

## 附属書3 500kg, 985kgバルク貯槽の耐震性能について

設備等の地震動に対する耐震性能を評価するにあたり、発生する地震動周期の成分と設備等の固有周期を比較することが重要である。

そこで、500kg・985kgの横型／縦型バルク貯槽の固有周期を算定し、この度発生した東日本大震災（M9.0の超大型地震）の地震動データを基に、バルク貯槽の固有周期に近い周期成分の加速度を抽出し、**高圧ガス保安法耐震告示**に定められる修正震度法を用いてその耐震性能を評価する。

なお、法規上1 t未満のバルク貯槽といった小型の塔槽類は**耐震告示**で定める耐震設計を要しないが、バルク貯槽は高圧ガスを貯蔵する圧力容器の一つである故、**高圧ガス保安法**に定められる計算式を用いることとした。

### 1. バルク貯槽の固有周期 **高圧ガス保安法耐震告示第6条第1項第2号**を用いて固有周期を算定する。

なお、横型については修正震度法に於いて固有周期の算定を行わないため、横型を縦型に見立てて算定した。結果を、次に示す。

表1 バルク貯槽の固有周期

種類	500kg横型	500kg縦型	985kg横型	985kg縦型
固有周期 (S)	0.0147	0.0077	0.0079	0.0112

固有周期は脚（法規用語「レグ」又は「サドル」）断面の断面二次モーメントに影響を受ける。特に500kg横型について同縦型の周期より長く算定されているが、これは横型に使用している脚断面の断面二次モーメントが小さい事に起因している。

なお、使用脚柱の断面二次モーメントが比較的小さくても、耐震性能を満たせば何ら問題はない（脚柱耐震性能については後述）。

表1の結果から、1 t未満のバルク貯槽の固有周期は0.015sec以下と非常に短いことが分かる。**高圧ガス保安法**の耐震設計を要する設備の固有周期が0.05～1 sec（長くて1.5sec）と云われることからその短さが分かる。

地震によりプラント設備や住宅に被害をもたらす地震動周期は0.1～2 sec（俗称：「キラーパルス」）とされる。また、過去に大型石油プラントで甚大な被害をもたらした周期は更に長い数秒といった長周期地震動であった様子である。

長周期地震動は短周期地震動と比較して減衰しにくく、非常に遠くまで伝わるという特徴がある。このことから、固有周期の短いバルク貯槽にあつては長周期地震動の影響を受けにくく、また、短周期地震動は減衰しやすい事から地震に対して有利な位置付けにあると考える。

なお、インターネットを検索すると、この度発生した東日本大震災では比較的短周期な成分が卓越していたため、建築物への影響が少なかったという論説を多く見受ける。

### 2. 東日本大震災の周期成分と加速度（応答スペクトル） 平成23年5月18日の経済産業省発行書面に「平成23年東北地方太平洋沖地震における福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の地震観測記録の分析結果を踏まえた対応について」がある。この書面中に福島第一・第二原発の各原子炉建屋基礎盤上で観測

された周期成分に対する応答スペクトルが掲載されている。

また、大手建築業者である清水建設(株)技術研究所より「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震一免震建物の効果」と題された資料が公開されている。この中の冒頭に、当該技術研究所と東北大学が観測した応答スペクトルが掲載されている。

経済産業省の資料では周期0.02sec以上、清水建設(株)の資料では周期0.1sec以上の応答スペクトルが掲載されている。バルク貯槽の固有周期に近い0.015sec以下のデータはないが、各データの0.02sec, 0.1sec時応答スペクトルの値は400~600ガルに入るため、この値を参照し、耐震性能評価に使用する入力震度(水平震度)を0.6(600ガル)とする。この値は高圧ガス保安法耐震告示に定められる「レベル2」評価に用いる値に該当する。

なお、各グラフ中に示される $h=0.05$ という値は「減衰率5%」を意味し、この設定値が大きいほど応答スペクトルは小さく抑えられる。通常、塔槽類にあつては2~10%程度を想定する事から、資料に示される応答スペクトルの値を参照する事に妥当性を有すると考える。

(参考) 加速度応答スペクトルより速度応答スペクトルの値を用いて評価する方が被害レベルを想定する上で適切なケースが多いため、最近では速度応答スペクトルを用いるケースが増えている模様である。単位は「kine(カイン)」を用い、 $1\text{ kine}=1\text{ cm/s}$ である。

3. バルク貯槽の耐震性能評価 前述の通り、高圧ガス保安法耐震告示に定められる修正震度法にて、水平震度=0.6を入力して各バルク貯槽の耐震性能を評価する。修正震度法は対象物を設置する地盤、重要度、地域、固有周期に対する応答倍率により震度を修正して入力する。今回、地盤・重要度・地域については最も苛酷な条件とし、かつ、固有周期の応答倍率は横型に対して無条件に2.0(告示規定準用)、縦型については算定した固有周期に対する応答倍率として1.5を入力した。故に、修正後の水平震度は横型に対して1.2(1,200ガル)、縦型に対して0.9(900ガル)となる。

