

東京湾岸地域におけるLNG地下式貯槽のスロッシングについて (その1: 過去の巨大地震による評価)

神谷篤志¹・渡辺 修²・岡本 隆³・塩原一男⁴

¹東京ガス株式会社 生産技術部 (〒105 港区海岸 1-5-20)

²正会員 工修 東京ガス株式会社 生産技術部 (〒105 港区海岸 1-5-20)

³正会員 工博 NKK 基盤技術研究所 都市工学研究部 (〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)

⁴工修 NKK 貯蔵基地システム技術部 (〒163-10 新宿区西新宿 3-7-1)

東京湾岸地域(根岸・扇島・袖ヶ浦)のLNG地下式貯槽において発生するスロッシング挙動を予測するために、高圧ガス設備等耐震設計基準の運用に関する通達に示されている時刻歴応答解析を行う場合の第2設計地震動の6実地震波記録に、さらに関東大地震、日本海中部地震(新潟)、新潟地震(秋田)、の3記録を加え、計9地震波(計11地震波成分)に対するスロッシング波の発達過程、波面モード、発生波高について検討した。

Key Words: LNG storage tank, Sloshing, Seismic response analysis, Tokyo bay area

1. はじめに

スロッシング挙動の解明は、液体貯槽の設計・保全上重要な課題である。本稿では、高圧ガス設備等耐震設計基準の運用に関する通達¹⁾に示されている時刻歴応答解析を行う場合の第2設計地震動の6実地震波記録に、さらに関東大地震、日本海中部地震(新潟)、新潟地震(秋田)、の3記録を加え、計9地震波(計11地震波成分)に対する東京湾岸地域に位置するLNG地下式貯槽のスロッシング波の発達過程、波面モード、発生波高について検討した結果を報告する。

2. 入力実地震波

入力した実地震波は、次の9地震波、11地震波成分である。

- ① 1964年新潟地震の川岸町におけるNS方向地震記録から得られる地震波
- ② 1968年十勝沖地震の八戸におけるEW方向地震記録から得られる地震波
- ③ 1933年三陸沖地震の本郷(東京大学構内)におけるNS方向地震記録から得られる地震波
- ④ 1974年伊豆半島沖地震の本郷(東京大学構内)におけるNS方向地震記録から得られる地震波
- ⑤ 1974年伊豆半島沖地震の本郷(東京大学構内)

におけるEW方向地震記録から得られる地震波

- ⑥ 1978年宮城県沖地震の塩釜工場(塩釜港)におけるEW方向地震記録から得られる地震波
- ⑦ 1923年関東大地震
- ⑧ 1983年日本海中部地震(新潟: NS成分)
- ⑨ 1983年日本海中部地震(新潟: EW成分)
- ⑩ 1964年新潟地震(秋田: NS成分)
- ⑪ 1964年新潟地震(秋田: EW成分)

①～⑥は、高圧ガス設備等耐震設計基準に関する通達に示されている時刻歴応答解析を行う場合の第2設計地震動である。②は、文献2)による。③～⑤は、東京大学地震研究所よりデータの提供を受けた³⁾。⑦～⑪は、文献4)のデータに文献5)のフィルターにより補正し作成した。⑦は、文献6)による。⑧～⑪は、気象庁1倍強震計の記録から作成した⁷⁾。なお、地震波は、原記録のレベルのまま入力した。

3. 解析手法・解析対象貯槽

スロッシング波の応答は、軸対称線形ポテンシャル理論により求めた。この時、モードは、10次まで重ね合わせ、減衰定数は、0.5%とした。解析対象貯槽は、6種類の東京湾岸地域に位置するLNG地下式貯槽である。これら貯槽の諸元およびスロッシング波の1次～3次の固有周期を表-1に示す。

