

解説

長周期地震動の新たな知見と第二設計地震動の改正

有限会社プラント地震防災アソシエイツ 稲葉 忠
(日本機械学会フェロー)

1 はじめに

平成 23 年 10 月 31 日に高圧ガス設備等耐震設計基準（昭和 56 年通商産業省告示 515 号）の一部を改正する告示が公布され、平成 24 年 4 月 1 日に施行されました。主な改正点は、長周期地震動に関する新たな知見に基づき、第二設計地震動の速度応答スペクトルと地域区分の見直しが行われたことです。ここでは、長周期地震動について説明した後、第二設計地震動の改正内容と各地区への影響についてまとめることとします。

2 長周期地震動

2.1 長周期地震動による平底貯槽の液面揺動

長周期地震動による液面揺動がクローズアップされたのは、昭和 39 年に起きた新潟地震における製油所のタンク火災でした。この時の経験から、高圧ガスの平底貯槽（低温二重殻平底円筒形貯槽）の耐震設計では液面揺動による影響の評価が不可避とされ、昭和 56 年に制定された高圧ガス設備等耐震設計基準には、震度、加速度に対する第一設計地震動と併せ、液面揺動に対する第二設計地震動が規定されました。周期 7.5 秒以下では地表面における地動速度 50cm/秒、周期 7.5 秒超では地動変位 60cm を基本入力とし、3 波共振法（液面揺動と同じ周期の正弦波 3 波を入力）によって最大応答を求めるというものでありました。

その後も、昭和 58 年の日本海中部地震では秋田でタンク火災が発生し、新潟でも石油タンクが液面揺動を起こして溢流しました。平成 15 年の 2003 年十勝沖地震では苫小牧でタンク火災が発生しました。平成 23 年の東北地方太平洋沖地震でも、市原、川崎、新潟、秋田、酒田で液面揺動によるタンクの被害がみられました。

近年の調査研究で、長周期地震動は平野（堆積盆地）で発生する表面波であることが次第に分かってきました。長周期地震計の精度が高まり、深部地下構造の探査が進み、多くの観測データが得られ、震源過程や三次元地体構造を考慮したシミュレーションが可能になってきたことなどが背景にあります。

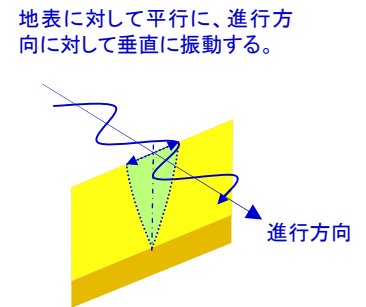
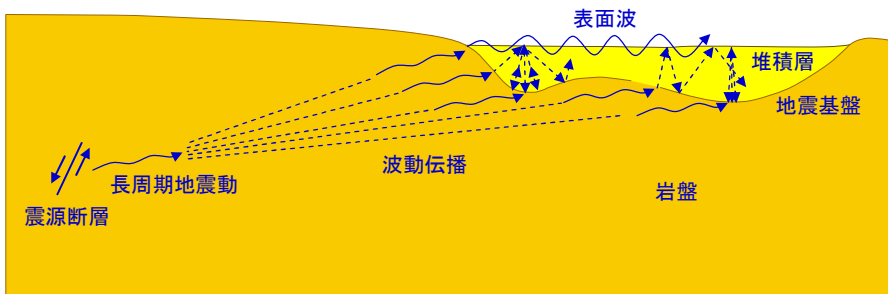
基準が制定された頃は、長周期地震動と言えば地震学で周期 20 秒以上の地震動のことを言っていました。そのため、平底貯槽の液面揺動に影響を及ぼすような、周期が数秒から十数秒の地震動は“やや長周期地震動”と呼ばれていました。最近では、周期 2, 3 秒を境に（明確な区分はない）、それより短周期の地震動は短周期地震動、それより長周期の地震動は長周期地震動と呼ばれることが多くなりました。

2.2 長周期地震動の伝播と平野における増幅

震源が浅くて地震の規模が大きいと、短周期の地震動とともに長周期の地震動が発生するようになります。その大きさは断層がずれる方角によっても変わってきます。震源断層で発生した長周期地震動は、岩盤を伝わり、堆積層を伝わって地表に到達します。長周期地震動に堆積層の基本モードの固有周期に近い周期成分が含まれていると、堆積層は当該モードで共振し、振幅が増幅されます。

