の特性
17	東京湾5	羽田空港D滑走路の設計	野口 孝俊, 渡部 要一, 鈴木 弘之, 堺谷 常廣, 梯 浩一郎, 小倉 勝利, 水野 健太	 土木学会論文集C(地 圏工学)Vol. 68 (2012) No. 1 P 150-162	2012年1月	東京湾粘土の特性
18	東京湾6	羽田空港D滑走路埋立部の施工と維持管理	野口孝俊, 渡部要一, 鈴木弘之, 奥信幸, 大 和屋隆司, 渡邊雅哉	土木学会論文集C(地 圏工学)Vol. 68 (2012) No. 2 P 305-320	2012年5月	東京湾粘土の特性

表 2-2 収集した文献と地盤データ 1)~18)

全国港湾内地盤の土質 3)~6)

国立研究開発法人港湾空港技術研究所(小川・松本)による 2150 本を超える国土交 通省所管港湾の港湾内海底地盤のボーリング調査結果より図 2-29,図 2-30 に示す三角 座標による分類や塑性図による分類ならびに一軸試験結果をまとめると,国内における 国土交通省所管の港湾内海底地盤は一般的に以下のような定数・特性を持つ.

・試料の多くが沖積層の粘性土であり、粘土分やシルト分など細粒分含有率が 50%を 超えるものが多く、粘性土やシルトに分類される.

・試料のほとんどが A 線を中心に両方に分布しており,高液性限界である CH や MH に該当するものが多く,高い液性限界を持つ試料が多い.

・比重の平均は 2.686 である. 極端に低いものについては, 有機質土が多いケースである.

・単位体積重量(湿潤密度)の平均値は 1.6g/cm³であり, 1.55~1.65 g/cm³の範囲のものが相当数占める.また, 1.35~1.40 g/cm³は港湾地域特有の軟弱粘性土である.

・一軸圧縮強度 qu は最大 380kN/m²程度であるが,おおよそ 10kN/m²~200kN/m²の範囲 の強度を持ち,その大半が 20~100kN/m²の範囲となる.なお,20kN/m²以下の場合,軟 弱粘性土に分類される.以上の知見は,国内の海洋土木工事実施にあたり施設設計時に おいて,沖積粘土としての一般的な特徴例という扱いになっている.







大阪湾海底地盤の土質 7)~10)

関西国際空港設置のため大阪湾泉州沖では大規模な地盤調査が実施されており,採取 された土試料は,国立研究開発法人港湾空港技術研究所によって各種土質試験(物理試 験ならびに力学試験)が実施されている(図 2-31,表 2-3).各種土質試験結果をまと めると以下のような定数・特性を持つ. ・試料は粘土分やシルト分など細粒分含有率が 50%を超えるものばかりであり粘性土 に分類される.なお,試料は沖積層と洪積層から採取されたものである.

・試料のほとんどがA線近傍上部に分布しており、高液性限界であるCHに該当する.

・比重の平均は2.715 であり、頻度としては2.68~2.74 が高い値を示す.

・ベーンせん断試験によるせん断強度は、ボーリングコアの乱さない試料に対しては、 概ね 10~30kN/m²であり、最大でも 70 kN/m²以下となっている.また、ベーンせん断 強度より計算される一軸圧縮強度 q_u は、おおよそ 20kN/m²~60kN/m²の範囲である.



図 2-31 大阪湾泉州沖(関西国際空港埋立地)海底地盤の地盤特性^{8),9)}

表 2-3 大阪湾泉州沖海底地盤のベーンせん断強度⁹⁾

Borin	e No.	56	-	9		n -	28	67	-	1	57	- 30
Bamp	1z No.	T - 7	T - 13	T - IT	T = 4	7 = 52	T - 10	T - 3	T - 4	7 - 12	T - 4	T - 16
せ み 断	見まない状態	0, 167	4.110	0. 377	0.374	0. 273	6, 474	8.001	8. 153	4.141	0.079	0, 299
98 12 (kgt.4:m ²)	K L K H B	0.010	4. 012	a 010	-	0. 029	-	0. 009	6. 911	0, 012	8, 907	8.016
	и д	18.7	16. 1	14. N		12.7	-	10. 1	13. 9	21.8	11, 3	38.2

東京湾内海底地盤の土質 13)~18)

関西国際空港設置同様に東京国際空港D滑走路築造にあたり東京湾羽田沖にて大規 模な海底地盤調査が実施されており,採取された土試料は,国立研究開発法人港湾空港 技術研究所によって各種土質試験(物理試験ならびに力学試験)が実施されている(図 2-32).各種土質試験結果をまとめると以下のような定数・特性を持つ.

・海底面から A.P.-35m 前後までに分布する軟弱正規圧密粘土は、塑性指数 I_p が 80 前後 であり、粗粒分を含まず均質である.この層の非排水せん断強さ c_u は深度方向に増加 傾向を示すが 50kN/m²以下となっている.

・A.P.-35m 前後から-60m 前後に分布する層の試料は粗粒分含有率が高いため塑性指数
 *I_p*が15と低い.一方,この層の非排水せん断強さ*c_u*は,A.P.-35m までの層同様に深度
 方向に増加傾向を示すがおおよそ100kN/m²程度となる.

・A.P.-60m 前後から-75m 前後に分布する層の試料は砂礫,粘性土,砂質土の互層地盤 であり,N値が 50以上の箇所も随所にみられる.粘土部分の力学特性は,A.P.-60m 前 後から-75m 前後と同様である.

・A.P.-75m 以深では,N値が 50位上の連続した層が存在するようになり,中~大規模施設の支持基盤となりうる.

35



図 2-32 東京湾羽田沖(東京国際空港 D 滑走路)海底地盤の地盤特性¹³⁾ まとめ

日本全国の港湾施設および二大都市圏における海上空港建設時における地盤調査結 果より日本における臨海部・海洋土木事業における海底地盤の土質定数は、おおよそ以 下のようにまとめることができる.

- ・ 土質分類:細粒分を多く含む粘性土(海性粘土)
- ・単位体積重量:14~16kN/m³
- ・塑性指数:粘性土の場合, 50~150 程度

・せん断強度(一軸圧縮強さ): q_u=100kN/m²以下(ただし,海底面から浅い部分)

2.2.2 海洋構造物設計時における土質定数について¹⁹⁾

港湾施設など臨海部における構造物築造時の設計の基準となる港湾の施設の技術上の基準・同解説中における設計上の土粒子密度や単位体積重量, せん断強度について図 2-33, 図 2-34, 表 2-4 に示す. これらのデータは設計上の目安として頻繁に使われている.



図 2-33 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における土粒子密度のヒストグラム¹⁹⁾



図 2-34「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における一軸圧縮強さと N 値の関係¹⁹⁾

表 2-4 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における代表的な:	上の単位体積重量 ¹⁹	1)
-----------------------------------	------------------------	----

	沖積粘性土	洪積粘性土	砂質土
湿潤単位体積重量 ជ (kN/m³)	12~16	16~20	16~20
乾燥単位体積重量 浴 (kN/m³)	5~14	11~14	12~18
含水比 w(%)	150~30	60~20	30~10

2.3 得られた土質パラメータ情報に関する統計的性質の分析

2.3.1 対象とする土質パラメータ情報

ここでは、2.1節で報告された国際深海科学掘削計画(IODP)に基づいて実施された太 平洋側および日本海側のボーリング調査により得られたデータのうち、地盤の安定解析 に必要な非排水せん断強さと深度の関係、湿潤密度(Bulk density)と深度の関係を対象と する.

太平洋および日本海におけるボーリング位置は図 2-35 に示す通りである. 図に示す

ように太平洋側では,紀伊半島沖で C0011, C0012 および C0018 の 3 地点,日本海側では北海道の西部に位置する U1422 から九州沖の U1428, U1428 までの 8 地点を対象とする.

非排水せん断強さ Su と密度 ρ_t と深さ(Z)の平均的な関係はデータに基づき次式により回帰を実施し、その係数を決定する.ここで、非排水せん断強さ Su と深さ(Z)の関係は表面でゼロとなる深さの指数関数として、鴫原ら¹⁾の定式化を用いる.密度 ρ_t と深さ(Z)の関係は、地盤材料は表面近傍でも一定の密度を有することから、以下の深さとともに直線で変化する関数としてモデル化を行う.

$S_u = a \cdot Z^b$	(2.1)

$$\rho_t = a + b \cdot Z \tag{2.2}$$

また、その平均的な関係と深度毎の際を求め、非排水せん断強さ Su および密度 ρ_t の標準偏差を統計量として求める.



a)太平洋側

b)日本海側

図 2-35 IODP による日本周辺における海底地盤のボーリング調査地点 (図 2-10, 図 2-1 を再掲)

2.3.2 太平洋における土質パラメータの統計的性質

まず,各地点で得られた非排水せん断強度と深度の関係を図 2-36 に示す.各地点の 図中に非排水せん断強度と深度の関係式および,それに対する非排水せん断強度の標準 偏差を示す.各地点の標準偏差は38.4kPaから52.2kPaとかなりばらつきが大きいこと が分かる.また,非排水せん断強度と深度の関係式は地点により大きく異なっているこ とも分かる.