表-1 貯槽諸元および発生スロッシング最大波高

貯槽番号 No.		1	2	3	4	5	6	
所在地		袖ヶ浦	扇島	袖ヶ浦	根岸	根岸	袖ヶ浦	
貯槽記号		S-1	O-1	S-2	N-1	N-2	S-3	
直径 D (m)		64.00	72.00	60.00	68.13	64.00	64.00	
液深 H (m)		18.70	49.20	21.30	55.10	29.50	40.40	
半径 R (m)		32.00	36.00	30.00	34.07	32.00	32.00	
H/R		0.584	1.367	0.710	1.617	0.922	1.263	
固有周期	1次 T1(sec)	9.405	8.934	8.719	8.656	8.654	8.448	
	2次 T2(sec)	4.927	5.216	4.764	5.074	4.918	4.917	
	3次 T3(sec)	3.886	4.122	3.763	4.010	3.886	3.886	
①新潟地震 NS	スロッシング波高 η (m)	1.76	1.96	1.02	1.54	1.24	1.32	
	発生時刻 (sec)	29	22	12	22	22	36	
②十勝沖地震 EW	スロッシング波高 η (m)	0.46	0.54	0.47	0.53	0.50	0.51	
	発生時刻 (sec)	11	11	11	11	11	11	
③三陸沖地震 NS	スロッシング波高 η (m)	0.27	0.33	0.38	0.41	0.39	0.29	
	発生時刻 (sec)	238	407	418	422	418	421	
④伊豆半島沖地震 NS	スロッシング波高 η (m)	0.30	0.40	0.34	0.39	0.37	0.41	
	発生時刻 (sec)	81	85	85	84	119	130	
⑤伊豆半島沖地震 EW	スロッシング波高 η (m)	0.22	0.26	0.20	0.20	0.21	0.18	
	発生時刻 (sec)	86	120	93	88	131	96	
⑥宮城県沖地震 EW	スロッシング波高 η (m)	0.34	0.41	0.39	0.42	0.41	0.43	
	発生時刻 (sec)	11	11	11	11	11	11	
⑦関東大地震	スロッシング波高 η (m)	1.49	1.30	0.88	0.89	0.83	0.85	
	発生時刻 (sec)	72	66	61	60	61	28	
⑧日本海中部地震 (新潟) NS	スロッシング波高 η (m)	1.35	1.80	1.56	1.80	1.68	1.45	
	発生時刻 (sec)	140	273	186	186	190	189	
⑨日本海中部地震 (新潟) EW	スロッシング波高 η (m)	0.65	0.89	1.36	1.78	1.67	1.76	
	発生時刻 (sec)	237	276	270	266	265	259	
⑩新潟地震 (秋田) NS	スロッシング波高 η (m)	0.24	0.22	0.20	0.31	0.27	0.33	
	発生時刻 (sec)	183	243	289	310	314	145	
⑪新潟地震 (秋田) EW	スロッシング波高 η (m)	0.52	0.72	0.61	0.67	0.62	0.46	
	発生時刻 (sec)	275	237	158	162	154	169	
60cm三波共振		スロッシング波高 η (m)	6.57	8.20	7.17	8.26	7.77	8.15

4. 解析結果

各地震波、各貯槽に対するスロッシング最大波高と、その最大波高の生じた時刻を表-1に示す。図-1には、波面のモードの一部を、また、図-2には、貯槽側壁における波高の時刻歴の一部を示す。これら、スロッシング応答解析結果より次のことが考察される。1) 新潟地震(川岸町)では、図-1(a)に示すように2次モードの影響が大きく、最大波高は、貯槽側壁ではなく貯槽中央で生じる。2) 十勝沖地震では、高次モードの波が生じる(図-1(b))。これは、この地震の速度応答スペクトル値のピークが2~3秒にあることから推察できる。3) 伊豆半島沖地震(NS、EW)では、図-2(c)に示すように各貯槽ともほぼ10波程度で最大波高に達する。また、図-1(c)の例に示すように高次モードの波も一部発生するが、ほぼ1次モードで動揺する。4) 関東大地震入力時は、図-1(d)、図-2(d)に示すように、すべての貯槽において、ほぼ1次モードで動揺する。5) 日本海中

部地震では、図-2(e)に示すように、貯槽により発達過程が異なり、波高が一度発達し、小さくなり、また発達する過程をたどる貯槽もある。発達過程は貯槽により異なるが、すべての貯槽において、ほぼ1次モードで動揺する(図-1(e))。6) 新潟地震(秋田)では、川岸町と異なり1次モードが卓越して動揺する(図-1(f))。

各貯槽において発生するスロッシング波高を考察するために、貯槽の1次固有周期とスロッシング波高から逆算した速度応答スペクトルの値 S_v を図-3に示す。この図には、60cm三波共振法により発生する波高から逆算した速度応答スペクトルの値も示した⁹⁾。なお、速度応答スペクトルの値 S_v は、文献9)より次式(1)および(2)を導き、スロッシング波高から逆算した。

$$\eta = \frac{D_H}{2g} D\left(\frac{2\pi}{T_s}\right) \cdot 2.63 \eta \quad (1)$$

$$\eta = \frac{D}{2g} \left(\frac{2\pi}{T_s}\right) \cdot 0.837 S_v \quad (2)$$

ここに、 η : スロッシング波高、 D_H : 変位片振幅、 D : 貯槽直径、 T_s : スロッシング固有周期、 g : 重力加速度、 n : 入力波数、 S_v : 速度応答スペクトル値 である。

