

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2: やや長周期地震動の予測)

神谷篤志¹・渡辺 修²・永田茂³・丹羽正徳⁴・野澤貴⁵・石井晃⁵

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 鹿島 技術研究所 (〒182 調布市飛田給 1-19-21)
⁴工博 鹿島 技術研究所 (〒182 調布市飛田給 1-19-21)
⁵正会員 工修 鹿島 技術研究所 (〒182 調布市飛田給 1-19-21)

東京湾岸地域(千葉県袖ヶ浦, 横浜市扇島, 根岸)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, 半経験的波形合成法を用いて周期10秒までのやや長周期成分を含む擬似速度応答スペクトル(0.5%減衰)の予測を行った。波形合成法では, 東京湾岸地域のやや長周期成分に影響を与える地震リージョンとして, 日本海東沿部, 房総半島沖, 伊豆半島周辺, 関東, 東海の5リージョンを考慮した。

LNG地下式貯槽のスロッシング検討に用いられる高圧ガス保安法の第2設計地震動を含む各種の設計検討用スペクトルと予測された擬似速度応答スペクトルの比較検討から, 東京湾岸地域のLNG地下式貯槽(1次スロッシング周期8~10秒)で考慮すべき速度応答スペクトルを150cm/sとする提案を行った。

Key Words: LNG storage tank, Sloshing, Long-period ground motion, Tokyo bay area

1. はじめに

LNG地下式貯槽は密閉構造となっているため, 浮き屋根式の地上タンクのようにスロッシングにより内容液が溢流する危険は無いが, 液位上昇や動液圧内部による構造の損傷が考えられることから, 高圧ガス保安法では第2設計地震動(液面動揺に対する耐震性を評価するための地震動)に基づくスロッシングの検討を義務付けている。

本報告では, 東京湾岸地域を対象として, この地域に影響を与えると考えられる地震断層に着目して半経験的波形合成法によるやや長周期地震動の評価を行った。また, 解析で得られたやや長周期地震動の擬似速度応答スペクトルと各種法規等で使用されているスロッシング検討用地震動を速度応答スペクトルに換算したものとの比較検討を行い, 東京湾岸地域におけるLNG地下式貯槽のスロッシング検討用の速度応答スペクトルの提案を行った。

2. 半経験的波形合成法を用いたやや長周期地震動の評価方法

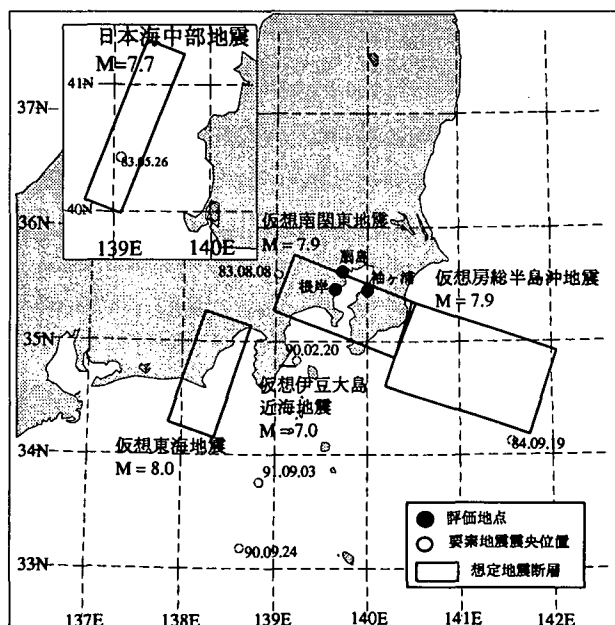
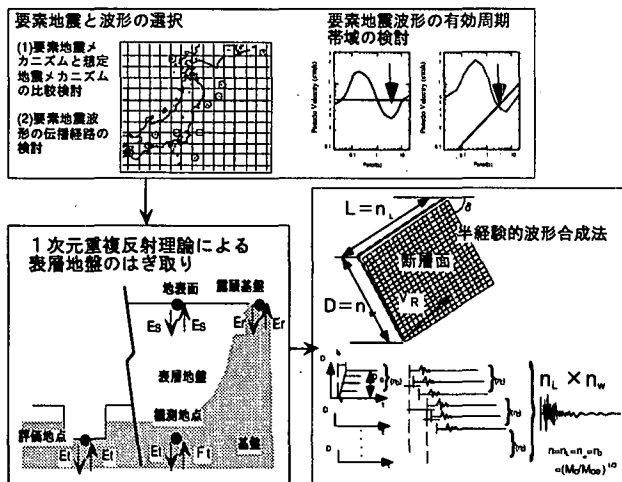
(1) 解析手法

