矩形地上水槽(鋼製)の耐震設計に関する研究 (Aqua-TANK プロジェクト)

概要版報告書

1. 緒言

1.1 研究の背景と目的

一般的に、矩形の配水池についてはコンクリート構造が主として採用されてきたが、近年では SUS 構造を採用する水道事業体も多い。また、学校や病院等の受水槽においても、配水池に比べて容量は小さいが矩形ステンレスタンクが数多く設置されている。矩形地上水槽(鋼製)については、これまでの大地震で多くの被害が発生しているにもかかわらず、耐震設計法や補強方法は確立されていない状況である。また、地震観測や振動実験、動的解析法の適用事例も少なく、地震時における構造物の動的挙動については未解明な点が多い。

以上より本研究では、矩形地上水槽(鋼製)の地震時挙動を解析・検証し、動的解析法の妥当性を検証することを目的とする。

1.2 研究対象

1.2.1矩形地上水槽(鋼製)

本研究では、矩形地上水槽(鋼製)のうち、母材がステンレス製で(1)側板が縦波板の構造で、鋼板の溶接形状が突合せ溶接、両面すみ肉溶接の「ステンレス鋼板製一体型タンク(WSP タイプ)」と(2)側板が薄板性成形パネルの構造で、鋼板の溶接形状が突合せ溶接、へり溶接、すみ肉溶接の「ステンレス鋼板製パネルタンク」を解析の対象とする。

1.2.2 被害の原因となる現象

矩形ステンレスタンクの被害は、(1) スロッシング、および(2) バルジングと呼ばれる振動 現象が原因と考えられており、本研究ではこれら現象の解析を行う。

(1) スロッシング

タンク内の水の固有周期が長周期的な地震動の振動と合わさったときに、水が大きく揺動する 現象であり、主に天板、側板上部で被害が発生する。

(2) バルジング

タンク内の水が短周期的な地震動の揺れにより、タンク側壁と連成振動を起こし、動水圧が発生する現象であり、主に側板、隅角部に被害が生じる。

2. 被害事例

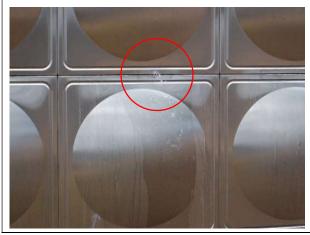
過去の地震で被害が発生している矩形ステンレスタンクの多くはステンレス鋼板製パネルタンクの被害であるが、ステンレス鋼板製一体形タンクにおいても被害が確認されている。 以下に、ステンレスタンクの代表的な被害状況を示す。

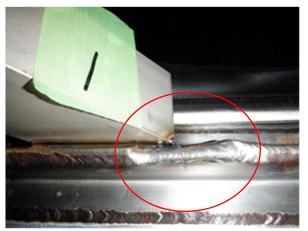
※令和6年能登半島地震による被害状況は、別紙「能登半島地震によるステンレス製矩形タンク 被害調査」を参照のこと。

(1) ステンレス鋼板製パネルタンク

·地震:福島県沖地震(2021年)/震度:6弱

・被害:(左)側板の漏水、(右)側板・補強材の溶接部の損傷(タンク内部)

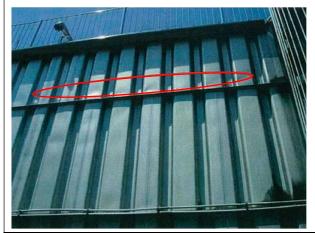


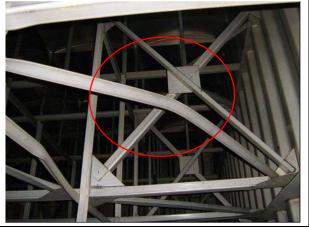


(2) ステンレス鋼板製一体形タンク

・地震:東北地方太平洋沖地震(2011年)/震度:7強

・被害:(左)側板の座屈変形、(右)内部補強材の曲げ変形(タンク内部)