次に,各地点で得られた密度と深度の関係を図 2-37 に示す.非排水せん断強度と同様に各地点の図中に密度と深度の関係式および,それに対する密度の標準偏差を示す. 各地点の標準偏差は 0.066 g/cm³から 0.076g/cm³とかなりばらつきが小さいことが分かる.また,地表面における密度は,1.45 から 1.596g/cm³と多少の幅があるものの,地表における平均的沖積粘土の密度と大きな差異はないことが分かる.



図 2-36 太平洋側のボーリング地点における非排水せん断強度と深度の関係



図 2-37 太平洋側のボーリング地点における密度と深度の関係

2.3.3 日本海における土質パラメータの統計的性質

まず,各地点で得られた非排水せん断強度と深度の関係を図 2-38 に示す.各地点の 図中に非排水せん断強度と深度の関係式および,それに対する非排水せん断強度の標準 偏差を示す.ここで,U1428 地点については150m 以深の強度がそれより上と大きく異 なっているため,分析対象より除いた.各地点の標準偏差は全体としてみると 5.99Pa から33.0kPa とかなりばらつきの幅が地点によって異なっていることが分かる.しかし, 全地点の比較の図 2.3-4 a)より 50m 以浅では地点による差異やばらつきが小さいことも 分かる.また,非排水せん断強度と深度の関係式において,非排水せん断強度の深度依 存性,つまり深度のべき乗の数字は太平洋側に比べて大きく,表層部分の強度特性は深 度変化が大きいことを示している.

次に,各地点で得られた密度と深度の関係を図 2-39 に示す.非排水せん断強度と同様に各地点の図中に密度と深度の関係式および,それに対する密度の標準偏差を示す. 各地点の標準偏差は0.0686 g/cm³から0.102g/cm³であり,ばらつきは太平洋側より大きいもののその大きさは小さいことが分かる.また,地表面における密度は,1.334 g/cm³から1.631 g/cm³と太平洋側より変化の幅が大きいものの,地表における平均的沖積粘土の密度と大きな差異はないことが分かる.



次のページに続く



図 2-38 日本海側のボーリング地点における非排水せん断強度と深度の関係



次のページに続く



図 2-39 日本海側のボーリング地点における密度と深度の関係

2.3.4 海外における海底地盤材料の統計的性質

ここでは、海底地盤材料の統計的性質のうち強度特性に関する水平方法、深度方法の 空間分布に関する性質として、相関距離について北海などの海底地盤における支持力の 確認のために実施されたコーン貫入試験に基づく文献 2)に示された結果を表 2-5 に示 す.水平方向には数十m間隔で揺らいでおり、鉛直方向には数m単位で揺らいでいる ことが分かる.

2.3.2 に示した日本周辺における海底地盤のボーリングデータのうち,深度方向に数 m 間隔でデータが得られている太平洋側の C0018 ポイントの表層 50m の非排水せん断強 度の深度分布を図 2-40 に示す.表 2-5 のメキシコ湾における海底粘土の鉛直方向の相 関距離と同様に数 m 間隔で揺らいでいることが分かる.データの深度間隔がこのデー タでも荒いため,空間相関距離を精度よく求めることは困難と考えられる.

表 2-5 海底地盤材料の水平,深度方向の相関距離

土質	方向	相関距離(m)
海底土	水平	30
海底砂	水平	14~38
メキシコ粘土	鉛直	1



図 2-40 C0018 の非排水せん断強度の表層(50m 程度)における深度分布

3 地盤模型の設計

海底のような拘束圧下での構造物の挙動や,地盤の不安定化現象を把握する方法とし て遠心実験は現地観測に制限が伴う地震時の海底斜面の崩壊メカニズム等をとらえる に有効な手段と考えられる.ここでは,遠心力模型実験用の地盤模型の設計を行う.ま ず,実験にて明らかにするべき海底地盤の安定解析法の課題を明らかにするための「斜 面崩壊モードの整理」を実施し,次に,その検討に必要な実験地盤模型としてのモデル に関する材料特性について遠心場を考慮した設計を行う.

3.1 斜面崩壊モードの整理

海底地盤の地すべりやそれに起因した津波のモデル化,さらにそのハザードおよびそ れに対するリスク評価を行うため,海底地すべり関係の科学者の集まりである IUGS(the International Union of Geological Science)と UNESCO(United Nations Educational, Scientific and Culture Organization) は2つの国際地球科学プログラム(IGCP-585, IGCP-511)を まとめ,活動を実施している.そこで2年おきに実施されている国際会議のうち2011 年(第5回)および2013年(第6回)に開催された会議の講演論文集を主対象とし,海底地 質に関する論文集と合わせて調査を実施した.

従来,斜面の安定解析は,無限斜面を対象とした地表と平行なすべり面上における 滑動力と抵抗力の釣り合い,有限斜面を対象とした円弧などの非直線のすべり面上にお ける滑動力と抵抗力の釣り合いにより評価されてきた.ここで,抵抗力と滑動力との比 はすべり安全率と呼ばれ,有効応力の原理に従えば,気中であろうが水中であろうが同 じ値となることは良く知られている.しかし,様々な要因により,抵抗力や滑動力は変 化するため,場の条件はその破壊モードを支配する重要な要素となることは言うまでも ない.

まず,海底地すべりに起因した津波ハザードの確率論的な評価を実施している文献 1)より,海底地すべりの評価手法について示す.従来の地盤工学におけるモデルと同様 に無限斜面や有限斜面を対象とした図 3-1 に示す 2 つの破壊モードにより評価されて いる.

• 並進破壞(Translational failure)

• 回転破壊(Rotational failure)

ここで、前者は粗粒堆積物の斜面を対象とし、後者は細粒堆積物を対象としている. 次に、海底地盤を構成する低角の海底面下で地震時に生じる海底地すべりのメカニズ ムについて述べられた NGI (Norwegian Geotechnical Institute)の Nadim 博士が書かれた 文献 2)では、以下の 3 つが破壊要因として述べられている.

・ 地震時の繰り返し応力履歴による有効応力の低下に起因した強度低下による破壊

・ 地震時に発生する過剰間隙水圧の鉛直方向の水圧差に起因した上昇水流による水の流入がもたらす有効応力の低下、つまり強度低下による破壊

・ 応力変化を伴う要因による地盤のクリープによる破壊

ここで,地震による海底面下の地盤の破壊は海底面下における地震時における以下の 地盤内応力状態を考慮している.ここでは,海底面下という条件は,低角のすべりを対 象とした破壊モードであることおよび応力状態として考慮されている.この地震時にお ける有効応力状態の変化を踏まえた安定性評価を行うためには,材料試験および動的解 析などが必要となり,原理的に適切ではあっても,確率論的な評価に適用するのは困難 である.

次に,文献 2)と同様に低角の海底面下で地震時に生じる並進破壊による海底地すべり のすべり安全率を土質条件に応じた排水条件に応じて示している文献 3)について示す. 非排水条件下では粘性土のせん断強度 Sr, 排水条件下では砂質土の有効粘着力と内部摩 擦角が強度定数として用いられている.ここでは,海底面下という条件は,低角のすべ りを対象とした破壊モードを対象としていることを除くと,強度特性の間接的に考慮さ れている.

$$FS = \frac{S_u}{r' z [\sin \theta \cos \theta + k (r/r') \cos^2 \theta]} (Undrain)$$

$$FS = \frac{C' + r' z (\cos^2 \theta - \lambda^*) \tan \phi'}{r' z [\sin \theta \cos \theta + k (r/r') \cos^2 \theta]} (Drain)$$

$$\lambda^* = \Delta u / \sigma'_{vh}$$

次に,比較的急勾配(30度を超える)の海底地盤を対象とした地震時における斜面 の安定解析を実施している文献4)では,円弧すべり面法を用いた疑似静的安定解析法, さらに動的解析による応力状態などによる分析を実施している.この方法は,地上にお ける安定解析と同様であるが,限界安全率として1.4が用いられていた.前述の文献2) から3)では限界すべり安全率は1.0であった.このように,限界安全率の設定には地上 と同様の経験値がないため困難と考えられる.

最後に,文献 5), 6)に示された日本近海において海底地すべりの生じる地形の分類と 崩壊し易い条件を以下にまとめる.

■ 地すべり地形分類

- ・大陸棚外縁斜面に求められる地すべり:大陸棚の傾斜1°程度,比高200m程度の 滑落崖をもつ斜面崩壊,崩壊長が長く数km
- ・海底谷の側方浸食
- ・前縁断層崖および分岐断層崖に認められる斜面崩壊
- ・駿河トラフ沿いの大規模崩壊
- 地震時に崩壊し易い条件
 - ・斜面勾配が大きい
 - ・過剰間隙水圧が大きい(堆積速度が早い,ガスや間隙水の供給)
 - ・鉛直応力が小さい(生物死骸などを多く含み軽い)

以上のことを踏まえ、日本近海の海底地盤を対象とし、地震時における地すべりに関 する安定性の評価を実施する際に留意すべき、地形や土質の特徴と崩壊モードとの関係 を整理する.

