首都直下地震の地震波形の解析

1. 目的

近年、内閣府において検討が進められている首都直下地震等の新たな大規模な地震に対 する屋外タンク貯蔵所の耐震安全性について確認を行うために必要な、地震波形の作成を 行うことを目的とする。

地震波形の作成については、一定の妥当性があることを確認している平成26年度の南海 トラフ地震の解析手法を踏襲することとする。ここで、石油コンビナート等災害防止法第2 条第2項に規定する石油コンビナート等特別防災区域(以下「特防区域」という。)におけ る首都直下地震の工学的基盤波形を用いて地表面の地震波形の作成を行う。

- 2. 首都直下地震の地表面での地震波形の解析
- 2.1 首都直下地震の概要

内閣府上による首都直下地震の震源域を図2.1-1に示す。このうち国が防災対策上の 対象地震としており、地震波形が公開提供されている「都心南部直下(Mw7.3)」の地震を、 本検討においても対象地震とする。



図2.1-1 首都直下地震の震源域

¹ 内閣府首都直下地震モデル検討会:首都直下のM7クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書 (平成25年12月19日発表)

2.2 地表面での地震波形の解析の流れ

図2.2-1に示す手順により、首都直下地震の想定地震波形を作成する。

内閣府が作成した工学的基盤における首都直下地震の地震波形は、震源モデルや既知の 歴史地震との比較分析により妥当性が確認されている。また、今回の作成手法は、一定の 妥当性があることを確認している平成 26 年度の南海トラフ地震の地震波形の作成手法

(第2部第1章)と同様の手法を用いる。一方、内閣府から公開された想定地震波形については、統計的グリーン関数法により工学的基盤約1kmメッシュごとに推計した結果であり、統計上のばらつきが生じている可能性があること、また、解析対象とする特防区域で複数のメッシュが存在することから、対象地域の地震波形を選定する際には統計的に処理して妥当性を確認する。なお、統計的グリーン関数法により推計された地震波形は、南海トラフ地震の長周期地震動などで採用されている三次元差分法による推計と異なり、主に短周期成分に着目した結果であることに留意する必要がある。



図2.2-1 地表面地震波形の解析の流れ

2.3 対象地区

中央防災会議から公開されている首都直下地震による震度分布(図2.3-1)を参照 して、東京湾沿岸の特防区域のうち、大規模な屋外タンク貯蔵所が多数所在し、かつ、想 定震度が震度6強となる主な特防区域として、京浜臨海、根岸臨海、京葉臨海中部の3地 区を選定した。



図2.3-1 首都直下地震による震度分布出典:内閣府首都直下地震モデル検討会:

首都直下のM7クラスの地震及び相模トラフ沿いのM8クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書 図表集(平成25年12月19日発表)

2. 4 計算に用いる波形

中央防災会議から公開されている解析対象地区の工学的基盤での波形(1km メッシュ 毎)から各地区に存在するタンクのバルジング固有周期帯で加速度応答スペクトルが最大 となる波形を選定した。表2.4-1に最大加速度値を示す。また、工学的基盤での波形 及びスペクトルを図2.4-1~図2.4-12に示す。

为在地区	最大加速度(cm/s ²)			
刈豕地区	NS	\mathbf{EW}		
京浜臨海地区	220.5	562.4		
根岸臨海地区	168.4	469.3		
京葉臨海中部地区	442.6	46.8		

表2. 4-1 首都直下地震の工学的基盤での最大加速度



図2.4-1 京浜臨海地区(川崎)の内閣府(2013)波形公開位置(約1kmメッシュ) と採用波形の位置



 図2.4-2 京浜臨海地区(川崎)の全メッシュと平均の加速度応答スペクトル (EW 成分 h=5%)



図2. 4-3 泉浜臨海地区(川崎)の平均と周期 0.2~0.8 秒での敢人の加速度応答ス クトル(EW 成分 h=5%)



図2. 4-4 京浜臨海地区(川崎)で採用した時刻歴波形と応答スペクトル(h=10%)



図2.4-5 根岸臨海地区の内閣府(2013)波形公開位置(約1kmメッシュ) と採用 波形の位置





(EW 成分 h=5%)



図2. 4-8 根岸臨海地区で採用した時刻歴波形と応答スペクトル(h=10%)