3. ステンレス鋼板製パネルタンクの解析と検証

過去に地震被害が発生したステンレス鋼板製パネルタンクをもとに作成した解析モデルについて、地震波を与える時刻歴応答解析を行い、タンクの変形応答や動水圧分布を確認して、当時の被害状況と照合した。

3.1 解析諸元

ステンレス鋼板製パネルタンクはこれまでの大地震で数多くの被害が発生しているが(詳細は本編を参照のこと。)、そのうち東北地方太平洋沖地震で被害のあった 22 基のタンクのうち 0.16 タンクを解析モデルとした。No.16 タンクの諸元を表 1、解析諸元を表 2、解析モデルを図 1 に示す。

時刻歴応答解析では、実際に被害が発生している(1) 東北地方太平洋沖地震(FKS016 白河_K-NET) と(2) 福島県沖地震(FKS016 白河_K-NET) の地震波を用いた。

			-			
タンク No.	震度階	都道府県	寸法【m】	容量【m³】	耐震基準	建設年度
16	6+	福島県	$14 \times 14 \times 6H$	1,117	レベル 1	1995

表 1 No. 16 タンク諸元

※本編 3 章 「表 3-5 被災タンク(ステンレス鋼板製パネルタンク)の例」から No.16 を抜粋した。その他の被災タンクについては本編を参照

	X = MINIMANO
解析モデル	14,000×14,000×H6,000 mm
寸法	水深:4,500 mm
	内容水-ポテンシャル要素
	(6面体1次要素)
要素	側板・天井・底板-シェル要素
	(4角形1次要素)
	内部補強材-ビーム要素
要素数	385,000 / 要素長 100 mm
解析コード	3次元有限要素解析ソフト ADINA

表 2 解析諸元

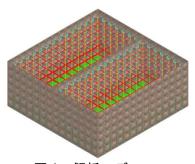


図1 解析モデル

3.2 被害箇所

図 2 に東北地方太平洋沖地震および福島県沖地震による No.16 タンクの損傷個所を示す。 東北地方太平洋沖地震では①~⑥の側板で漏水と損傷が確認された。福島沖地震では③と④付 近の側板が再漏水し、⑦の仕切板からも漏水が確認された。

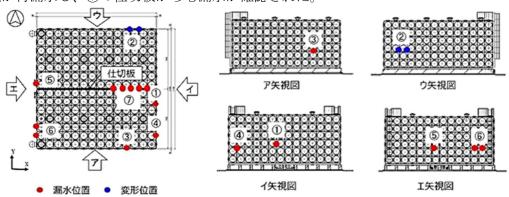


図 2 No. 16 タンク被害箇所

3.3 結果と考察

(1) 東北地方太平洋沖地震

側板の変形が 165mm (相対変位) で最大となった 4.23 秒時点のタンクの変形状態を図 3 に示す。変形量が大きい側板中央部の高さ 4,000mm 付近では、側板の変形と同時に 2、4 段目の水平材とステー材も屈曲しており、実際に No.16 タンクの同じ個所でも水平材が破断している。なお、側板のひずみは、側板中央部の高さ 2,000~3,000mm 付近で最大の 0.5%となった。ただし、ここでの変位やひずみは従来の許容応力度法を用いて導出されたものであり、パネルタンクの大変形挙動である許容以上の変形量を再現できていないことに留意が必要である。

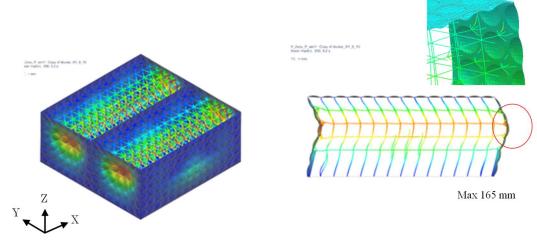


図 3 t=4.23 秒における変形状況(X 方向)

注) 相対変位:地動変位とそれに伴って生じる質点の変位を加えたものを絶対変位とし、絶対変位から地動変位分を引いたもの

(2) 福島沖地震

仕切板の変形が 95.4mm(相対変位)で最大となった 1.25 秒時点のタンクの変形状態を図 4 に示す。仕切板に作用する全動圧は 1.52 秒時点で最大であり、側板の変形と同時にステー材に大きな軸力が発生したため仕切板が損傷したと考えられる。