- 崩壊が生じる海底地盤の地形
 - ・大陸棚などの緩い傾斜(数度)
 - ·比較的急勾配(数十度以上:谷地形,付加带)

■海底地盤の土質

- ・紀伊半島沖などの太平洋沖の海底地盤は低塑性の粘土
- ・日本海の海底地盤は弱過圧密の粘土

■地形, 土質と崩壊モードの関係

・緩い勾配斜面で軽い過圧密,また正規圧密粘土の海底地盤

= Translational failures (並進破壞)

・比較的急勾配の海底地盤(地盤材料によらず)

= Rotational failures(回転破壊)

さらに、崩壊モードを整理する上で海底下の特徴として、常に飽和しているという条 件下で過剰間隙水圧の影響は地震時における有効応力の現象による強度低下との関係 で重要であり、密度の軽さは慣性力、つまり地震時に作用するせん断応力の大きさと関 連している.さらに、地上における斜面崩壊では、地震時における斜面内に生じる引っ 張り亀裂が崩壊のトリガーとして重要な要素となっているが、海底下においても重要な 課題と考えられる.

また,海底地盤の安定性をすべり安全率により評価する場合の限界安全率の設定について,地上と同様な経験値がないため,適切な値の設定が必要となることも重要な課題であると考えられる.



a)並進破壊

b)回転破壊

図 3-1 海底地盤のすべり破壊モード

3.2 斜面安定解析

3.2.1 斜面安定解析の実施について

海底地すべりのメカニズム把握の為に遠心模型実験を行うが,その際の模型斜面勾配 角度および形状の決定および崩壊形状の大まかな予測を行うために斜面安定解析を行 った.斜面安定解析実施目的は以下の2点である.

①遠心実験実施時にすべりが発生する模型地盤の土質定数と模型斜面勾配(形状)の決 定根拠の把握.

②遠心実験における載荷条件によって実際に模型斜面が不安定化するかに関する予測.

3.2.1 斜面安定解析 1)~3)

本検討で実施する斜面安定解析は,実務で一般的に用いられる次の2つの手法を用い て行う.

・分割法(修正フェレニウス法) Limit Equilibrium Method

・せん断強度低減法(FEM)Strength Reduction Method

特に修正フェレニウス法(分割法)は、通常の土木構造物設計時に斜面安定検討手法 として一般的に用いられる手法であり、手法が確立しているため比較的に短時間で斜面 安全率を求めることが可能である.本検討では、実験実施時に遠心模型斜面が崩壊を発 生させることを予測する必要があることから、一次検討として修正フェレニウス法によ る斜面安定解析を実施するとともに、安全率および斜面崩壊発生のクロスチェックとし てせん断強度低減法を実施した.

修正フェレニウス法(分割法)¹⁾

斜面安定の検討を行う際には、しばしば斜面分割法(図 3-2)が用いられる.フェレ ニウスによるこの方法は図 3-3 (a)に見られるように細片の両側壁に働くそれぞれの T と E の合力は細片底面の滑り面の方向に平行に働き、お互いに反対方向に働き、等しい 値をとると仮定する.このことにより T と E は滑りの回転モーメントに貢献すること なくその影響を無視することができる.この時、残る力 W, S, U, R' は図 3-3 (b)の 力の多角形を閉じることになり、R' を求めることができる.

図 3-3 (b)より

 $R'_i = W_i \cdot \cos \alpha_i - U_i$

したがって

F.S.= $M_{\text{resisting}}/M_{\text{driving}} = [r \Sigma (c_i \cdot a_i + (R'_i \cdot \tan \phi_i))]/[r \Sigma W_i \cdot \sin \alpha_i]$

 $= \sum (\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{b}_i / \cos \alpha_i + (\mathbf{W}_i \cdot \cos \alpha_i - \mathbf{U}_i) \cdot \tan \phi_i)) / \sum (\mathbf{W}_i \cdot \sin \alpha_i)$

上式でrは滑り円弧の半径で、細片の底面の長さ a_iは b_i/cos α_iで与えられる.底面に 働く水圧合力 U_iは図 3-3(c)に見られるように U_i= u_i・b_i/cos α_iより得られる.



図 3-2 斜面分割法の原理¹⁾



図 3-3 簡易分割法による細片 i に作用するカ¹⁾

せん断強度低減法 2),3)

せん断強度低減法は,有限要素法を用いた斜面安定解析法である.この有限要素法は 斜面の各地点の釣り合い条件と適合条件,構成方程式および境界条件を満たす厳密な近 (以解法であり、実現象に近い破壊形態をあらわし、現場条件をよりリアルに反映することのできる解法として、斜面の最小安全率計算と斜面の破壊挙動を詳細に分析することができる数値解析方法である.特に、斜面の破壊面をあらかじめ仮定する必要がなく破壊過程を推測できる方法である.

斜面安全率を"すべり面に沿って斜面が極限平衡状態になるようにせん断強度定数を 低減させる係数"と定義して, せん断強度定数(c, φ)を徐々に低減させながら計算が収 束できない時点まで解析をおこない, その地点を斜面の破壊が発生する時点としてそこ でのせん断強度低下率を最小安全率と考える.

図 3-4 のような斜面の安全率を計算するために、斜面の任意の地点である一個の要素 のガウス点 A に注目する. この点の応力状態をモール円で表示すると、図 3-5 のよう に示すことができる. 斜面の破壊滑動を示すためには仮想滑動面の応力状態に対するモ ール円が破壊包絡面に接するように,任意の安全率 F でその点でのせん断強度を割るこ とによって、モール円に接するようにする. すなわち、その点での応力状態を破壊状態 に補正する. このような破壊点が増加することによって、斜面の全体的な崩壊が発生す る. この際の有限要素解析では、計算が発散してしまい、これ以上解析が進行されない といった状態になり、限界値 F を斜面の安全率として定義する. この方法による解析は 一貫性のある計算が期待でき、実在する斜面の破壊挙動を実現することが可能となる. せん断強度低減法で斜面の最小安全率を計算する方法は、与えられた斜面の弾性係数 E とポアソン比vは一定とみなし、粘着力 c と内部摩擦角 o および膨張角を次のように漸 進的に減少させ、計算が発散される地点の安全率 F_s を決定する. せん断破壊により、 斜面すべりに対する安全率は、以下のように計算することができる.

$$F_s = \frac{\tau}{\tau_f} \tag{3.1}$$

ここで, τ:斜面地山のせん断強度であり,以下に示すモール・クーロンの式より算 出する.

$$\tau = c + \sigma_{x} \tan \phi \tag{3.2}$$

 τ_f は滑動面でのせん断応力であり、次のように計算することができる. $\tau_f = c_f + \sigma_n \tan \phi_f$ (3.3)

ここで
$$c_f = \frac{c}{SRF}$$
 : せん断強度定数

$$\phi_f = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{SRF}\right)$$
 : せん断強度定数

SRF

:強度低減率



図 3-4 斜面例



図 3-5 せん断強度低減法の原理²⁾

3.2.2 解析上における土質定数

既存海底ボーリング調査結果に基づく検討用土質定数

日本近海で実施されている大規模ボーリング調査は、2.1 で示した IODP333 (太平洋 紀伊半島沖) と IODP346 (日本海) が挙げられる (図 3-6 参照). これらボーリング資 料におけるデータの詳細についてはここでは記述しないが、どちらも泥堆積物であり工 学的には粘土である. 図 3-7、図 3-8 に IODP333 と IODP346 のボーリング採取試料の 土質定数を示す. 両ボーリングデータのせん断強度ならびに単位体積重量の密度分布を 比較すると、両ボーリングともせん断強度は、深度方向より増加傾向を見せるが、絶対 値は IODP333 のせん断強度が IODP346 の 2 倍から 3 倍程度の値をとる.一方,単位体 積重量の深度分布については, IODP333 と IODP346 で大きな差はなく,どちらも 14~15.0kN/m³の値で収束している.これらの土質定数について国内臨海部の海洋土木工 事において設計・施工検討時における粘性土の強度や密度のおおよその値と比較した場 合, IODP346(日本海側)の土質定数が近い値を示す一方, IODP333(太平洋)では, 単位体積重量は近い値を示すが,せん断強度については 2 倍以上の大きな値を示す.

斜面安定解析を実施する目的と照らし合わせた場合, IODP333 でのせん断強度を模擬 した模型地盤を作製し地震動を静的あるいは動的に載荷した場合には, せん断強度が高 いためすべり・崩壊が容易に発生しないと予測される.そこで本検討では, IODP346 のボーリング結果について, 図 3-9 に示すように U1422 から U1430 の各データにおお よそフィッティングするよう以下の値として解析入力値とした.