この図が示すように、上記の解析により求めたスロッシング波高から逆算した速度応答スペクトルの値は、最大で約100kineであり、60cm三波共振法によるそれよりかなり小さい値である。

表-2には、現設計法^{8), 9)}と比較するために、解析により求めたスロッシング波高から、上記設計法の変位片振幅60cmを一定にした場合の最大波高が発生する波数 n を、また、最大波高が発生する波数を3(三波共振)としたときの変位片振幅の大きさを示した。この表から判るように、変位片振幅を60cmとした場合、 $n=0.1\sim0.5$ 波程度であり、3波共振とした場合の変位片振幅は、最大10cm程度である。

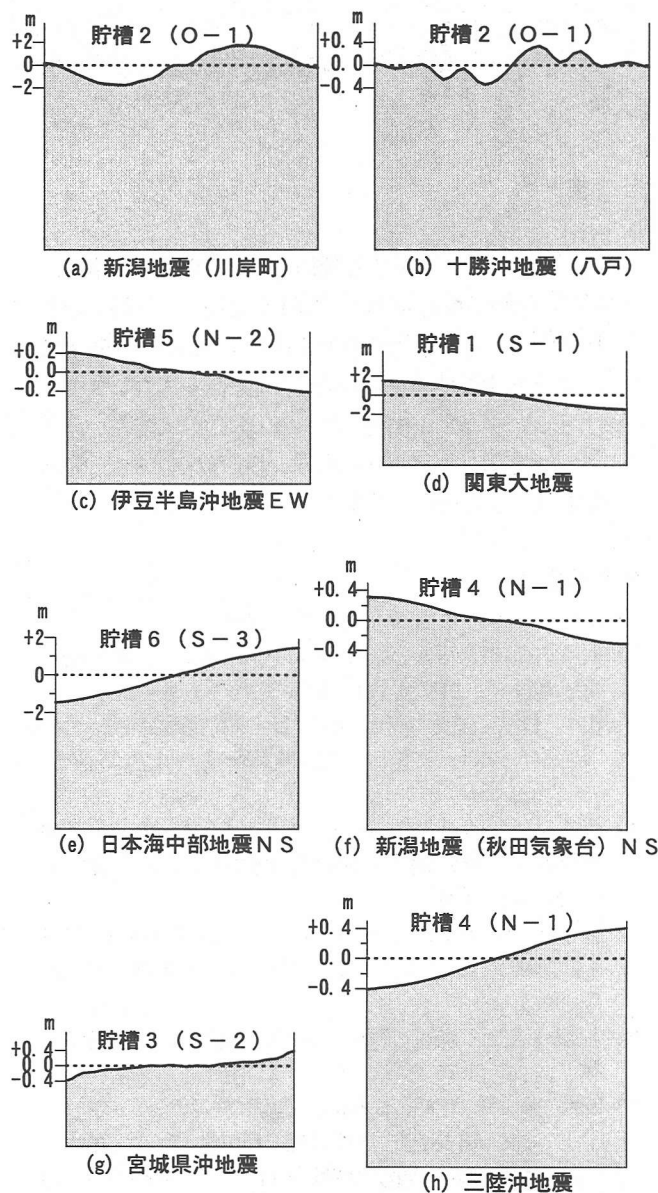
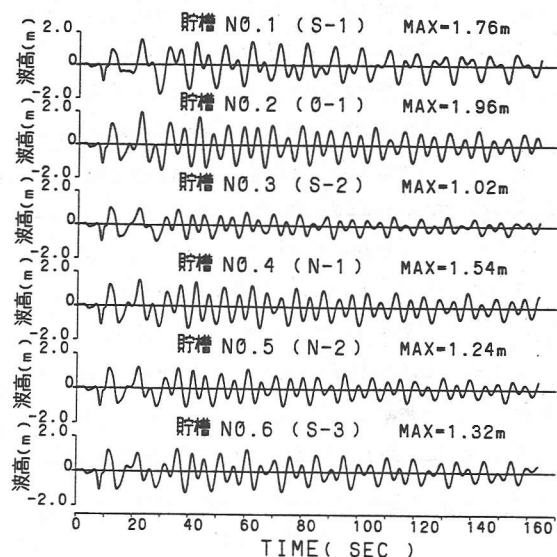
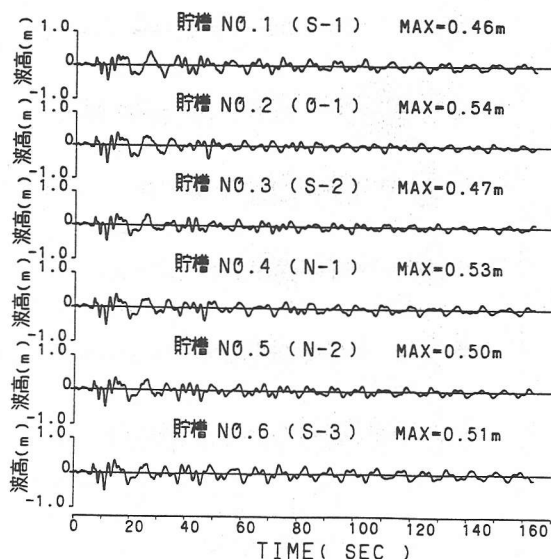