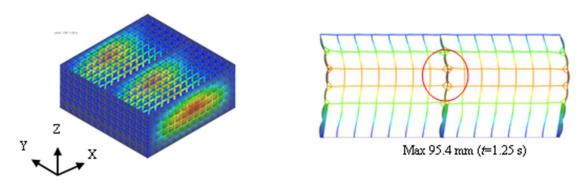


図 4 t=1.25 秒における変形状況(Y方向)

1m³・27m³のパネルタンクを用いた振動実験より、単純モデルのパネルタンクにおける動的解析の方向性を示したが(※詳細は本編を参照のこと)、実構造物とは板厚や材質、補強材の構成が異なっており、実構造物のような解析モデルを動的解析するためには、パネルタンクの構造的な課題の解決が必要である。

4. ステンレス鋼板製一体型タンク (WSP タイプ) の解析と検証

ステンレス鋼板製パネルタンクと同様に、ステンレス鋼板製一体型タンクについても過去の地 震被害の再現解析を行った。また、ステンレス鋼板製一体型タンクについては、代表的な地震波 を用いた、動的解析による耐震設計を実施した。

4.1解析諸元

2011年の東北地方太平洋沖地震で被害を受けた姉歯配水池をもとに、図5のとおり解析モデルを作成した。姉歯配水池は容量2,000m³を有する2槽式、全溶接構造の鋼板製一体型ステンレス配水池(全溶接構造)である。

解析モデルについて、東北太平洋沖地震の 3/11 本震、4/7 余震の地震波(MGY004 栗原市築館_K-NET)を用いた FEM による再現解析(時刻歴応答解析)を行った。なお、解析コードには ADINA を適用した。

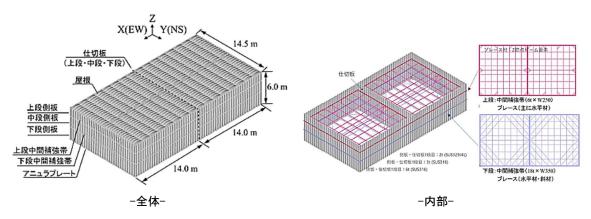


図5 解析モデル

4.2 被害箇所

主な損傷として、東西、南側の側板に発生した局部座屈、さらに仕切板の局部座屈が確認された。図 6 に損傷個所の位置図を示す。

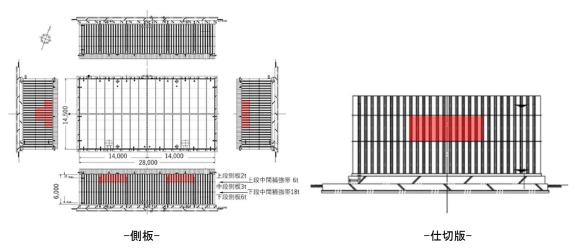


図 6 姉歯配水池被害箇所

4.3 結果と考察

時刻歴応答解析における側板・仕切版に生じた相当ひずみの最大値を表3に示す。なお、表中の黄色着色部は、解析で得られた各部材の最大耐荷力時の相当ひずみ(=評価値)よりも応答値が上回っていること、つまり座屈変形していることを示している。

図7に側板中段で相当ひずみの最大値を確認した本震95.97秒時点のひずみコンタ、変形状況を示す。側板の上段および中段、仕切板の中段で評価値を上回る相当ひずみ値が確認され、実際の被害箇所とも一致している。

			本震 ■	→ 余震				
応答加	速度	X (EW) :	1次モー	ド/2次モード	11,748/2,717	2,526/4,453		
(Ga	1)	Y (NS) :	1次モー	ド/2次モード	6,344/4,252 5,683/6,61			
構造語	部材	材質	板厚	評価値	相当ひずみ	の最大値		
	上段	SUS329J4L	2t	0.9%	1.10%	1.35%		
側板	中段	SUS316	3t	1.1%	1.59%	1.56%		
	下段	SUS316	6t	5.0%	4.45%	4.78%		
	上段	SUS329J4L	2t	0.9%	0.21%	0.64%		
仕切板	中段	SUS316	3t	1.1%	0.82%	1.35%		
	下段	SUS316	6t	5.0%	1.23%	1.56%		