単位体積重量 γ_{sat} : 15.0 (kN/m³)

せん断強度 (= 粘着力 c_u) : 20+0.25Z (kN/m²) (Z:深度 m)

また,内部摩擦角 φ_u,体積弾性係数 *E*,ポアソン比等については,データが無い為, 粘土の一般的な値を用いることとし,最終的に表 3-1 に示すパラメータを入力値とし 斜面安定解析を行った.



(a) IODP333(太平洋側)の実施位置
 (b) IODP346(日本海側)の実施位置
 図 3-6 IODPにおける日本近海のボーリング調査
 (図 2-10,図 2-1を再掲)



図 3-7 せん断強度の深度分布例 左: IODP333-C0011 右: IODP346-U1426



図 3-8 単位体積重量の深度分布例 左: IODP333-C0011 右: IODP346-U1426



※グラフ上の黒線は本検討で斜面安定解析に入力したパラメータ

図 3-9 IODP346 における U1422~U1430 の単位体積重量とせん断強度の深度分布

表 3-1 修正フェレニウス法(LEM)および せん断強度低減法(SRM) パラメータ

海性	単位	粘着力	内部	弾性	
粘土	重量	(kN/m²)	摩擦角	係数	ポアソン比
	(kN/m³)		(deg)	(kN/m²)	
	15. 00	20. 0+0. 25Z	1.0	5000	0. 333

Z:深度 m

3.2.3 解析上における土質定数

実施予定の静的載荷遠心実験に用いる模型実験装置は,装置諸元の制約から,最大 遠心載荷は 90G 下で幅:最大 54m (600 mm),高さ:45m (500 mm)内での模型斜面の 再現となる.本検討では,模型斜面勾配および斜面形状を決定するため,幅 50m とし て斜面勾配を5度~55度間 10度間隔で勾配を変えた解析を行った.なお,解析中に与 えた水平深度 kh についても遠心実験装置で与えることができる 0.0 (載荷無)~0.3 を 目標に設定している.

斜面勾配角度ならびに水平震度の検討について

斜面勾配を決定するため,図 3-10(上:修正フェレニウス法による分割法,下:せん断強度低下法による FEM)に示すような斜面勾配を5度,15度,25度,35度,45度,55度に変化させ,静的水平震度 kh=0,0.1,0.2,0.3,0.5を与えた安定解析を実施した.

模型斜面形状の検討について

斜面勾配検討後,実際の遠心載荷実験装置上に設置する具体的な模型斜面形状について,さらに検討を行う.勾配角度は,勾配検討を実施した前述の検討に準じ,図 3-11(上:修正フェレニウス法による分割法,下:せん断強度低下法によるFEM)に示 す斜面勾配を5度,15度,25度,35度,45度,55度,静的水平震度kh=0,0.1,0.2, 0.3,0.5 である.



図 3-10 斜面安定解析におけるモデル斜面

(上:修正フェレニウス法 下:せん断強度低減法における FEM メッシュ)



(上:修正フェレニウス法 下:せん断強度低減法における FEM メッシュ)

3.2.4 解析結果

斜面勾配角度ならびに水平震度における安全率の変化

修正フェレニウス法(LEM)およびせん断強度低減法(SRM)の検討結果から、それぞれの安全率は下記の表および図 3-12,図 3-13のような結果となった.


修正フェレニウス法における斜面勾配・水平震度による安全率の変化



図 3-12 修正フェレニウス法における斜面勾配・水平震度による安全率の変化

勾配角度	5度				15度				25度						
水平震度kh	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0	0.1	0.2	0.3	0.5
安全率Fs	3.45	2.65	1.213	0.838	0.513	5.9	1.41	0.94	0.66	0.425	1.76	1.02	0.75	0.56	0.375
勾配角度			35度				45度			55度					
水平震度kh	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0	0.1	0.2	0.3	0.5
安全率Fs	1.19	0.79	0.59	0.47	0.4	0.825	0.6	0.475	0.4	0.3	0.588	0.475	0.4	0.338	0.263

せん断強度低下法における斜面勾配・水平震度による安全率の変化





模型斜面形状における安全率の変化

修正フェレニウス法(LEM)およびせん断強度低減法(SRM)の検討結果から,安 全率は下記の図 3-14,図 3-15のような結果となった.斜面安定解析の結果,異なる2 つの斜面安定解析手法を用いて検証を行った結果,遠心載荷模型地盤の斜面勾配は, おおよそ 35 度から 40 度程度が望ましいという結論に至った.

これは、以下に示す理由より判断される.

実験装置の制約条件から水平震度は0.3程度までしか与えられない.このため、
 試験実施において常時の斜面勾配はできるだけ大きい角度が望ましい.

② 常時の勾配角度 45 度以上であると水平震度 kh=0.0 でも安全率 Fs が 1.0 を下回る. このことから、本検討で用いた土質強度では、45 度以上の勾配では斜面自体が不安定 化することを意味し、遠心実験自体を成立させることができないと判断される.

以上から IODP346 の土質定数に準じる模型斜面用粘土を準備した場合,斜面勾配は 35 度が適正と判断され,もってこの角度(勾配 35 度)の模型斜面を準備する.



修正フェレニウス法における斜面勾配・水平震度による安全率の変化

図 3-14 修正フェレニウス法における斜面勾配・水平震度による安全率の変化



せん断強度低下法における斜面勾配・水平震度による安全率の変化

図 3-15 せん断強度低減法における斜面勾配・水平震度による安全率の変化

3.2.1 遠心実験実施時における模型斜面形状

前節に示した2方法の斜面安定解析結果より遠心載荷模型実験実施時の模型斜面形 状は,斜面勾配角度35度が望ましいと推測する.この結果に基づき模型斜面は図3-16 に示す形状・寸法と予定される.この形状について,修正フェレニウス法およびせん断 強度低減法による斜面安定解析を実施し,遠心実験実施に・遠心場において静的地震動 載荷無しの常時には安全率が1.0を上回り,水平震度0.1~0.3に相当する静的載荷実施 時に安全率が1.0以下となることを確認した(図3-17).修正フェレニウス法およびせ ん断強度低減法による斜面安定解析結果を図3-18,図3-19に示す.

63



図 3-16 模型斜面の形状・寸法





修正フェレニウン	ス法静的	修正フェレニウス	ス法 k _h =0.1					
	SoiWorks			SalWorks				
基準安全率	1.000	判定	基準安全率	1.000	判定			
解析安全率	解析安全率 1.336 OK			解析安全率 0.894 NG				
修正フェレニウス	、法 k _h =0.2		修正フェレニウス	ス法 k _h =0.3				
	SoliWants'			SollWarks				
基準安全率	1.000	判定	基準安全率	1.000	判定			
解析安全率	0.670	NG	解析安全率	0.535	NG			

図 3-18 修正フェレニウス法の解析結果



図 3-19 せん断強度低減法の解析結果

4 実験計画(案)の作成

4.1 基礎実験計画(案)の作成

4.1.1 実験の目的

前章の事前解析で回転破壊モードを示した海底斜面の破壊挙動を再現するために,解 析で採用した日本海の粘土の強度特性と類似した比較的軟弱な粘性土の斜面を作製し 遠心載荷実験を実施する.地震力は地盤モデルを傾斜させることで水平震度として与え る静的載荷実験とする.加えて,海底地盤特有の条件である静水圧作用条件を実験で再 現する.この実験により既に提案されている斜面の地震時安定性評価手法が海底条件下 でも適用できるかを検証し,さらに水圧が斜面安定に及ぼす影響を評価することを目的 とする.

4.1.2 実験概要

海底地すべりの崩壊形状の再現は,遠心模型実験装置本体に設置した傾斜台を使用し て行う.模型地盤を作製した土槽を遠心場で傾斜させて,静的な水平震度を模擬海底斜 面に強制的に与えることにより地すべりを発生させる.

図 4-1 に実験概要図を示す.表 4-1 に本実験で使用する施設を示す.また,表 4-2 に遠心模型実験装置の主要諸元を,図 4-2 に遠心装置概概要図を示す.

表 4-1 使用施設

施設名称	実施項目
遠心模型実験装置	遠心加速度 90G で模型の破壊形態を観察
力学試験室	圧密試験の実施
物理試験室	土質試験の実施

表 4-2 遠心模型実験装置の諸元

項目	仕様
遠心加速度	20~90G
有効回転半径	3,050 mm
中心軸回転数	$70{\sim}168$ rpm
プラットフォームの大きさ	$500\! imes\!1100$ mm
最大積載重量×加速度	1000G • kN





図 4-1 実験概要図



図 4-2 遠心装置概要図

4.1.3 実験の詳細

本実験は、以下の項目について実施する.

地盤材料の土質試験

②遠心模型実験による模擬海底斜面の変位の把握および破壊モードの観察.