図2.4-9 京葉臨海中部地区の内閣府(2013)波形公開位置(約1kmメッシュ) と 採用波形の位置



(NS 成分 h=5%)



図2.4-11 京葉臨海中部地区の平均と周期 0.1~1.0 秒での最大の加速度応答スペクトル (NS 成分 h=5%)



図2. 4-12 京葉臨海中部地区で採用した時刻歴波形と応答スペクトル(h=10%)

2.5 地盤構成の検討

地震応答解析を考えた場合、地盤構成、物理特性及び動的変形特性等を適切に考慮して 設定することが重要である。また、屋外タンク貯蔵所の基礎・地盤については、液状化対 策が行われていることが前提となる。したがって、関係団体より提供されたデータ(地盤 調査及び液状化対策工法に関する資料)を詳細に吟味するとともに、既往調査資料や各種 文献などのデータも参考にしながら定数を設定した。

(1) 京浜臨海地区

設定した地盤モデルについて図2.5-1に示す。埋め立て地盤であり、地表から深さ 10m 付近までN値 10 前後の砂質土層と深さ 10m~30m 付近まで粘性土層の有楽町層と呼 ばれる沖積層、その下部には粘性土と砂質土の互層となる洪積層が深さ 70m 付近まで続 き、S 波速で 450m/s となる礫質層が工学的基盤となる地盤構成となっている。図2.5 -1に示す港湾地域強震観測(川崎地-M)が設置されている地点の地盤情報等を元にモデ ル化を行った。動的変形曲線は、池田ら(2012)²(図2.5-2)を参考に設定した。

また、図2.5-3及び図2.5-4で示すように東京湾で発生した地震による観測記 録を用いて再現計算を行ったうえで、モデルの妥当性を確認した。

(2) 根岸臨海地区

設定した地盤モデルについて表2.5-2に示す。埋め立て地盤であり、地表から深さ 6m 程度でN値50以上、S波速で470m/s、工学的基盤となる上総層群が確認され、その 上部に沖積の砂質土層や粘性土層が薄く堆積する地盤構成となっている。原地盤の地盤情 報を元にモデル化を行った。図2.5-5に示す横浜市が公開している柱状図3を基本 に、図2.5-6港湾地域強震観測(山下-F)が設置されている地点の地盤情報等を元に モデル化を行った。動的変形曲線は、京浜臨海地区同様に池田ら(2012)より設定した。

根岸臨海地区周辺には一般公開されている地震観測記録はなく、その妥当性は検証でき ていないが、地盤モデルが比較的単純であるため影響は少ないと判断した。

(3) 京葉臨海中部地区

設定した地盤モデルについて表2.5-3に示す。埋め立て地盤であり、地表から深さ 20m付近までN値5~15前後の砂質土層、N値0~3前後の粘性土層からなる沖積層が堆 積している。沖積層の下には埋没した段丘堆積物であるN値50を確認する洪積層があ り、一般的な杭基礎などはこの層を基盤としている。しかし、下部にはN値20以上では

² 池田他(2012):地盤の非線形地震応答解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震における東京湾臨海部の地震時挙動の検討,土木学会第 67 回年次学術講演会 I-232

³ 横浜市地盤地図情報 「地盤View(じばんびゅー)」

http://wwwm.city.yokohama.lg.jp/agreement.asp?dtp=3&

あるものの洪積の粘性土層があらわれ、50m 付近で N 値 50 以上と工学的基盤となるよう な砂質土層からなる地盤構成となっている。図2.5-7に示す千葉県が公開している柱 状図 4を基本に、図2.5-8に示す港湾地域強震観測(千葉-G)が設置されている地点 の地盤情報等を元にモデル化を行った動的変形曲線は、京浜臨海地区同様に池田ら

(2012)を参考に設定した。

さらに、港湾地域強震観測(千葉・G)においては、図2.5-9及び図2.5-10で 示すように、H23 東北地方太平洋沖地震等による観測記録を用いて再現計算を行ったうえ で、観測記録の増幅特性などを再現できるS波速度を設定するなど地盤定数のチューニン グを行い、工学的基盤のS波速度を700m/sに設定するなどモデル化に反映した。