横型については、胴、鏡板、脚、アンカーボルトに対する評価を、縦型については耐震告示第10条第1項第2号に規定される通り、上下接線間距離が5m未満のものについては剛体と見なす故、脚、アンカーボルトに対する評価を行う。

(参考) 985kg縦型バルク貯槽の上下正接線間距離は1342mm、500kg縦型バルク貯槽のそれは1170mmである。

次にバルク貯槽各部の使用材料と機械的性質を示す。想定するアンカーボルトの材質はSS400とする。

表2 バルク貯槽各部の使用材料と機械的性質

部位名称	J I S材料名	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )
胴・鏡板	SM520B	520	365
脚	SS400	400	245
アンカーボルト	SS400	400	245

評価時に使用する判定基準は耐震告示に基づき、表2機械的性質に対して更に裕度を設けた許容応力を算定して使用する(アンカーボルトの評価を除く)。

3-1 横型バルク貯槽に関する評価結果 次に500kg/985kg横型バルク貯槽の評価結果を示す。

表3 500kg/985kg横型バルク貯槽の評価結果

評価項目	評価基準値 N/mm <sup>2</sup> 以下	500kg横型評価 N/mm <sup>2</sup>			985kg横型評価 N/mm <sup>2</sup>		
胴脚部－引張応力	296	59		合格	59		合格
胴脚部－圧縮応力	291	12		合格	14		合格
胴中央部－引張応力	296	59		合格	60		合格
胴中央部－圧縮応力	291	0.5		合格	0.6		合格
鏡－圧縮応力	312	116		合格	119		合格
脚－圧縮応力	220	152		合格	115		合格
アンカーボルト 引張応力	245	M8	99	合格	M12	70	合格
		M10	62	合格	M16	38	合格
		M12	43	合格	M20	24	合格
アンカーボルト せん断応力	141	M8	49	合格	M12	45	合格
		M10	31	合格	M16	25	合格
		M12	22	合格	M20	16	合格

表3を見ると、耐震告示に基づく各項目の計算結果は評価基準値に比較して十分に小さい値である。評価基準値は降伏点以下（弾性域）の値であり、即ち、耐震告示レベル2地震動に匹敵する入力震度0.6→修正後震度1.2（1,200ガル）では、横型バルク貯槽本体の恒久的変形等は発生しない。

なお、脚圧縮応力について、500kg型に比較して985kg型の方が小さい値となっている。これは脚柱断面性能の違い（985kg横型脚柱は溝型鋼150×75×t12.5を使用しているのに対し、500kg横型脚柱は等辺山形鋼80×80×t10（計算ではJIS品に合わせるためt6として試算））により生じた結果である。

アンカーボルト（ボルト自身の強度）についても500kg横型ではM8、985kg型ではM12程度で引抜力に対して十分な強度を有する事が分かる。

なお、アンカーボルトについての詳細は後述する。

3-2 縦型バルク貯槽に関する評価結果 次に500kg/985kg縦型バルク貯槽の評価結果を示す。

表4 500kg/985kg縦型バルク貯槽の評価結果

評価項目	評価基準値 N/mm <sup>2</sup> 以下	500kg縦型評価 N/mm <sup>2</sup>			985kg縦型評価 N/mm <sup>2</sup>		
脚－引張応力	220	20		合格	7		合格
脚－曲げ応力	220	5		合格	42		合格
脚－圧縮応力	220	28		合格	11		合格
脚－せん断応力	127	4		合格	2		合格
アンカーボルト 引張応力	245	M8	329	不合格	M12	300	不合格
		M10	207	合格	M16	160	合格
		M12	143	合格	M20	103	合格
アンカーボルト せん断応力	141	M8	42	合格	M12	49	合格
		M10	27	合格	M16	28	合格
		M12	19	合格	M20	18	合格

表4より入力震度0.6→修正後震度0.9(900ガル)を入力しても脚自身が恒久的な変形を生ずる応力は発生しない事が分かる。注視すべきはアンカーボルト(ボルト自身の強度)の算出値で、横型と違い、500kg型ではM8以下、985kg型ではM12以下で評価基準値を上回る内部応力(引張)の発生が予見される。この算出値はボルト破断にまで至らないものの恒久的な伸びが発生しえる応力であり、各サイズ以下のアンカーボルトで施工されている場合、評価に用いたレベルの地震発生後はアンカーボルトの再施工を要する等、将来的に何らかのデメリットを有すると推察される。