近年の調査で、平野（堆積盆地）では端部の一箇所あるいは数箇所から表面波が発生し、地表面を伝わっ

ていくことが観測されています。三次元空間の固有の地形が表面波発生 の起点になると考えられています。表面波はラブ波で、通過地点の堆積層の基本モードと同調しながら進行していきます。できた表面波は岩盤にぶつかって反射し、地表面ではゆっくりとした揺れがいつまでも続きます。



平野(堆積盆地)における長周期地震動の増幅と表面波の生成

基本モードのラブ波

長周期地震動は、短周期地震動が地表面近くの表層地盤(例えば数10m)で増幅されるのに対し、表層地盤を含む厚い堆積層(例えば数km)で増幅されるのが特徴です。減衰が小さくて遠くまで伝播するのも長周期地震動の特徴です。海溝型地震の場合にあって、海洋プレートに沿って付加体(海洋プレートが陸側プレートの下に潜り込むときに表面の堆積物が剥がれ、陸側プレートに付加されてできる地層)が形成されていると、長周期地震動はそこで増幅されてから岩盤を伝わると言われています。

3 高圧ガス設備等耐震設計基準の第二設計地震動の改正

3.1 第二設計地震動の改正

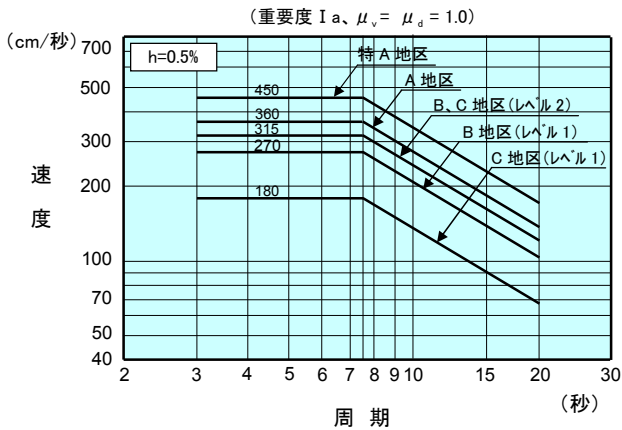
主な改正点は、①改正前は第二設計地震動は地表面における地動速度、地動変位で与えられていたが、改正によって地表面における速度応答スペクトルで与えられるようになったこと、②改正前は第二設計地震動の地域区分、地域係数は第一設計地震動のものと同じであったが、改正によって別のものとされ、地域係数については地震動のレベルによる違いもなくなったこと、の2点です。

第二設計地震動の新旧対応表

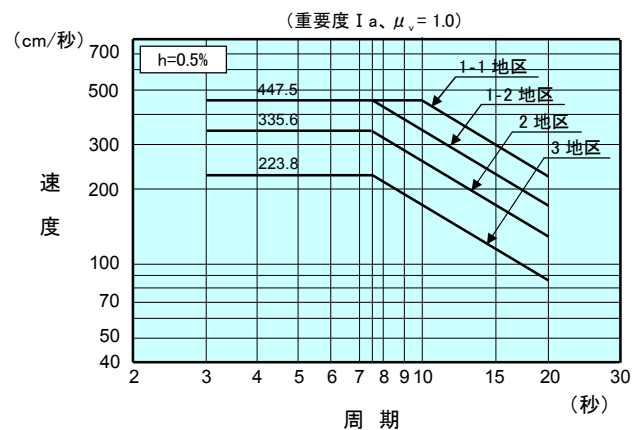
	旧(改正前)				新(改正後)						
	T	V _H 又はD _H			T	V _H (T)					
設計地震動	$T \leq 7.5 \frac{\mu_d}{\mu_v}$	$V_H = 50\mu_v\beta_1\beta_2$			$T \leq T_c$	$V_H(T) = 250\mu_v\beta_1\beta_2'$					
	$T > 7.5 \frac{\mu_d}{\mu_v}$	$D_H = 60\mu_d\beta_1\beta_2$			$T > T_c$	$V_H(T) = 250 \frac{T_c}{T} \mu_v\beta_1\beta_2'$					
	T: 液面揺動の固有周期(秒) V _H : 地表面における地動速度(cm/秒) D _H : 地表面における地動変位(cm) μ _v : 地表面における水平地動速度に基づく係数であって、レベル1地震動にあっては1.0、レベル2地震動にあっては1.0以上の値 μ _d : 地表面における水平地動変位に基づく係数であって、レベル1地震動にあっては1.0、レベル2地震動にあっては1.0以上の値 β ₁ : 重要度係数 β ₂ : 地域係数				V _H (T): 地表面における地震動に対する速度応答スペクトル(減衰定数5%に対するもの)(cm/秒) T _c : 折れ点の周期(秒) β ₂ ': 第二設計地震動に係る地域係数 T、μ _v 、β ₁ : 改正前に同じ						
地域係数	地域区分	特A	A	B	C	地域区分	1-1	1-2	2	3	
	β ₂	レベル1地震動	1.0	0.8	0.6	0.4	β ₂ '	1.0	1.0	0.75	0.50
		レベル2地震動	1.0	0.8	0.7	0.7	T _c	10.0	7.5	7.5	7.5
応答解析の入力	液面揺動の固有周期に応じ、規定の地動速度又は地動変位を有する適切な地震波。応答解析は3波共振法による。(通達)				液面揺動の固有周期に応じ、規定の速度応答スペクトルを有する適切な地震波。通達から3波共振法が削除される。(同法に限定されない。)						