TAKEMURA and IKEURAによる震源の不均質すべ

りを考慮した半経験的地震動評価法^{1), 2)}を使用し, 周期0.1から10秒までのやや長周期地震動のシミュレーションを行った。図-1には, 半経験的波形合成法による地震動の評価手順を概略的に示したものであり, ①要素地震と要素地震波形の選定, ②要素地震波形の有効周期帯域の検討, ③要素地震波形から表層地盤の影響のはぎ取り, ④波形合成計算から成っている。

(2) 対象地震リージョンと想定地震

東京湾岸地域(千葉県袖ヶ浦, 横浜市扇島, 根岸)を評価対象とした場合, 潜在的危険度の高いリージョンとして, 新潟沖から秋田沖にわたる日本海東縁部, 房総半島沖, 伊豆半島周辺の3リージョンが考えられる^{3), 4)}。この3リージョン地震地体構造図⁵⁾を当てはめると日本海東縁部 $M=7.1/2$, 房総半島沖 $M=7.3/4$, 伊豆半島周辺 $M=7.1/4$ なり, 過去に発生した同規模の地震を探すと, 1983年日本海中部地震($M=7.7$), 1605年慶長東海地震(北側の断層)($M=7.9$), 1978年伊豆大島近海地震($M=7.0$)が想定地震として選択される。さらに, 現在, 各自治体や機関で防災対策の対象にしている南関東と東海のやや長周期領域の勢力についても十分な議論がなされているとは言えないため検討を要するリージョンであり, 仮想南関東地震($M=$



7.9)と仮想東海地震(M=8.0)を想定地震に加えた。なお、近年になってその危険性が指摘されている小田原地震については伊豆半島周辺リージョンに含まれると考えられるので評価対象としていない。

図-2には、以上5つの想定地震断層の位置を示した。

(3) 波形合成で用いる要素地震波形

半経験的波形合成法では, 想定地震の波動伝播経路の類似性を中小地震によって表現するため, 以下の点に注意して要素地震とその波形を選定した.

- 1) 想定地震の断層面の内部またはその周辺で発生し、主に伝播経路が類似する中小地震を選定した。
- 2) 評価対象地点もしくは地盤条件が類似する近接地点の地震波形を用いた。

表-1 想定地震と波形合成に用いた要素地震の関係

想定地震	解析番号	対象 方位	要養地震			
			断層	日付	地震名	観測地点
南 関 東 地 震	1	袖ヶ浦	東断層	1984/9/19	房総半島沖地震	房 島
		西断層	1983/8/8	神奈川県西部地震	房 島	
	2	房 島	東断層	1984/9/19	房総半島沖地震	房 島
		西断層	1983/8/8	神奈川県西部地震	房 島	
	3	根 岸	東断層	1984/9/19	房総半島沖地震	根 岸
		西断層	1983/8/8	神奈川県西部地震	根 岸	
東 海 地 震	4	袖ヶ浦	—	1990/9/24	東海沿はるか沖地震	君 津
	5	房 島	—	1991/9/3	東海沿はるか沖地震	横 浜
	6	根 岸	—	1991/9/3	東海沿はるか沖地震	横 浜
房 総 半 島 沖 地 震	7	袖ヶ浦	—	1984/9/19	房総半島沖地震	房 島
	8	房 島	—	1984/9/19	房総半島沖地震	房 島
	9	根 岸	—	1984/9/19	房総半島沖地震	房 島
伊豆大島近海地震	10	袖ヶ浦	—	1990/2/20	伊豆大島近海地震	江 東
	11	房 島	—	1990/2/20	伊豆大島近海地震	山 手 町
	12	根 岸	—	1990/2/20	伊豆大島近海地震	山 手 町

3) 想定地震と中小地震の断層パラメータ間で、平均的に相似則が成立するのは、地震モーメントが 10^{22} dyne・cm 以上の範囲と考えられているため、M4 以上の地震を要素地震とした²⁾。