なお、脚強度について、曲げ応力以外の値が985kgの算定値に比較して500kg型の数値が大きいのは、構造上(スキッド形状)500kg型の脚本数を2本としている事に起因する。曲げ応力については断面二次モーメントの差異によるものである。

**4. 使用すべきアンカーボルト** 使用すべきアンカーボルトは、ボルト自身の強度の他、アンカーボルトの形状やコンクリート基礎への埋込深さに注視する必要がある。

バルク貯槽基礎への締結用アンカーボルトには、あと施工式金属拡張アンカー(オールアンカー)が広く用いられている様子である。

そこで、アンカーボルトのメーカーであるサンコーテクノ(株)の「オールアンカーCタイプ(スチール製)」に於けるカタログ値を基に選択すべきアンカーボルトを模索する。当該アンカーボルトはオールアンカーの中で最もベーシックな形状のものである。

次に「オールアンカーCタイプ」のカタログ値(抜粋)を示す。

芯棒打込み式/オールアンカー

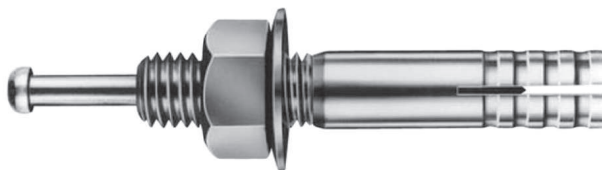


表5 アンカーボルト緒言(サンコーテクノ(株))

呼径	全長 (mm)	取付物厚さ (mm)	コンクリート強度 ( $F_c=21\text{N}/\text{mm}^2$ )			埋込深さ (mm)
			比例最大荷重 (kN)	引張最大荷重 (kN)	剪断最大荷重 (kN)	
M8	60	1~15	3.5	6.9	10.1	35
M10	70	1~16	7.1	11.5	16.0	40
M12	80	1~16	13.3	17.9	23.3	50
M16	100	1~20	23.7	31.5	47.9	60
M20	130	1~25	32.5	43.6	73.6	80

次に、入力震度0.6→修正後震度/横型1.2(1200ガル) 縦型0.9(900ガル) 入力時の500kg・985kg横型/縦型バルク貯槽アンカーボルト1本当たりに作用する引抜力を示す。

表6 アンカーボルトに作用する引抜力 (kN/本)

500kg横型	985kg横型	500kg縦型	985kg縦型
3.5	5.6	11.5	24.1

表5に「比例最大荷重」なる数値が掲載される。これはボルト及びコンクリートの弾性領域を示し、この値以下では有害な塑性変形等を生じない値である。故に、表6との比較には表5の比例最大荷重を適用する。以下に、各バルク貯槽に対する比較評価を列挙する。

(1) 500kg横型

表6より3.5kN以上の引抜力に耐えうるアンカーボルトを表6より選択。比例最大荷重で3.5kN以上得るのはM8（全長60mm－埋込深さ35mm）である。比較値が等しい故、出来ればM10（全長70mm－埋込深さ40mm）を推奨する。

(2) 985kg横型

表6より5.6kN以上の引抜力に耐えうるアンカーボルトを表6より選択。比例最大荷重で5.6kN以上得るのはM10（全長70mm－埋込深さ40mm）である。

(3) 500kg縦型

表6より11.5kN以上の引抜力に耐えうるアンカーボルトを表6より選択。比例最大荷重で11.5kN以上得るのはM12（全長80mm－埋込深さ50mm）である。

(4) 985kg縦型

表6より24.1kN以上の引抜力に耐えうるアンカーボルトを表6より選択。比例最大荷重で24.1kN以上得るのはM20（全長130mm－埋込深さ80mm）である。

なお、耐震告示で通常入力されるレベル1地震動（水平入力震度0.3（300ガル）→修正後震度0.45（450ガル））に於いては引抜力9.0kNと算出され、そのレベルに於いてはM12（全長80mm－埋込深さ50mm）で適応可能。

5. まとめ 平成23年3月11日に発生した東日本大震災発生時に観測された加速度応答スペクトルを参考に、高圧ガス保安法耐震告示に規定される修正震度法を用いて500kg型・985kg型バルク貯槽に与える影響を評価した。その結果、バルク貯槽本体に有害な変形等は生じない事が確認できた。

また、地震発生時にバルク貯槽の転倒・アンカーボルトの塑性変形を抑止できる適切なアンカーボルトの仕様を選定した。

即ち、基礎－バルク貯槽間を適切なアンカーボルトを用いて確実に締結する事により、地震発生時にバルク貯槽を健全な状態に保つ事が可能である。

【参考資料】

「塔槽類や配管系は地震のときどのように揺れるか」

「地震動について」

「長周期地震動について」

「基礎ボルトの耐震設計」

株式会社プラント耐震設計システムズ 池田雅俊

「アンカー総合カタログ」

サンコーテクノ株式会社

以上