3.2 第二設計地震動の速度応答スペクトル

改正前は、第二設計地震動は地動速度、地動変位で与えられ、通達で応答解析は3波共振法によるとされてきました。液面揺動の減衰定数は0.5%とされていますので、3波共振の応答倍率はほぼ9.0となります。今回の改正で与えられた速度応答スペクトルは減衰定数5%のものであり、液面揺動の減衰定数0.5%の時の補正係数は1.79とされています。両者ともに減衰定数0.5%の速度応答スペクトルにして対比すると、次のようになります。速度一定から変位一定に変わる折れ点の周期は、改正前は一律7.5秒でしたが、改正後は1-1地区については10秒、その他の地区は7.5秒となっています。



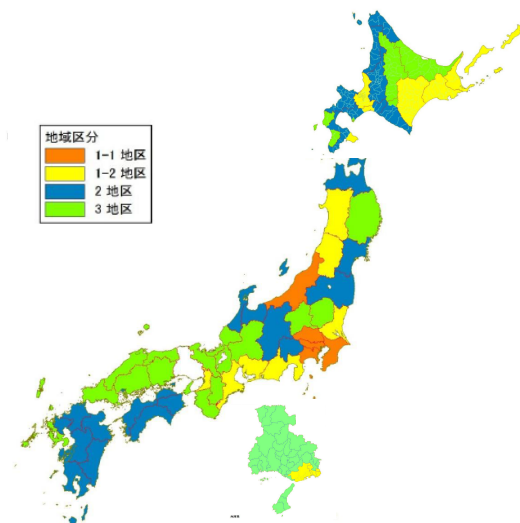
第二設計地震動の速度応答スペクトル(改正前)



第二設計地震動の速度応答スペクトル(改正後)



第一設計地震動に係る地域区分



第二設計地震動に係る地域区分(改正後)

3.3 改正の影響

改正によって各地区の速度応答スペクトルがどう変わるかを新旧スペクトルの比でもって示したのが次の表です。旧区分毎にまとめると、以下のとおりとなります。旧区分のA地区、B地区から新区分の1-1地区あるいは1-2地区に分類された地域は、いずれも平野(堆積盆地)にあるか、これを含む地域です。

- ① 特A地区は、東京、神奈川、千葉、埼玉は周期7.5秒まではほぼ同じであるが、7.5秒を超えると高くなる。静岡、愛知、三重はほぼ同じで、山梨、長野(特A)、中津川市は低くなる。
- ② A地区は、十勝、釧路、根室、茨城、大阪、及び兵庫県の一部は高くなる。

- ③ B 地区は、新潟(佐渡市を除く)は高くなり、周期 7.5 秒を超えるとさらに高くなる。函館市、苫小牧市、石狩、秋田、山形も高くなる。青森、富山(B)、福島(B)、渡島(函館市を除く)、後志、胆振(室蘭市及び苫小牧市を除く)、空知、佐渡市、石川(B)、徳島(B)、香川、愛媛、高知、大分(B)、宮崎、熊本(B)はレベル 1 地震動については高くなる。
- ④ C 地区は、レベル 1 地震動については高くなる。旧区分では C 地区の地域係数が小さいことによる。なお、ここでいう旧区分とは第二設計地震動に関するものであり、第一設計地震動に関しては区分の変更はありません。