4) スロッシングに影響を及ぼすようなやや長周期領域の地震動は、表面波が支配的であると考えられるため、表面波が励起されやすい震源深さ数 km ～ 10 数 km の地震を選定した。

5)周期10秒までが有効周期と考えられる地震波形を選定した。

表-1には想定地震と使用した要素地震の関係を評価地点毎に整理した。日本海中部地震に関しては、周期10秒まで信頼できる加速度波形が根岸で観測されていたため解析は省略した。

3. 評估結果

波形合成計算では、震源スペクトルのスケールリング則が ω^{-2} 則に従うと仮定する共に、断層面上のくい違い量の不均質を表す指標を正規乱数(平均値0.0, 標準偏差1.0)で与え、対象となる3地点の各水平成分ごとに10~30サンプルの加速度波形を作成し、その擬似速度応答スペクトル(0.5%減衰)を求めた。なお、根岸、扇島、袖ヶ浦における地震動の評価地点は、大地震時において地盤の非線形性の影響が少ない耐震設計上の基盤面とした。

(1) 速度応答スペクトルの比較

図-3～図-6は南関東、東海、房総半島沖及び伊豆大島近海地震の疑似速度応答スペクトルを根岸、扇島、袖ヶ浦に関して比較したものである。図の各線は、波形合成法で得られた各対象サイトの加速度波形(NS成分とEW成分)から計算した疑似速度応答スペクトル(減衰0.5%)の最大包絡曲線を示している。