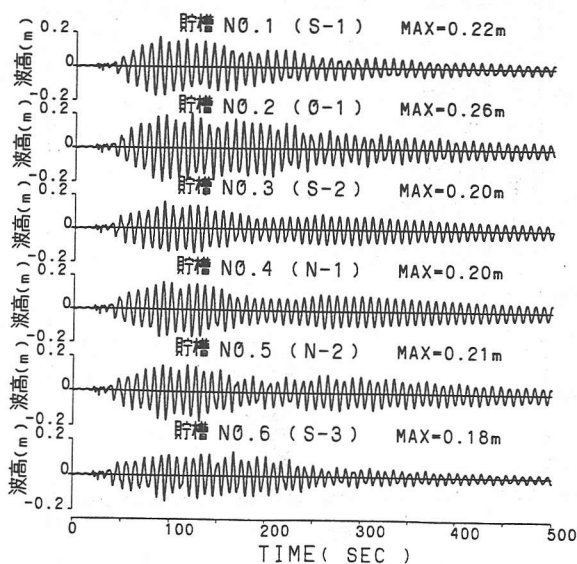
図-1 波面モード



(a) 新潟地震 (川岸町)



(b) 十勝沖地震EW

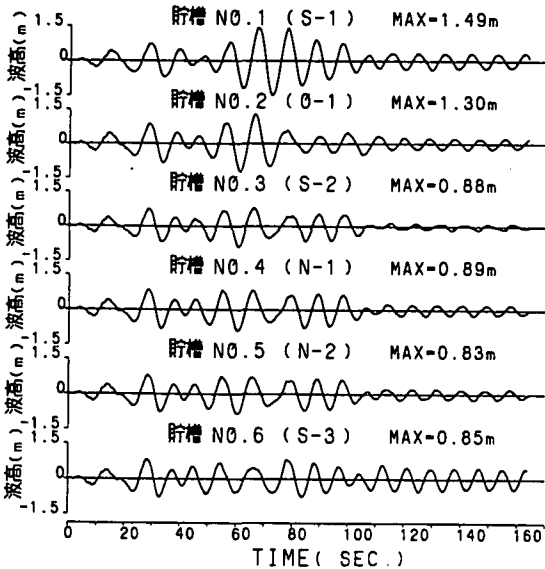


(c) 伊豆半島沖地震EW

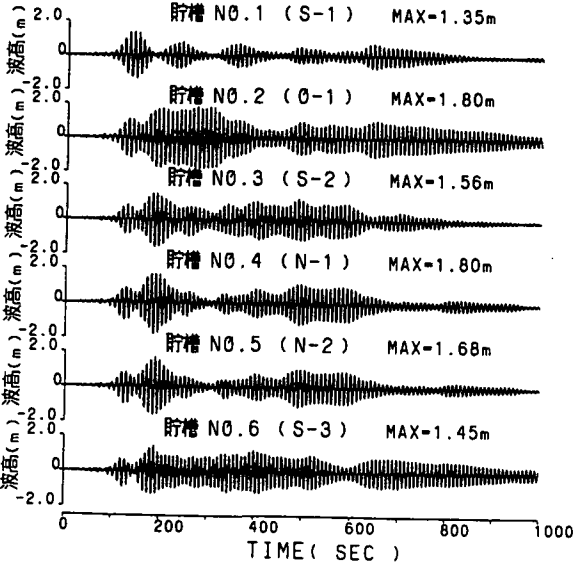
表-2 現設計法との比較

貯槽番号 No.	1	2	3	4	5	6
所在地	袖ヶ浦	堀島	袖ヶ浦	根岸	根岸	袖ヶ浦
貯槽記号	S-1	O-1	S-2	N-1	N-2	S-3
①新潟地震	波数 n	0.51	0.48	0.29	0.39	0.33
NS	片振幅 (cm)	10.23	9.62	5.86	7.74	6.63
②十勝沖地震	波数 n	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13
EW	片振幅 (cm)	2.67	2.65	2.70	2.66	2.66
③三陸沖地震	波数 n	0.08	0.08	0.11	0.10	0.10
NS	片振幅 (cm)	1.57	1.62	2.18	2.06	2.09
④伊豆半島沖地震	波数 n	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11
NS	片振幅 (cm)	1.74	1.96	1.95	1.96	1.98
⑤伊豆半島沖地震	波数 n	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
EW	片振幅 (cm)	1.28	1.28	1.15	1.01	0.94
⑥宮城県沖地震	波数 n	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11
EW	片振幅 (cm)	1.98	2.01	2.24	2.11	2.19
⑦関東大地震	波数 n	0.43	0.32	0.25	0.22	0.22
	片振幅 (cm)	8.66	6.38	5.06	4.47	4.44
⑧日本海中部地震 (新潟) NS	波数 n	0.39	0.44	0.45	0.45	0.38
	片振幅 (cm)	7.84	8.83	8.96	9.04	8.98
⑨日本海中部地震 (新潟) EW	波数 n	0.19	0.22	0.39	0.45	0.45
	片振幅 (cm)	3.78	4.37	7.81	8.94	8.93