表 3 側板・仕切板の応答値(相当ひずみの最大値)

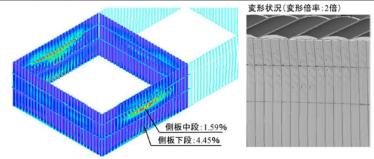


図7 t=95.97 秒における相当ひずみおよび変形状況

図8には、最大動水圧を確認した t=95.49 秒、側板中段で最大応答値($\epsilon=1.59$ %)を確認した t=95.97 秒、および仕切板中段で最大応答値($\epsilon=0.82$ %)を確認した t=96.23 秒の各時点における側板(Y面/X面)および仕切板に作用する動水圧分布を示す。 t=95.97 秒時点の動水圧分布では、側板上段および中段にあたる箇所で大きくなっており、バルジングの影響が現れていることが示唆される。

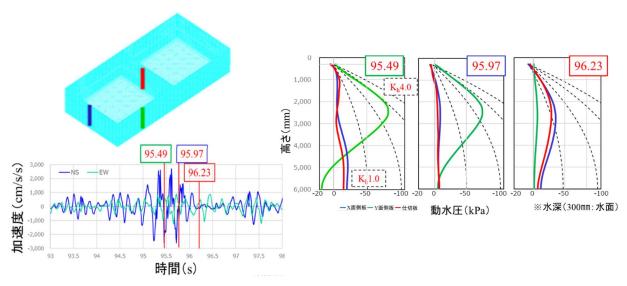


図8 動水圧分布と Housner の動水圧との比較

4.4 WSP タイプの設計事例

WSP タイプのステンレス鋼製角形配水池 (2,000m³) について、図 9 に示す設計手順に従い、レベル 2 地震動によるバルジング現象を考慮した動的非線形解析を用いた耐震設計を行った。照査値については、静荷実験および再現解析の結果に基づき、板厚・材質ごとに設定している。

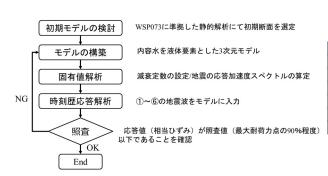


表 4 解析で使用した地震波(6波)

No.	発生年月日	名 称	M	観測地点
1	1995年1月17日	兵庫県南部地震	7.2	JR鷹取駅
2	2004年10月23日	新潟県中越地震	6.6	十日町
3	2011年3月11日	東北地方太平洋沖地震	9.0	浪江町
4	2011年3月11日	東北地方太平洋沖地震	9.0	築館
(5)	2016年4月14日	熊本地震	6.2	益城町
6	2024年1月1日	能登半島地震	7.6	富来

図 9 設計手順

a) 初期モデルの検討

WSP073 に準拠し、設計水平震度 Kh2=0.88 ($=1.4\times0.63$) を適用して各構造物部材の断面選定を行った。(※構造物特性係数 (Cs) は、鋼製水槽 (円筒)の Cs=0.63 を適用している。) 初期モデルの設定を表 5、初期モデルの概要を図 10 に示す。

構造部物材 材質 屋根 SUS329J4L 2t 上段 SUS329J4I 2† 側板 仕切板 中段 SUS304 5t (縦波補剛板) 下段 SUS304 6t 上段 SUS304 8t × B300 中間補強帯 下段 SUS304 16t × B400 上段 SUS304 水平材 • 鋼材 内部補強材 下段 SUS304 水平材・鋼材 アニュラプレート SUS304 $6t \times B600$

表 5 初期モデルの設定

図 10 初期モデルの概要

b) 初期モデルの照査

初期モデルにおける時刻歴応答解析の結果を表 6 に示す。表中の黄色着色については、WSP タイプの復旧性に関する照査値を上回る応答値が確認された箇所を示している。応答加速度が 3,500Gal を上回る④築館波と⑥能登波については、側板の上段および下段、仕切板の下段、中間補強帯において照査値以上の応答値が確認された。