	深さ(m)		代書 N	密度	P 波速度	S 波速度	
記号	記号 土質	上端	下端	值	<i>p</i> (t/m3)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)
FI	埋土·盛土	0.00	0.50	5	1.90	460	150
SF	沖積砂質土	0.50	5.00	5	1.95	1500	150
SF	沖積砂質土	5.00	12.00	12	1.95	1500	190
М	沖積シルト	12.00	16.00	3	1.65	1500	130
М	沖積シルト	16.00	32.00	3	1.65	1500	150
С	沖積粘性土	32.00	42.50	5	1.65	1500	210
SF	洪積砂質土	42.50	46.50	30	1.85	1500	380
С	洪積粘性土	46.50	52.50	14	1.70	1500	250
SF/M	洪積砂質土	52.50	60.50	30	1.70	1500	250
М	洪積シルト	60.50	68.00	14	1.70	1500	250
GF	礫質土	68.00	74.00	50	2.00	1500	450

表2.5-1 京浜臨海地区の地盤モデル

⁴ 千葉情報マップ https://www.pref.chiba.lg.jp/jousei/chibamap/





図2.5-2 京浜臨海地区で参考にした動的変形曲線



図2.5-3 2005.6の東京湾での地震の再現計算結果(京浜臨海地区NS成分)



		深さ(m)		代表 N	密度	P 波速度	S 波速度
記号	土質	質 上端 下端 値	值	$(+/m^2)$	Vp	Vs	
			下业面	IL I	μι/ms/	(m/sec)	(m/sec)
FI	埋土·盛土	0.00	2.40	10	1.60	380	160
S	沖積砂質土	2.40	4.80	11	1.70	1290	230
М	沖積シルト	4.80	6.00	3	1.60	1530	220
R	岩盤	6.00	8.35	50	1.90	1790	470

表2.5-2 根岸臨海地区の地盤モデル

土 質 柱 状 図





		深さ(m)		↔ ≠ N	密度	P 波速度	S 波速度
記号	土質	►☆柴	下进	値	<i>p</i> (t∕m3)	Vp	Vs
		L 2m	1、五四			(m/sec)	(m/sec)
В	埋土·盛土	0.00	1.20	13.0	1.60	460	100
As1	沖積砂質土	1.20	2.50	6.0	1.60	1410	100
Ac1	沖積粘性土	2.50	4.30	0.0	1.50	1410	100
As2	沖積砂質土	4.30	11.70	16.1	1.80	1410	150
Ac2	沖積粘性土	11.70	19.40	3.1	1.70	1410	120
Ds1	洪積砂質土	19.40	22.80	43.7	2.00	1580	290
Dc1	洪積粘性土	22.80	26.05	25.3	2.00	1580	290
Dc2	洪積粘性土	26.05	32.80	46.9	2.00	1580	290
Dc3	洪積粘性土	32.80	48.10	28.8	1.90	1580	250
Ds2	洪積砂質土	48.10	50.00	41.5	2.00	1500	290
Ds3	洪積砂質土	50.00	53.44	50.0	2.20	1640	700

表2.5-3 京葉臨海中部地区の地盤モデル



図2.5-7 京葉臨海中部地区の参考とした柱状図例(千葉マップ)



図2.5-8 京葉臨海中部地区の参考とした柱状図例(港湾強震計 千葉-G)



図2.5-9 H23 東北地方太平洋沖地震の再現計算結果(京葉臨海中部地区 NS 成分)



$\mathbf{27}$

図2.5-10 H23 東北地方太平洋沖地震の再現計算結果(京葉臨海中部地区 EW 成分)

2.6 地盤の地震応答解析【工学的基盤→地表】

これまでの検討結果を踏まえ、中央防災会議による工学的基盤の波形を入力地震波として、対象地区における地表面での地震波形の計算を行った。

地震応答解析は、首都直下地震という大きな地震動を検討対象とするため、同じ全応力 法であるが等価線形解析ではなく、大きなひずみでは精度が高い全応力逐次非線形解析を 採用し、プログラムコードは、一昨年の検討会と同様に『YUSAYUSA-2』5を採用 した。

解析結果を表2.6-1、図2.6-1~図2.6-3、深さごとの最大応答値を図 2.6-4~図2.6-6に示す。

京浜臨海地区では、深さ10m~30m付近の有楽町層においてひずみ0.5%を超えて1% まで達しており、非線形特性が顕著に表れた結果、最大相対変位は25cmと大きくなる一 方、最大加速度は340cm/s²程度に減衰している。