⑩新潟地震 (秋田) NS	波数 n	0.07	0.05	0.06	0.08	0.07
	片振幅 (cm)	1.39	1.08	1.15	1.56	1.44
⑪新潟地震 (秋田) EW	波数 n	0.15	0.18	0.18	0.17	0.12
	片振幅 (cm)	3.02	3.53	3.51	3.37	2.40

波数 n : 片振幅を60cmとした時の波数 n
片振幅 : 波数を3とした時の片振幅 (cm)



(d) 関東大地震



(e) 日本海中部地震NS

図-2 貯槽側壁における波高の時刻歴

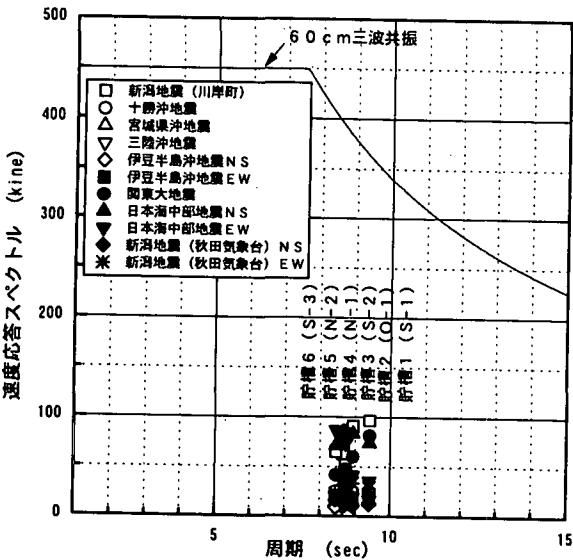


図-3 貯槽の一次固有周期と速度応答スペクトル

5. まとめ

東京湾岸地域に位置する6種類のLNG地下式貯槽に、高圧ガス設備等耐震設計基準に関する通達に示されている時刻歴応答解析を行う場合の第2設計地震動および関東大地震、日本海中部地震、新潟地震の地震動を入力した場合のスロッシング挙動を検討した。発生した最大波高から逆算した速度応答スペクトルの値は、現設計法である60cm三波共振法によるそれよりかなり小さい値である。

参考文献

- 1) 昭和57年1月22日57立局第23号通達
- 2) 八戸港における強震記録 (1968年十勝沖地震) の補正波形, 建築雑誌, Vol. 91, No. 1107, 昭和51年5月号
- 3) 田中 貞二, 吉沢 静代, 大沢 胖: やや長周期帯域における強震動の特性, 東京大学地震研究所集報, Vol. 54, pp629-655, 1979
- 4) 倉田 栄一, 井合 進, 横山 淑子, 土田 肇: 1978年宮城県沖地震の港湾地域における強震記録, 港湾技研資料, No. 319, 1979
- 5) 後藤 尚男 他: デジタルフィルタによるSMAC-B2加速度計記録の補正について, 土木学会論文報告集, 第227号, 1978
- 6) 那須 信治, 森岡 敬樹: 烈強震の地動 (5), 建築技術, No. 267, 1973
- 7) 岡本 隆, 榊 信昭: 日本海中部地震の石油タンクのスロッシング波高, 第39回年次学術講演会概要集, I-350, 1984
- 8) 「高圧ガス設備等耐震設計指針 KHK E 012-1983」, 高圧ガス保安協会
- 9) LNG地上式貯槽指針, (社) 日本ガス協会, 昭和56年12月