各地域における新旧速度応答スペクトルの比較

地域区分		該当する都・道・府・県、支庁又は市名 ⁽¹⁾	速度応答スペクトルの比(新/旧) ⁽²⁾		改正による速度応答スペクトルの変化(高低)
旧区分	新区分		レベル 1 地震動	レベル 2 地震動	
特 A	1-1	東京、神奈川、千葉、埼玉	0.994 + α	0.994 + α	ほぼ同じ。周期 7.5 秒を超えると高くなる。
	1-2	静岡、愛知、三重	0.994	0.994	ほぼ同じ。
	2	山梨、長野(特 A)	0.746	0.746	低くなる。
	3	中津川市	0.497	0.497	低くなる
A	1-2	十勝、釧路、根室、茨城、大阪、兵庫(神戸市、尼崎市、西宮市、芦屋市、伊丹市)	1.243	1.243	高くなる
	2	日高、青森(A)、宮城、福島(A)、石川(A)、長野(A)、徳島(A)、富山(A)	0.932	0.932	若干低くなる。
	3	岩手、栃木、群馬、福井、岐阜(中津川市を除く)、京都、滋賀、奈良、和歌山、兵庫(神戸市、尼崎市、西宮市、芦屋市及び伊丹市を除く)、鳥取(A)	0.622	0.622	低くなる。
B	1-1	新潟(佐渡市を除く)	1.657 + α	1.421 + α	高くなる。周期 7.5 秒を超えるとさらに高くなる。
	1-2	函館市、苫小牧市、石狩、秋田、山形	1.657	1.421	高くなる。
	2	青森(B)、富山(B)、福島(B)、渡島(函館市を除く)、後志、胆振(室蘭市及び苫小牧市を除く)、空知、佐渡市、石川(B)、徳島(B)、香川、愛媛、高知、大分(B)、宮崎、熊本(B)	1.250	1.065	レベル 1 は高くなる。
	3	鳥取(B)、上川(B)、網走、檜山、室蘭市、岡山、広島、島根	0.829	0.710	低くなる。
C	2	留萌、宗谷、福岡、佐賀、熊本(C)、大分(C)、鹿児島(C)	1.864	1.065	レベル 1 は高くなる。 レベル 2 はほぼ同じ。
	3	上川(C)、山口、長崎、沖縄	1.243	0.710	レベル 1 は高くなる。 レベル 2 は低くなる。

- (1): 旧区分が付された都道府県等は、当該都道府県等のうちの当該区分の地域であることを示す。
(2): + α は周期 7.5 秒超えの周期領域については記入された数値以上の比であることを示す。

4 おわりに

昭和 56 年(1981 年)制定の高圧ガス設備等耐震設計基準には、震度、加速度に対する第一設計地震動と併せ、液面揺動に対する第二設計地震動が規定されました。その後の地震被害の経験や調査研究によって新たな知見が得られ、今回の改正となりましたが、スペクトルの大枠は変わっていません。データに乏しかった頃、地動速度、地動変位と 3 波共振法をもって長周期地震動の速度応答スペクトルを表した叡智には、畏敬の念を禁じ得ません。{基本的な考え方は 1965 年の第 3 回世界地震工学会議において、東京大学柴田助教授(当時)より新潟地震の報告の中で提唱され、これをベースに基準の第二設計地震動が策定された。}

長周期地震動は平野(堆積盆地)で増幅されることが明白になってきました。今後、深部地下構造の探査が全国的に進むにつれて、よりきめ細かな地域区分が可能になってくると思われます。

参考文献(告示、通達、指針を除く)

- (1) 高圧ガス保安協会、平成 19 年度 高圧ガスプラント耐震化対策 報告書、2008. 3
(2) 柴田碧、プラントと地震 やや長周期地震動、新潟地震 1964 年からの 47 年、地震ジャーナル 52 号、2011. 12
(3) 工藤一嘉、長周期地震動について、配管技術、630. Vol. 47、No. 11、2005. 5