使用機材

表 4-3 に本実験で使用する機材を示す.

名称	型式	数量	備考
傾斜台	最大傾斜角度 20°	1台	
浸透圧密装置		1式	
遠心実験用土槽	内寸法 600 mm×500	2 基	遠心場で加圧が可能な土槽を準備
	$\mathrm{mm} imes 200 \mathrm{mm}$		
加圧装置	最大 0.7MPa	1式	
模型地盤整形用型枠		1式	
小型ビデオカメラ	Gopro4 BLACK	1台	資料- 参照
データロガー	共和電業 EDS-400	1式	無線LAN接続 16ch
ポテンショメータ式	DTP-D-500S	1台	傾斜変位計測
変位変換器			
圧力計	PGL-A-1MP-A	2台	水圧載荷圧力計測
天井クレーン	最大 20t 吊り	1台	
画像計測ソフトウエア		1式	地盤変位計測

表 4-3 機材一覧表

使用材料

地盤材料は, IODP が公開している, 図 4-3 の日本海ボーリングデータを参考に, せん断強度等を模擬した粘性土を使用する. 図 4-4 に例として Site U1423・U1424・U1427 の海底地盤せん断強度分布を示す.

IODP346 に準拠した模擬粘土を準備するにあたり次のような注意点を上げる.

- ・海成粘土を模擬できるような粘性土を準備すること.
- ・深度方向に対しある程度せん断強度が増加するような傾向を持つこと.



図 4-3 IODP Expedition 346 Site Map

(図 2-1 を再掲)



図 4-4 海底地盤のせん断強度分布図

地盤材料の土質試験

使用する材料の特性を把握するため土質試験を実施する.表 4-4 に土質試験実施項目 を示す.

試験名称	規格
土粒子の密度試験	JIS A 1202
土の含水比試験	JIS A 1203
土の粒度試験	JIS A 1204
土の液性限界試験	JGS 0135
土の塑性限界試験	JGS 0135
土の段階載荷による圧密試験	JIS A 1217

表 4-4 土質試験実施項目

実験条件

模型地盤を作製する土槽は、内寸法が横幅 600 mm×深さ 500 mm×奥行 200 mmのジュラ ルミン製で剛性の高い構造のものを使用する. 模型縮尺は 1/90 とし、90G の遠心場で 実験を行う. 模型寸法を実スケールに換算すると幅 54m, 深さ 45m 相当となる. また, 遠心場で作動する加圧ポンプを実験装置に設けて、密封した土槽内部に水圧載荷を行い、 水深 70m の水圧を再現する.

斜面安定解析による斜面勾配

模型斜面の勾配を決定するにあたり,模型土槽内で再現できる範囲内での斜面勾配に ついて,実験上再現が可能かどうかについて斜面安定解析を実施し検証した.

斜面安定解析を実施するにあたり模型地盤(粘性土)の土質定数は IODP346 のボー リングデータを参考に表 4-5 の値を仮パラメータとして与えており,検討地盤幅や斜面 高さは模型土槽内で再現できる幅 54m, 深さ 45m 以内としている.

なお、この土質定数は模型形状を決定するにあたり使用した仮値であり、実際に実験 するにあたっては前項にて実施する土質試験により得られた値を用いて再度斜面安定 解析を実施する.

斜面安定解析は、土木分野で一般的に用いられる分割法(修正フェレニウス法)を用 いて行い、模型実験で再現できる模型斜面の角度勾配で安全率が1.0を下回らない勾配 角度を調べている(勾配が大きく安全率が1.0を下回る場合、遠心場で斜面が成立でき ず、静的に地震動を載荷する前にすべりが生じてしまうことを意味する).

実施した斜面安定解析による解析結果の一例を図 4-5 に示す. 模型斜面の勾配角度と 安全率の関係について図 4-6 に示す. 事前の斜面安定解析の結果から, 遠心場における 90G 作用下の常時には安全率は 1.0 以上の値を確保できる模型斜面の勾配は 35 度程度 が妥当である. 斜面勾配 35 度における解析結果の一例を図 4-7 に示す. また, この時 の水平震度と安全率の関係を図 4-8 に示す. 水平震度で kh=0.1 以上の静的載荷を行え ば, 安全率が1以下となり, 円弧すべりが発生することが予想される.

区分	飽和単位重量 (kN/m³)	粘着力 (kN/m²)	内部摩擦角 (deg)	弾性係数 (kN/m²)	ポアソン比
粘土	15.00	20.0+0.25z z:深度	1.0	5000	0.333

表 4-5 斜面安定解析に用いた仮土質定数

※海面高さは 70m を仮定, ※粘着力を c=20+0.25z でモデリング







図 4-6 常時における安全率と斜面勾配の関係



(a) 常時

(b)水平震度 k_h=0.3

図 4-7 斜面勾配角度 35 度における斜面安定解析(修正フェレニウス法)の結果例



図 4-8 斜面安定解析による斜面勾配角度 35 度時における水平震度 kh と安全率 F の

関係

模型地盤

実験モデルは, IODP が公開している海底地盤の土質データと,制約条件となる実験 装置のスペックおよび土槽寸法を踏まえて設計を行い,斜面安定解析を実施して検証し た形状(斜面勾配角度 35 度)を使用する.図 4-9 に模型詳細図を示す.



図 4-9 模型詳細図

予備実験を行い地盤作製方法と地盤変位の画像解析方法について検討する.予備実験 で得られた結果をもとに,遠心模型実験を4ケース実施する.表 4-6 に遠心模型実験ケ ース一覧を,図 4-10 に実験イメージ図を示す.

Case	斜面角度	水圧載荷	クラック	内容		
Case1	35°	なし	なし	標準ケース		
Case2	35°	なし	あり	法肩付近にテンションクラックあり		
Case3	35°	0.7MPa	なし	水圧の影響確認		
Case4	35°	0.7MPa	あり	クラックに侵入する水圧の影響を確認		

表 4-6 実験ケース一覧













Case4

図 4-10 実験イメージ図

図 4-11 に予備実験と遠心模型実験のフロー図を示す.

◆予備実験



◆遠心模型実験



図 4-11 実験フロー

予備実験

本実験では、深さ方向に強度が増加する正規圧密状態を再現した模型地盤を使用する ため、浸透圧密試験法と遠心場での圧密方法を用いて地盤作製を行う.予備実験では模 型地盤作製方法の検討を行い、作業性とモデルの再現性を検証し作製手順を決定する.

正規圧密地盤の強度確認

水平な正規圧密地盤を作製し深度方向の地盤の含水比とせん断強度の分布を測定する.測定結果を踏まえ,地盤作製方法1および2の上載荷重を決定する.

以下の手順で,正規圧密地盤の強度確認を行う.図 4-12 に地盤強度測定概要図を示す.

①スラリー状の粘性土を土槽に投入する.

②土槽に蓋をして粘性土の脱気を行う.

③①・②を数回に分けて行う.

④両面排水にして1日放置する.

⑤載荷板を設置し、上載荷重を数回に分けて載荷する.

⑥土槽内部を脱気水で満たし、浸透圧をかける.

⑦圧密度がある程度進んだら浸透圧載荷を除荷し、土槽を遠心載荷装置に設置する.

⑧90Gの遠心場で、粘性土地盤の沈下量が収束するまでを圧密を行う.

⑨1G場で深度方向の含水比および強度を測定する.

⑩計測した地盤強度結果から、模型地盤作製時の上載荷重を決定する.

地盤作製方法1(型枠設置後に浸透圧密)

以下の手順で、模型地盤の作製を行う.図 4-13 に地盤作製方法1概要図を示す.

①スラリー状の粘性土を土槽に投入する.

- ②土槽に蓋をして粘性土の脱気を行う.
- ③①・②を数回に分けて行う.
- ④両面排水にして1日放置する.
- ⑤土槽内に粘性土との境界面にポーラスストーンを設けた型枠を設置する.
- ⑥上載荷重を数回に分けて載荷する.

⑦土槽内部を脱気水で満たし、浸透圧をかける.

⑧沈下量を確認しながら,載荷板と粘性土地盤の境界に脱気したスラリー粘性土を追加 投入する.

⑨圧密度が40~50%になるまで⑦・⑧を繰り返す.

1090Gの遠心場で沈下が収束するまで圧密を行う.

⑪1G場で深度方向の含水比および強度を測定する.

地盤作製方法2(水平地盤作製後に切出し)

以下の手順で、模型地盤の作製を行う.図 4-14 に地盤作製方法2概要図を示す.

①スラリー状の粘性土を土槽に投入する.

②土槽に蓋をして粘性土の脱気を行う.

③①・②を数回に分けて行う.

④両面排水にして1日放置する.

⑤載荷板を設置し、上載荷重を数回に分けて載荷する.

⑥土槽内部を脱気水で満たし、圧密度が40~50%になるまで浸透圧をかける.

⑦90Gの遠心場で沈下が収束するまで圧密を行う.