④築館波は、NS 波が卓越する地震特性を有する一方、バルジングの影響は側板よりも仕切板 に顕著に生じているため、配水池(Y 方向/X 方向)と地震(NS 波/EW 波)の組合せを入れ替え て再度、時刻歴応答解析(④-2)を行った。時刻歴応答解析の結果を表 7 に示す。

表 6 時刻歷応答解析結果

表 7 時刻歴応答解析結果(④-2 築館)

地震動		b	初	期	照査値	1	2	3	4-1	5	6		地震動		0		4-2築館	
and an desire to a		N (EW)			200000000000000000000000000000000000000	神戸	新潟 1909	浪江	築館	熊本 839	能登	応答加:	n速度 X (NS)				3,754	
応答加速度		X (EW)	1400			773		1191	2239		4114	(Gal		Y (EW)	1,400		2,248	
(Gal		Y (NS)				786	2117	1412	4215	720	2388	(Our	(Gai)			070 -t- /-t-		ON H
構造物	部材	材質	板厚			相当	ひずみの	最大値	(%)			構造部	構造部材材質		板厚	照査値	応答値	発生
	上段	SUS329J4L	2t	0.03	0.3	0.08	0.14	0.12	1.36	0.09	1.00	11772		17.2	1007-7-	相当ひず	み (%)	時刻
側板	中段	SUS304	5t	0.03	0.8	0.04	0.07	0.06	0.67	0.04	0.50		上段	SUS329J4L	2t	0.3	0.45	95.64
	下段	SUS304	6t	0.04	1.1	0.07	0.16	0.14	2.78	0.08	1.36	側板	中段	SUS304	5t	0.8	0.38	95.66
	上段	SUS329J4L	2t	0.06	0.3	0.08	0.17	0.12	0.31	0.07	1.94		下段	SUS304	6t	1.1	1.02	95.77
仕切板	中段	SUS304	5t	0.006	0.8	0.04	0.11	0.08	0.28	0.04	0.28		上段	SUS329J4L	2t	0.3	0.53	95.88
	下段	SUS304	6t	0.01	1.1	0.07	0.10	0.07	0.54	0.06	0.45	仕切板	中段	SUS304	5t	0.8	0.69	95.77
中間	上段	SUS304	8t	0.03	1.0	0.06	0.49	0.33	2.20	0.07	2.15	11 91 110		(F) F (F) F (F) (F)	0200	0.6	30,000,00	303(A0)(3)
補強帯	下段	SUS304	16t	0.03	1.0	0.06	0.13	0.10	2.22	0.07	2.09		下段	SUS304	6t	1.1	1.02	95.65
	. 154											中間	上段	SUS304	8t	1.0	1.14	97.60
												補強帯	下段	SUS304	16t	1.0	2.04	95.76

c) 再設計モデルの検討

初期モデルの照査にて、照査値を上回る応答値が確認された条件のうち、④-2 築館波および⑥ 能登波について、構造物部材を見直し、時刻歴応答解析を行った。再設計モデルは表 8 に示すとおりである。なお、全体重量は概算で 13.4%ほど増加している。

表 9 に再設計モデルにおける④-2 築館波および⑥能登波に対する時刻歴応答解析の結果を示す。いずれの解析においても、ほぼすべての構造物部材の応答値が照査値(最大耐荷力点の90%)未満となり、復旧性能を確保することができた。

表 8 再設計モデルの諸元

構造物部	『材	材質	再設計モデル	ブレース材
/pul-tr	上段		3t	(上段)
側板 仕切板	中段	SUS304	5t	
11 91 11	下段	SUS304	6t	
中間	上段	SUS304	$12t \times 300$	(下段)
補強帯	下段	SUS304	$22t \times 400$	
ブレース材	上段	SUS304	右図参照	
プレース物	下段	SUS304	右図参照	- L130 × 130 × 12t - L100 × 100 × 10t
概算重	量	_	+13.4%	- L75 × 75 × 9t