東京湾中央部と奥部では表面波の卓越周期に差が見ら

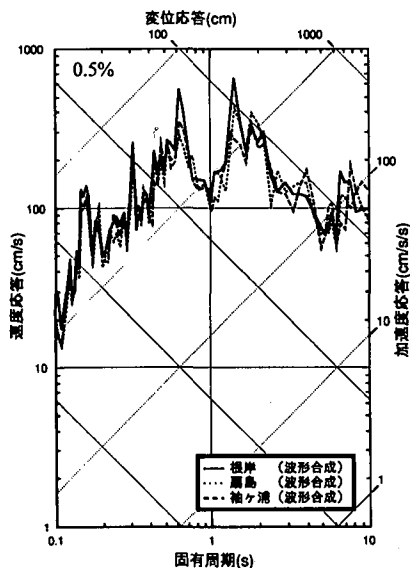


図 - 3 仮想南関東地震の擬似速度応答スペクトル

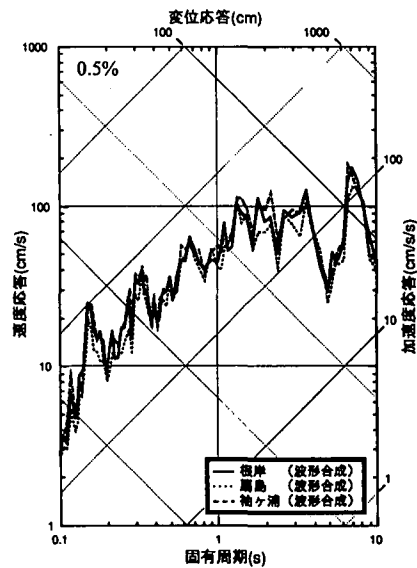


図 - 5 仮想房総半島沖地震の擬似速度応答スペクトル

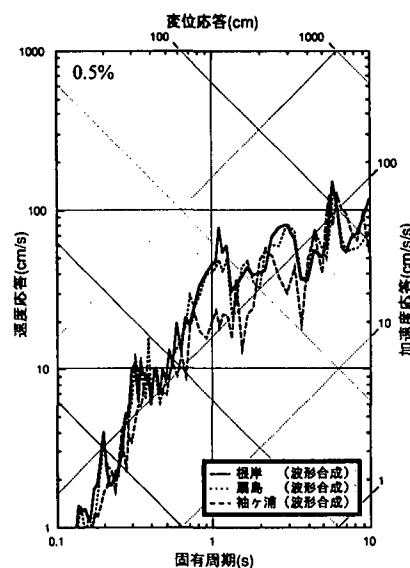


図 - 4 仮想東海地震の擬似速度応答スペクトル

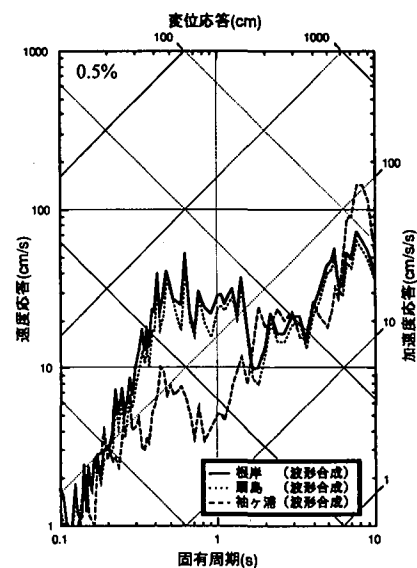


図 - 6 仮想伊豆大島近海地震の擬似速度応答スペクトル

れることが報告されているが^{6) - 8)}, 根岸・扇島 (湾中央部) に関しては約6～6.5秒, 袖ヶ浦に関しては約4.6, 8秒にピークが見られ, 既往の研究結果とほぼ同一の傾向が見られる。このように, 評価地点ごとの擬似速度応答スペクトルには卓越周期に差が見られるが, 東京湾岸地域の代表的な6～20万kl LNG地下式貯槽の1次スロッシング周期が集中する8～10秒の帯域では, 3サイトの最大包絡曲線の最大値は概ね100～150cm/sに分布している。

図-7は, 想定地震ごとに擬似速度応答スペクトル(0.5%減衰)の最大包絡曲線を求めたものであり, 日本海中部地震は根岸の観測波形より求めている。主要LNG地下式貯槽の1次スロッシング周期が集中する8～10秒の周期帯域で最大包絡曲線が最大となる想定地震は南関東地震であり, その値は150cm/sとなった。

(2) 東京湾岸地域におけるスペクトルの提案

図-7では高圧ガス保安法の第2設計地震動⁹⁾から換算した速度応答スペクトル(60cm三波共振法によるスペクトル), 自治省告示119号(消防法)から換算した速度応答スペクトル¹⁰⁾のほか, 周期10秒までを対象とする主要な速度応答スペクトルと今回の解析で得られた想定地震ごとの擬似速度応答スペクトルの最大包絡曲線を比較している。

今回の検討結果は, 8～10秒の周期帯域で消防法, API¹¹⁾及び東京臨海部の高層建築物のレベル2基準地震動¹²⁾(簡易式を用いて0.5%減衰に変換した)の速度応答スペクトルを上回る結果となった。また, 山本・清水¹¹⁾の提案する速度応答スペクトルとは, ほぼ等しい値を示した。さらに, 今回の解析結果から, 60cm三波共振法によるスペクトルが東京湾岸地域で想定される速度応答スペクトルに対して, 8～10秒の周期帯域で約2～3倍のスペクトル強度を持っている