⑧形状成形用ガイドを用いて模型形状を成形する.

⑨深度方向の含水比および強度を測定する.

画像変位計測

崩壊形状測定は,模型地盤側面にマーキングしたターゲットの移動量を,画像計測ソ フトウエアを用いて計測する.ターゲットの移動量は,土槽に固定した小型カメラで動 画撮影を行い,画像データを取り出して計測する.

①法面の形状に合わせた型枠を土槽に固定する.

②土槽を横倒しにて、アクリル面を取り外す.

③模型地盤のマーキング面にガイドを設置する.

④ターゲットを設置し、アクリル面を取り付ける.

⑤プラットフォームに土槽を載せ、カメラと照明を取り付けて撮影する.

⑥画像計測ソフトでターゲットの認識性を確認する.

また,画像変位計測の測定精度は、ターゲットの映り具合で変わるため、表 4-7の項目について検証を行って画像計測方法を決定する.

図 4-15 にマーキング概要図を示す.

再現性確認

先に示した2つの方法で模型地盤を作製し再現性の確認を行う.再現性の可否については、模型地盤の作製を複数回実施し、強度分布および含水比分布の測定結果を比較し 判断する.



図 4-12 強度測定概要図



図 4-13 地盤作製方法 1 概要図



図 4-14 地盤作製方法 2 概要図

表 4-7 画像計測確認事項

項目	確認内容
ターゲット	形状(ライン・ドット)材質、設置間隔、サイズ、 色、
撮影用の照明	明るさ、ライトの位置(アクリル面への反射・映り込 み)



図 4-15 マーキング概要図

模型地盤作製時間の短縮

本実験で使用する実験モデルは、粘性土の層厚が大きいため、圧密沈下が収束するまでに多くの時間を要することが予想される.そこで、実験期間の短縮と遠心載荷装置の 占有率を下げるため、模型地盤作製用の土槽を2基用意し、2ケース分の正規圧密模型 地盤作製を同時に進めることで作業の効率化を図る.

遠心模型実験

予備実験で決定した模型地盤作製方法と画像計測方法で模型地盤の作製を行う. 傾斜 台に土槽を固定し,遠心加速度を 90G まで上げていく. 遠心加速度が安定したら傾斜 台を徐々に傾斜させ,模型地盤に静的な水平震度を与えて破壊形状の観察を行う.

計測項目

以下に,計測項目を示す.

(1) 模型地盤作製

 〔模型地盤の含水比分布測定

②模型地盤の強度分布測定

(2) 遠心載荷

①遠心加速度の計測

81

②傾斜台の傾斜角度計測

③模型地盤の動画撮影(4K 画質で撮影.静止画切出し時 800 万画素)

- ④水圧載荷時の圧力測定
- (3) 事後調査
- ①模型地盤の含水比分布測定

4.1.4 実験工程表



図 4-16 実験工程表

4.1.5 概算費用

これまで示した実験を実施するための概算費用を表 4-8 に示す. なお, 遠心載荷装置 の詳細図面および用いるセンサーに関する詳細は巻末の付録に示した.

表 4-8 実験概算費用の見積結果

項目	費用(千円)	備考
材料費	7,435	遠心実験用土槽2台、水圧載荷装置、水圧計、地盤材料他
機械費	2,260	遠心装置、小型カメラ使用料
試験費1	64	室内土質試験
試験費2	4,386	技術者人件費
直諸経費	520	実験モデル詳細検討(安定解析)、廃棄物処分費
諸経費	2,200	
端数調整	▲ 65	

計

<u>16,800</u> 税抜金額 <u>1,344</u> 消費税 <u>18,144</u> 税込金額

16,800

4.2 遠心振動実験計画(案)の作成

4.2.1 実験の目的

基礎実験で実施した静的な地震作用下で検討した海底地盤の安定性解析手法として, 力の釣り合いに基づく手法の適用性について,動的な地震作用下で検証を行う.

検証は、急勾配海底斜面の安定性評価への円弧すべり破壊による安定解析法、緩勾配 斜面の安定性評価への並進すべり破壊による安定解析法の適用性について実施する.

4.2.2 実験の概要

実験は,静的な地震作用の状況で確認できない,動的な地震作用の状況下での海底斜 面の崩壊機構を明らかにするために実施する.

動的な作用では斜面内での振動位相差,間隙水圧の上昇および引っ張り亀裂の発生な どが考えられる.急勾配斜面では,それらの影響が全て崩壊過程に影響を及ぼすと考え られる.緩勾配斜面でも同様であるが,過剰間隙水圧の影響が大きいと考えられるので, 事前に粘土地盤の有効応力場での地震応答解析を実施し、その影響を確認することが必要である.さらに、その影響は弱層を設けるなど間接的に考慮することが必要と考えられる.

目的とする事象の検証を行うためには,加速度や間隙水圧などの計測も必要となり大 規模な遠心振動実験装置が必要となる.ここでは,その例として図 4-17 に示す装置を 想定した.この装置の性能の概要を以下に示す.

写真に示す様に回転アーム(半径 7.01m), 駆動装置, アーム内に設置した計測および 映像収録装置により構成される.装置の主な性能として,回転アームには静的バケット と振動台バケットを装備している.静的バケットは広い搭載面積(2.2m×2.2m)と大きな 搭載容量(700ton・g)を特徴としている.振動台バケットは 遠心場で地震入力を模擬で きる振動台を常時搭載し,加振精度を向上させるため着座機構を有している. 振動台 バケットに常時搭載している水平一方向加振の遠心振動台は,支持機構・テーブル・油 圧機構・アクチュエータ・振動検出器で構成されている.振動台搭載質量 3ton までの 大型模型の加振が可能である.また,最大加振推力 1,176kN から得られる最大加速度は, 遠心重力 50G 場で 980Gal, 30G 場で 1630Gal と,兵庫県南部地震における工学的基 盤上地震波を上回る波形の入力が可能である.また,制御振動数範囲は 20~400Hz であ り,振動波形としてランダム波、定常波など多様な波形入力に対応できる.

ここで想定した遠心載荷装置の振動台, 土層の大きさを踏まえ, 急勾配斜面模型は図 4-18 に示す様に 30 度の勾配を有する高さ 600mm の斜面で幅を 1800mm とする. ここ で, 遠心加速度を 50G とすることにより, 30m 程度の斜面高さと水深を考慮できる. 緩勾配斜面は, 5 度の勾配を有する高さ 150mm の斜面で幅 1800mm とする. 遠心加速 度を 60G とすることにより, 7.5m 程度の斜面高さと水深を考慮できる.

この水深は水圧が土層に及ぼす影響を考慮しなくてもよいことを前提とした土層設計の条件を踏まえたものであり、より深い水深を考慮する場合には別途検討が必要である.

合わせて、いずれのモデルも粘土の予備圧密→モデル作成→再圧密→振動実験の手順 で実験を実施することになるので、再圧密時に斜面が変形する恐れがある.事前解析と 先行する予備試験で十分な吟味が必要となる.



図 4-17 計画上想定を行った遠心振動実験装置の概要



a)急勾配斜面モデル



b)緩勾配斜面モデル

図 4-18 海底地盤モデル

4.2.3 実験工程

全体工程は前述の実験斜面モデルを予備試験を含めて 4 体実施することを前提に作成した.実験では、粘性土の試料作成、土層作成の不確定性があり、表 4-9 に示したようにかなり安全側に 4 体で 2 年の工程を考えている.(例:1-①は 1 年目第一四半期)

表 4-9 に示した全体工程中の1ケース当たりの概略工程は表 4-10 に示す通りであり, 概ね8週間程度必要になる.



表 4-9 概略全体工程

表 4-10 ケースの概略工程

実験詳細工程	T 1	W2	W3	314	785	746	117	W8
私主調整								
予儀圧密								
圧密用遠心載荷								
地盤整形								
センサー設置								
速心振動実験								
後片付け								
データ整理・資料集								

4.2.4 概算費用

概算の費用として,実験の概要に示して基本ケースと予備2ケースを対象とし,直接 業務費,直接経費および間接経費について算出すると以下に示すとおりとなる.試料作 成も含めて,かなりの不確定があるため,安全側の見積もりとなっている.他消費税な ども必要であるが,それらを除いた合計金額は51,215,000円程度となる.

1)直接業務費:直接人件費

18,966,000 円

a.計画・打ち合わせ

b.模型製作・実験準備および撤去

c.遠心実験と計測

d.データ処理および報告書作成

2)直接経費:模型·材料費,消耗品費

26,559,000 円

a.試験機使用量

b.材料費

c.計測機器損料

d.計測治具

e.土槽製作費(概算で 10,000,000 円)

f.残土処理

3)間接経費:諸経費,技術経費

5,690,000 円

この見積には画像計測は含まれていないため、実施に際して機材費および外注費が別途必要となる.

5 おわりに

海底斜面の地震時安定評価に関する基礎検討として,海底土質パラメータの収集・分 析および遠心載荷実験における地盤模型の設計を実施した.本検討を通じて得られた知 見を以下にまとめて示す.