表 9 時刻歴応答解析結果 (4)-2 築館および⑥能登)

	配水	也	地震	動	④-2築館	⑥能登	
固有	X	9.17Hz	応答カ	1速度	3,857(NS)	4,801(EW)	
振動数	Y	8.58Hz	(G	al)	2,010(EW)	2,948(NS)	
構造部材		材質	板厚	照査値	相当ひずみの最大値(%)		
	上段	SUS329J4L	2t→3t	0.3%	0.11	0.15	
側板	中段	SUS304	5t	0.8%	0.12	0.14	
	下段	SUS304	6t	1.1%	0.38	0.45	
	上段	SUS329J4L	2t→3t	0.3%	0.13	0.15	
仕切板	中段	SUS304	5t	0.8%	0.21	0.17	
	下段	SUS304	6t	1.1%	0.60	0.45	
中間	上段	SUS304	8t→12t	1.0%	0.58	1.05	
補強帯	下段	SUS304	16t→20t	1.0%	0.25	0.52	

現行指針に準拠して設計された配水池についても、応答加速度が 2,000Gal 程度までの地震波であれば復旧性能を確保できていることが分かった。また、初期モデルの応答値が照査値以上となった④東北地方太平洋沖地震築館波および⑥能登半島地震富来波についても、一部部材を見直すことで、復旧性能を確保するが可能と考えられる。

5. 矩形ステンレスタンクの当面の設計方針

5.1 耐震設計上の現状課題

これまでの地震において、多くがパネルタンクの被害であるが、ステンレスタンクの全ての規格の構造で何らかの破損が確認されている

矩形ステンレスタンクの耐震設計方法や既存施設の耐震診断・補強方法が標準化されるまでには、多くの技術的課題があり、今後も研究が必要である。

5.1.1 現行の設計法の課題

本研究で実施した解析・検証の結果も踏まえて、現状の矩形ステンレスタンクの耐震設計における課題を整理すると以下のとおりとなる。

〇地震作用、構造的な課題

- 1) バルジングの影響を適切に考慮できていない。
- 2) 耐震設計指針類の設計地震動の設定方法が危険側になる場合がある。
- 3) 側壁などの変形に対して幾何学的非線形性を考慮できていない。
- 4) へり溶接部や片面すみ肉溶接部などの照査方法が確立されていない。

〇指針類、設計方法

- 1) 日本ステンレスタンク工業会の指針類
- ・設計方法の抜本的な見直しが必要である。
- ・既設構造物の被災シナリオや観測、振動実験を踏まえた検証解析を実施し、解析方法、モデル化方法 についての知見を蓄積することが不可欠である。
- 2) 日本水道鋼管協会規格の一体形タンク
- ・耐震計算法や照査方法などの標準化も視野に入れ、見直しが必要である。
- 3) 既設構造物の耐震診断・補強
- ・早急に対応が必要も、上記の指針類の見直しが必要である。

5.1.2 被災シナリオ

矩形ステンレスタンクは地震時に複数の振動モードによる複雑な挙動を示す。それゆえ、耐震 設計では表 10 に示すような被災シナリオを想定し、それらを全て照査することが重要である。

側板のわれ損傷 内部補強材の座屈や破断 内部補強材の押し込み作用 スロッシングによる 頂版や側板の損傷

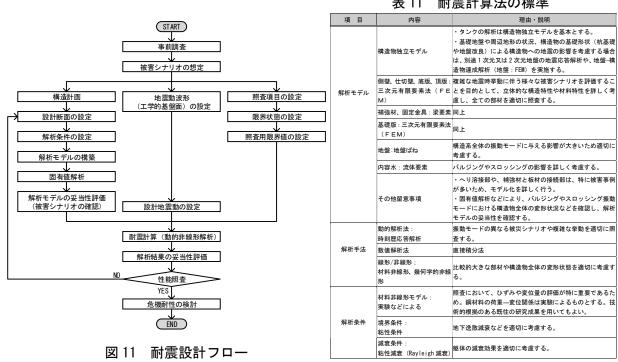
「こよる側板の損傷など 頂版や側板の損傷

「内部補強材 内部補強材 内部補強材 内部補強材

表 10 被災シナリオの例(水槽本体)