根岸臨海地区では堆積層が薄く、ひずみも最大 0.2%程度であり非線形特性は表れていない。その結果、最大相対変位は最大 1cm と小さいが、最大加速度は 570cm/s²に増幅している。

京葉臨海中部地区では、深さ 10m~20m 付近の有楽町層においてひずみ 0.5%を超えて 非線形特性が表れているが、最大相対変位は 10cm 程度にとどまり、最大加速度は 300cm/s²程度に若干減衰した結果となっている。

分布地区	最大加速度(cm/s ²)				
刈家地区	NS	EW			
京浜臨海地区	130.9	342.3			
根岸臨海地区	242.9	568.5			
京葉臨海中部地区	301.3	86.1			

表2.6-1 首都直下地震の地表での最大加速度

⁵ 吉田望, 東畑郁生: YUSAYUSA-2 SIMMDL-2 理論と使用法 v2.10, 2003







図2. 6-1 京浜臨海地区の地表面での時刻歴波形と応答スペクトル(h=10%)



図2. 6-2 根岸臨海地区の地表面での時刻歴波形と応答スペクトル(h=10%)







図2. 6-3 京葉臨海中部地区の地表面での時刻歴波形と応答スペクトル(h=10%)





図2.6-5 根岸臨海地区の深さ方向最大応答分布



2.7 まとめ

首都直下地震として選定した都心南部直下(Mw7.3)は、フィリピン海プレート内のM 7クラスの地震として、地震の発生場所の想定は難しいが都区部及び首都地域の中核都市 等の直下に想定する地震として設定されたものである。その強震断層モデルはシンプルに 南北に設定されていることから、解析において方位依存性の影響が顕著に表れた結果とな っており、公開波形のNS成分、EW成分のバランスが極端になっていることを考える と、各地域の大きい成分を解析において利用するのが妥当である。図2.7-1に3地区 の最大成分の比較を示す。

最大加速度で比較すると、根岸臨海地区 > 京浜臨海地区 > 京葉臨海中部地区であ る。加速度応答スペクトルで比較すると 0.8 秒より短周期成分で根岸臨海地区が大きく、 長周期成分では京浜臨海地区が大きい結果となっている。

京浜臨海地区は震源からも近く、工学的基盤面での入力地震動は最大であったにもかか わらず、地表での最大加速度値などは一番小さくなっている。この結果は前項2.5で示 した地盤モデル、特に工学的基盤の深さや軟弱な粘土層である有楽町層の層厚の影響によ り、地盤の非線形特性が表れている結果である。図2.7-2に東京湾の海底地形に約2 万年前に古い地層を削った古東京川を示したもの、図2.7-3に関東地方の海進・海退 による地形の変遷を示す。

屋外タンク貯蔵所の固有周期 0.2 秒~0.8 秒付近の加速度応答値では、根岸臨海地区が 一番大きく、京浜臨海地区、京葉臨海中部地区は同程度であることがわかる。

まとめると、3地区において短周期成分が卓越しタンクの浮き上がりなどに一番厳しい 状況が予想されるのは根岸臨海地区である。また、非線形特性が顕著に表れ地震動の長周 期化や大きな地盤変形が予想されるのは京浜地区である。京葉臨海中部地区は、どの周期 帯をとっても、特徴的な2地区の中間的な地震応答結果を示す。



図2. 7-1 3地区の最大成分の時刻歴波形と応答スペクトル(h=10%)



図中緑の部分は陸地を表し、茶色の部分は海底地形を表す。 なお、陸地部の地形の凹凸は表現していない。

図2.7-2 東京湾の海底地形 6

((財)日本水路協会海洋情報センターの海底地形データを参考に作成)

⁶ 社団法人東京都地質調査業協会:技術ノート(No.37)特集東京湾(平成16年11月)



図2a:12.5万年前



図2c:7千年前



図2b:2万年前



図2d:現在

図2.7-3 関東地方の海進・海退による地形の変遷(赤線は現在の海岸線を示す。).7 (「日本の自然4 日本の平野と海岸」:貝塚爽平他(岩波書店)、に加筆)

⁷ 社団法人東京都地質調査業協会:技術ノート(No.37)特集東京湾(平成16年11月)