海底の地盤に詳しい研究者3名から聞き取り調査を行い,海底地すべりの地形,地質, 素因と誘因,海底土質パラメータを収集するための情報ソース,海底地盤の原位置強度 試験,メタンハードレート関連の研究プロジェクトの研究成果,遠心載荷模型実験の成 果,潜水艇を活用した深海における海底地盤の調査から得られた情報,海底地すべりに よる津波を評価するための数値解析手法に関する情報を得た.

海底地盤の物性については日本近海に関しては、日本海(IODP346),紀伊半島沖の 南海トラフ(IODP333, MH21)のデータを収集した.また海外(メキシコ湾(IODP308) のデータを比較のため収集した.これらのデータより、日本海の海底地盤は比較的軟弱 で沖積粘土に近い性状を示すことがわかった.一方,紀伊半島沖の海底地盤は低塑性で 活性が低い粘土であり、過圧密履歴を受けていることもわかった.各地点の非排水せん 断強さを比較した結果は、日本海とメキシコ湾の粘土は直線的な分布形状であり、その 大きさもほぼ等しいことがわかった.一方、南海トラフは非線形な分布形状を示し、強 度は日本海の強度と比べて約3倍以上大きいことがわかった.

遠心載荷実験で対象とする海底地盤の斜面崩壊モードは,文献調査より並進破壊 (Translational failure)と回転破壊(Rotational failure)の2つのモードを対象とすることとした.遠心載荷実験に用いる地盤材料としては,紀伊半島沖の粘性土は低塑性かつ低活性で特殊な粘土であるため,日本海の粘土のような物理,強度特性を持つ粘性土を選定し,深さ方向に比例的に強度が増加するような地盤を作製することが望ましいとの結論に至った.

遠心載荷実験は,基礎実験として日本海の海底地盤を想定した比較的軟弱な粘性土斜 面の回転破壊モードを遠心載荷実験により再現することとした.地震力は地盤モデルを 傾斜させることで水平震度として与える静的載荷実験とした.加えて,海底地盤特有の 条件である静水圧作用条件を実験で再現することとした.地盤模型は,修正フェレニウ ス法およびせん断強度低減法による斜面安定解析を実施して,寸法および斜面傾斜角等 の基本仕様を決定した.さらに地盤作製方法,土槽の仕様,傾斜方法等を検討して実験 計画を作成して概算のスケジュールと費用についても検討した.

さらに動的な地震作用下で検証を行うための遠心振動実験の計画を作成した.具体的 には急勾配海底斜面およびの緩勾配斜面を対象とした実験を行い,前者は円弧すべり破 壊(回転破壊),後者は並進すべり破壊による安定解析法の適用性の検証に資する資料 とすることとした.加えて概算のスケジュールと費用についても検討した.

6 参考文献

[2.1]

- Tada R., Murray, R., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 346 Scienttists, Expedition 346 summary, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 346 expedition reports Asian Monsoon, pp. 23, 2015.
- Tada R., Murray, R., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 346 Scienttists, Site U1422, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 346 expedition reports Asian Monsoon, pp. 64, 2015.
- Tada R., Murray, R., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 346Scienttists, Site U1423, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 346 expedition reports Asian Monsoon, pp. 62, 2015
- 4) Tada R., Murray, R., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 346 Scienttists, Site U1424, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 346 expedition reports Asian Monsoon, pp. 64, 2015.
- 5) Tada R., Murray, R., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 346 Scienttists, Site U1426, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 346 expedition reports Asian Monsoon, pp. 73, 2015.
- 6) Tada R., Murray, R., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 346 Scienttists, Site U1427A, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 346 expedition reports Asian Monsoon, pp. 80, 2015.
- 7) Tada R., Murray, R., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 346 Scienttists, Site U1428 and U1429, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 346 expedition reports Asian Monsoon, pp. 81,82, 2015.
- 8) Tada R., Murray, R., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 346 Scienttists, Site U1430, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 346 expedition reports Asian

Monsoon, pp. 77, 2015.

- 9) Tada R., Murray, R., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 346 Scienttists, Site U1422, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 346 expedition reports Asian Monsoon, pp. 44, 2015.
- 10) Henry, P., Kanamatsu, T., Moe, K., and the Expedition 333 Scienttists, Expedition 333 summary, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 333 expedition reports NanTroSeize Stage2: Subduction inputs 2 and Heat flow, pp. 26, 2012.
- Henry, P., Kanamatsu, T., Moe, K., and the Expedition 333 Scienttists, SITE C0018, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 333 expedition reports NanTroSeize Stage2: Subduction inputs 2 and Heat flow, pp. 47, 48, 2012.
- 12) Henry, P., Kanamatsu, T., Moe, K., and the Expedition 333 Scienttists, SITE C0011, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 333 expedition reports NanTroSeize Stage2: Subduction inputs 2 and Heat flow, pp. 49, 51, 2012.
- 13) Henry, P., Kanamatsu, T., Moe, K., and the Expedition 333 Scienttists, SITE C0012, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 333 expedition reports NanTroSeize Stage2: Subduction inputs 2 and Heat flow, pp. 52, 54, 2012.
- 14) Hugh Daigle and Brandon Dugan, Data report: permeability, consolidation, stress state, and pore system characteristics of sediments from Sites C0011, C0012, and C0018 of the Nankai Trough, Proceedings of the Integarated Ocean Drilling Program Volume 333 expedition reports NanTroSeize Stage2: Subduction inputs 2 and Heat flow, pp. 13-15, 2012.
- 15) 西尾伸也,荻迫 栄治,傳田 篤,平川博之,東部南海トラフ海底地盤の力学的性質,地盤工学会誌, Vol. 63, No.2, pp. 30-33, 2015.
- Flemings, P.B., Behrmann, I.H., John, C.M., and the Expedition 308 Scienttists, IODP Expedition 308 Site Map, 2006.
- 17) Flemings, P.B., Behrmann, I.H., John, C.M., and the Expedition 308 Scienttists, Site U1319, pp.50, 54, 2006.
- 18)Flemings, P.B., Behrmann, I.H., John, C.M., and the Expedition 308 Scienttists, Site U1320, Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 308, pp. 50,54, 2006.

- 19) Flemings, P.B., Behrmann, I.H., John, C.M., and the Expedition 308 Scienttists, Site U1322, Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 308, pp. 56, 61, 2006.
- 20) Flemings, P.B., Behrmann, I.H., John, C.M., and the Expedition 308 Scienttists, Site U1324, Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 308, pp. 60, 65, 2006.

[2.2]

- 松本一明,堀江宏保,小川富美子,小林茂雄:大水深におけるボーリングおよびサンプリングの現状(第2報) -海底着座型,不攪乱試料自動採取装置についてー, 港湾空港技術研究所 資料 0295, pp.1-59, 1978 年 6 月.
- 2) 松本一明, 堀江宏保, 小川富美子, 小林茂雄: 海底着座型長尺サンプル採取装置(MAS-76)の開発について, 港湾空港技術研究所 資料 0306, pp.1-26, 1978 年 9月.
- 3) 松本一明,小川富美子:港湾地域における土の工学的諸係数の相関性について(第 1報),港湾空港技術研究所 資料 0071, pp.1-42, 1969 年 6 月.
- 小川富美子,松本一明:港湾地域における土の工学的諸係数の相関性,港湾空港技術研究所 報告 017-03-01, pp.1-88, 1978 年 9 月.
- 5) 土田孝,小林正樹,菊池喜昭:土質調査結果に及ぼす人為的要因の影響,港湾空港 技術研究所 資料 0546, pp.1-44, 1986 年 3 月.
- 6)田中政典:地盤の調査方法が沿岸域に分布する土の物性評価に与える影響の研究,
 港湾空港技術研究所 資料 1068, pp.1-107, 2003 年 12 月.
- 7) 堀江宏保,善功企,石井一郎,松本一明:大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質(その1)ボーリング及びサンプリング,港湾空港技術研究所 資料 0498-01, pp.1-37, 1984年9月.
- 8) 石井一郎,小川富美子,善功企:大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質(その2)物理
 的性質・圧密特性・透水性,港湾空港技術研究所 資料 0498-02, pp.1-43, 1984 年 9
 月.
- 9) 土田孝, 菊池喜昭, 中島謙二郎, 小林正樹: 大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質(その3) 静的せん断特性, 港湾空港技術研究所 資料 0498-03, pp.1-31, 1984 年 9 月.