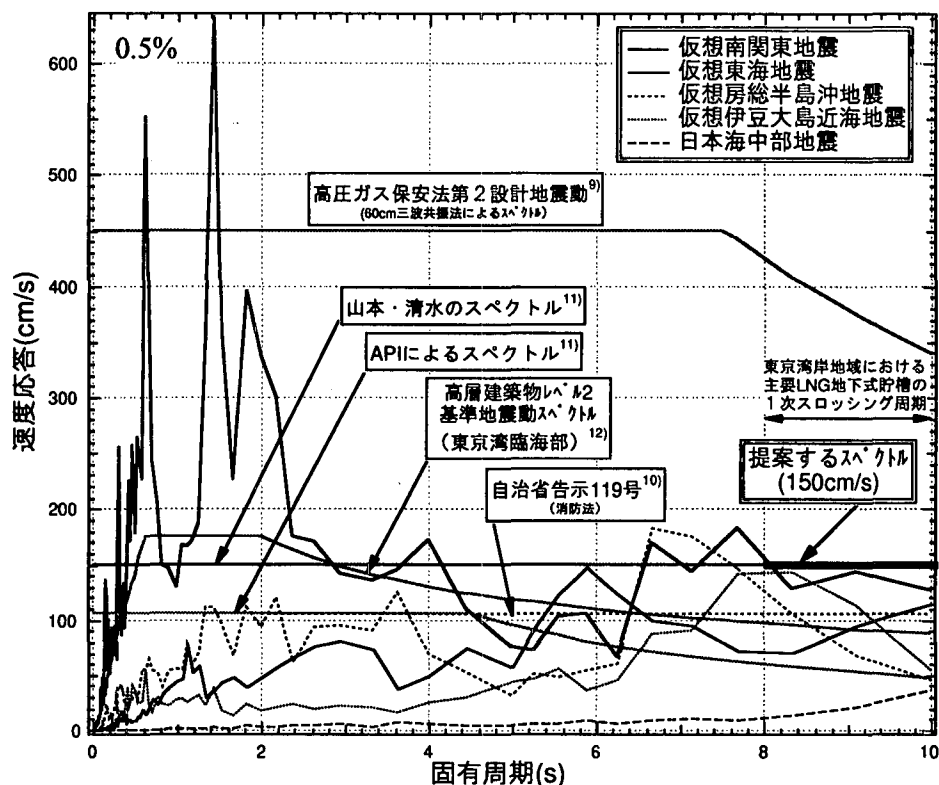


図-7 提案する擬似速度応スペクトル

ことが明らかになった。

以上の検討結果を考慮すると、東京湾岸地域に存在する代表的なLNG地下式貯槽（1次スロッシング周期8～10秒）のスロッシング検討に用いる速度応答スペクトルの値として150cm/sが妥当と考えられる。

4. まとめ

本稿では、東京湾臨海部地域の代表的なLNG地下式貯槽サイトを対象とした周期10秒程度までのやや長周期模擬地震動の作成とそれを用いた擬似速度応答スペクトル（0.5%減衰）の評価を行い、周期8～10秒で150cm/sの一定値を持つ速度応答スペクトルを検討用とする提案を行った。今後は、最新の観測記録を用いた波形合成解析により提案スペクトルの検証を進めると共に、LNG地下式貯槽の年間液位管理データを用いた詳細なスロッシング解析からも提案スペクトルの妥当性を検証する予定である。

参考文献

- 1) TAKEMURA, M. and T. IKEURA: The influence of fault plane irregularities on strong ground motions, Proc. 9th World Conf. Ethq. Eng., II, 727-732, 1988.
- 2) 池浦友則：震源の不均質すべりを考慮した半経験的地震動評価法とその応用に関する研究，東北大学学位論文，1991.
- 3) 座間信作：気象庁一倍強震計に見られるやや長周期地震動の地域特性（その1），消防研究報告，第72号，1991
- 4) 座間信作：気象庁一倍強震計に見られるやや長周期地震動の地域特性（その2），消防研究報告，第76号，1993.
- 5) 萩原尊禮編：日本列島の地震—地震工学と地震地帯構造，鹿島出版会，1991.
- 6) 座間信作：東京湾岸におけるやや長周期帯域の地盤卓越周期，消防研究報告，第70号，1990.
- 7) 丹羽正徳・大保直人・鈴木康嗣・野澤貴：東京湾臨海部の地震動特性に関する研究—その1 1990.2.20伊豆大島近海地震の記録に見られるやや長周期地震動について—，1990年度日本建築学会大会学術講演会梗概集（中国）構造I，347-348，1990.
- 8) 丹羽正徳・山中浩明・武村雅之・池浦友則：東京湾臨海部の地震動特性に関する研究（その6）1993年2月7日能登半島沖地震に見られるやや長周期地震動，1993年度日本建築学会大会学術講演会梗概集（関東）構造I，175-176，1993.
- 9) 高圧ガス保安法：高圧ガス設備等耐震設計基準，告示第515号，1981.
- 10) 鶴戸口英善：JIS B 8501-1958「鋼製石油貯槽の構造（全溶接製）」における（参考）鋼製石油貯槽の耐震設計指針について，圧力技術，第26巻，第5号，pp.47-55，1988.
- 11) 山本鎮男・清水信行：長周期地震動とスロッシング解析，高圧ガス，Vol.18，No.4，pp.10-20，1981.
- 12) 丹羽正徳：第1部 動的設計用入力地震動の設定（1）基準地震動とその適用法，建築防災，pp.4-9，1993.
- 13) 渡辺修・神谷篤志・永田茂，丹羽正徳，野澤貴，石井晃：半経験的波形合成法を用いた東京湾岸地域のやや長周期地震動の評価，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，1997。（投稿済み）