5.1.3 耐震設計

今後の耐震設計について、各規格の指針類の見直しが適切に行われるまでは、図 11 に示すフ ロー及び表 11 に示す耐震計算法に従い、耐震設計を行う。ただし、矩形ステンレスタンクの耐 震計算では、耐震計算法が確立されていないことに留意し、解析モデルの妥当性確認、設計地震 動の設定、照査用限界値の設定、及び解析結果の妥当性確認などにおいて、学識経験者らによる 評価など、より慎重な対応を必要とする。



耐震計算法の標準 表 11

※設計地震動 (レベル2) の設定

矩形ステンレスタンクの振動特性と地震動特性の関連が明確になり、合理的な耐震設計法と適 切な設計地震動の設定が確立されるまで、レベル2地震動は表12に示す設計地震動を用いるこ とを必須とする。

分類	地震動	備考
短周期が卓越する	2011 年東北地方太平洋沖地震 K-NET 築館	海溝型地震
地震動波形	2024 年能登半島地震 K-NET 富来	内陸直下型地震
長周期が卓越する	1995 年兵庫県南部地震 JR 鷹取	内陸直下型地震
地震動波形	2011 年東北地方太平洋沖地震 KiK-net 浪江	海溝型地震

表 12 矩形ステンレスタンクの耐震設計で用いるレベル 2 地震動

5.2 既設矩形ステンレスタンクの耐震化対策

5.2.1 当面の課題

現段階では、既設矩形ステンレスタンクの耐震補強方法、耐震診断方法(静的解析等による簡易な手法)確立されていないため、具体的な対策の実施は困難である。当面の対策として、矩形ステンレスタンクを保有する事業体においては、下記の対応が望まれる。

- ① 耐震補強が完了するまでレベル2地震動の対応施設と扱わない(非耐震化施設)
- ② 応急給水拠点としての機能が喪失されることを前提とした応急給水計画の策定
- ③ 構造物が被災した場合に備えて、復旧工事のためのアクセス道路の確保
- ④ 配水池の機能喪失に備えたバックアップルートの確保
- ⑤ 近隣事業体との相互融通管路の確保

5.2.2 耐震診断

既設矩形ステンレスタンクの耐震性を評価するにあたっては、地震動の周期特性、サイト特性、構造物の振動特性、構造特性等を十分に勘案し、適切な解析モデル・解析手法を用いる必要がある。現時点では、簡易な静的解析手法が確立されていないことため、新設と同様な解析モデル、解析手法を用いる。

5.2.3 耐震補強

矩形ステンレスタンクの耐震対策は研究段階であるが、今後の耐震補強を考える上での方向性 を考察する。

矩形ステンレスタンクの被害要因は、内容水のスロッシングとバルジングによる動水圧が設計 時の想定値を超えたことによる内部補強材や側壁の変形と考えられている。そのため、対策とし ては、構造部材の強度を高くする方法と動水圧を小さくする方法に大別して以下のように考察し ている。

○部材強度等を高くする方法

- 1) 部材断面を大きくし、応答値を限界状態以下とし、所定の性能を確保する。
- 2) 靱性に富み高強度の材料の開発
- ○動水圧を小さくする方法
- 1) 構造物の剛性を高め、バルジングが発生しにくい 10Hz 以上の固有振動数とする。
- 2) バルジング、スロッシングの発生を抑制する装置の開発
- 3) 免振装置の開発 (入力地震動の周期特性を変化させ、バルジング及びスロッシングを抑制)

6. 結言

本研究では、ステンレス鋼板製一体型タンク及びステンレス鋼板製パネルタンクを対象とした動的解析手法の検証に重点があった。しかし、既設ステンレスタンクの耐震診断及び補強方法も大きな課題であるため、矩形ステンレスタンクの運用には様々な課題があることに留意したうえで今後も検討していく必要がある。