- 10) 土田孝,渡部要一,姜敏秀:大阪湾洪積粘土の構造の評価と力学特性,港湾空港技術研究所 報告 041-02-03, pp.1-48,2006 年 6 月.
- M.Badiey, 善功企,山崎浩之,鈴木英男:海底地盤の剛性率に関する現地および室 内実験,港湾空港技術研究所 報告 029-04-01, pp.1-25, 1990 年 12 月.
- 12) 豊蔵勇・岡田篤正・牧野内猛・堀川義夫・長谷川淳:「中部国際空港」海域(知多半島常滑市沖)の海底地形・地質,地学雑誌, Vol. 108 (1999) No. 5, pp. 589-615, 1999 年 11月.
- 13) 渡部要一,田中政典,佐々真志,野口孝俊,宮田正史:東京国際空港D滑走路の事前海底地盤調査結果に関する一考察,港湾空港技術研究所報告048-02-05, pp.1-23, 2009年6月.
- 14) 渡部要一,田中政典,佐々真志,菊池喜昭:信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地盤定数設定法の提案,港湾空港技術研究所報告048-02-06, pp.1-24, 2009年6月.
- 15) 野口孝俊,河村健輔,井上憲,川端利和,堺谷常廣:東京国際空港(羽田空港)建 設技術報告会(第四回)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〜,国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所,東京国際空港建設技 術報告会(第四回)技術報告集, pp.4 1-4 10,2007 年 12 月.
- 16)河村健輔,三木隆之,澤資浩,勝山克二,水野健太,田代聡一:東京国際空港(羽田空港)建設技術報告会(第四回)羽田空港D滑走路埋立部の圧密沈下~感度分析を踏まえた沈下予測~,国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所,東京国際空港建設技術報告会(第四回)技術報告集,pp. 2_1-2_16,2007年12月.
- 17) 野口孝俊,渡部要一,鈴木弘之,堺谷常廣,梯浩一郎,小倉勝利,水野健太:羽田空港 D 滑走路の設計,土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 68, (2012) No. 1, pp.150-162, 2012 年1月.
- 18) 野口孝俊,渡部要一,鈴木弘之,奥信幸,大和屋隆司,渡邊雅哉:羽田空港D 滑走 路埋立部の施工と維持管理,土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 68, (2012) No. 2, pp.305-320, 2012 年 5 月.
- 19) (社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007年版),2 地盤定

数, pp.294-329, 2007.

[2.3]

- 1) 鴫原良介, Juan Horrillo,確率論的手法を用いた海底地すべり津波波源の推定-メキシ コ湾への適用-, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I 281-I285, 2014.
- F. Nadim, H. Einstein and W. Roberds, Probabilistic stability analysis for individual slope in soil and rock, Landslide risk manegement, pp.63-98, 2005.

[3.1]

- 1) Stephan T. Grill et al, A probabilistic approach for determining submarine landslide tsunami hazard along upper east coast of the United state, Marine Geology, 264, pp.74-97, 2007.
- Farrokh Nadim, Risk assessment for earthquake-induced submarine slide, 5th Int Symposium of Submarine Mass Movements and Their Consequences, pp.15-28, 2012.
- Fei Ai, Jannis Kuhlmann, Kartrin Huhn, Michael Strasser, and Achim kopf, Submarione Slope Stability Assessment of the Central Mediterranean Continental Margin: the Gela Basin, , 6th Int Symposium of Submarine Mass Movements and Their Consequences, pp.225-236, 2014.
- 4) Omar Zanoli, Clandio Piatti, Lorenzo Zuccario, and Eric J. Parker, Advances in Offshore Seismic Slope Stability: A Case History, , 6th Int Symposium of Submarine Mass Movements and Their Consequences, pp.153-163, 2014.
- 5) 野田篤, ダービタイトによる地震活動履歴の保存可能性, 月刊地球 海底地盤変動 学のすすめ, pp.14-25, 2010.
- 6) 梶琢他,詳細海底地形図に基づく南海トラフ域の海底地すべり分布とその特徴,月 刊地球 海底地盤変動学のすすめ,pp.49-55,2010.

[3.2]

- 1) 石橋勲・ハザリカヘマンタ: 土質力学の基礎, 共立出版, p271, 2011
- 2) SoilWorks ANALYSIS MANUAL Part3 Slope Stability Chapter 1 斜面安定解析

p3-3~3-5, 2015

3) 社団法人 地盤工学会:斜面の安定・変形解析入門-基礎から実例まで-, p26, p44-45, 2006


図 7-1 a-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 5度



図 7-2 b-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 15度



図 7-3 c-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 25度



図 7-4 d-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 35 度

静的			修正フェレニウス法 k _h =0.1		
	SoliWorks ¹			SoilWorks"	
基準安全率	1.000	判定	基準安全率	1.000	判定
解析安全率	0.897	NG	解析安全率	0.667	NG
修正フェレニウス	ス法 k _h =0.2		修正フェレニウン	ス法 k _h =0.3	
	SallWorks - allowed - allowed			SolfWorks with a company com	
基準安全率	1.000	判定	基準安全率	1.000	判定
解析安全率	0.529	NG	解析安全率	0.438	NG
修正フェレニウス	ス法 k _h =0.5				
基準安全率	1.300	判定			
解析安全率	0.324	NG			

図 7-5 e-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 45度



図 7-6 f-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 55度

静的			せん断強度低減法 k _h =0.1			
		A strand of a strand a		2		
基準安全率	1.000	判定	基準安全率	1.000	判定	
解析安全率	3.450	ОК	解析安全率	2.650	ОК	
せん断強	度低減法 k _h =0.2		せん断強」	度低減法 k _h =0.3		
		Comparison C			1 212-224 - 212-24-24 - 212-24 - 2	
基準安全率	1.000	判定	基準安全率	1.000	判定	
解析安全率	1.213	ок	解析安全率	0.837	NG	
せん断強	度低減法 k _h =0.5					
		Webries				
基準安全率	1.000	判定				
解析安全率	0.512	NG				

図 7-7 a-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 5度



図 7-8 b-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 15度



図 7-9 c-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 25度



図 7-10 d-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 35 度



図 7-11 e-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 45度



図 7-12 f-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 55度



図 7-13 A-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 5度



図 7-14 B-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 15度



図 7-15 C-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 25度



図 7-16 D-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 35度



図 7-17 E-1) 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 45度



図 7-18 F-1 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 55度



図 7-19 A-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 5度



図 7-20 B-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 15度



図 7-21 C-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 25度



図 7-22 D-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 35 度



図 7-23 E-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 45度



図 7-24 F-2) せん断強度低減法 斜面勾配角度 55度



図 7-25 修正フェレニウス法 斜面勾配角度 35度



図 7-26 せん断強度低減法 斜面勾配角度 35度



図 7-27 傾斜台図面



図 7-28 変位計



変換器

圧力変換器

小型・軽量で高安定性・ 高応答性に優れた圧力変換器

取り付けスペースが制約される場所での圧力測定に満 した、小型、軽量で安定性の良い圧力変換器です。 先端 部にセミフラッシュダイヤフラムを採用しているため、応 苦性に優れ動的特性が良好です。ケーブルが取り外し 可能なAタイプと、ケーブルー体型のBタイプの2種類が ■単日編版 ホスケット(激励)(SS-105 01)レクも使用可能) あります。

-	主体容易	2.010
	新建設計	#0 YMPOLINEQUIPUCINFORT TAXED SHIPOLINE
	ヒステリシス	AD 216400 (2017) Sold Table 0 1940 (2017)
1	線り返し信	0.2%ROMTY
	建築能力	20011/14020+1010/10/10/10/10/10/10/10
	1-1-1-10	12MP201714+30%7
	許容品改和用	-30-700
	追求解放机器	~10-BITC
	単点の正式影響	*0.017M-RCF/Calify
i.		[2MPvis:1918+0.091080/103890
	法力の混成影響	AD-D396/PCUDN
	許容印於希任	BV AC#514DC
	推制印放電圧	1-JU ACARHOC
	入力抵抗	3500392%
5	出力的抗	350042N
Ŧ	サーブル	Pla A A B IRmm" #65ikFeZA im.
ł.	aller of a	件様4.0mm、測定器費洗減コネタダプラブ
		PGL-0-9.0.08mint. 44/9-3/HC=3.30cm.
		Prife 3 2mm、内容コチアクフラグ
	1.1	「「一市ドは市体に施修されていたれん」
	許算過発育	950%
	出来的影响	8.910
÷	87 M	無原課 505630
ī.		何102日本一アル当ます)
1	使潮导器	PGE-A.A.1 P67105.< 09201
	in and	PGL-A-B : IPG4CIS-C 09200
	取付ねら	GI/E MAC

2 2 2		and the second s	the second state of the	
····: 1340998	*+25@HL#	-2.55.00.00	Number of Contract	
PGL-A-IMP-A	PGL-A-1MF-B	15,45a	484/45	
PSE-A-2MP-A	POCA-3MP-8	30.6%	74899	
PGL-A SAIP-A	POL-A-SMP-B	UMPH	12,24/0	
PELA TOMP A	PGCA.10MP-H	10MP/r	1/252242	
PGE-A-JOMP-A	PGL-A-20MP-E	20MPw	21001	
PGLA SOMP.A	PGCA SOMP 8	SOMPA	294641	





図 7-29 圧力計