

地震時における各受水槽の振動応答特性とその対策

○中央大学大学院 学生員 塩野谷 遼 (株)十川ゴム 正会員 井田 剛史
中央大学 正会員 平野 廣和 中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

東日本大震災では、受水槽の被害により病院、学校等の避難所でライフラインである水が十分に配給されず甚大な被害をもたらした。この被害は大きく分けて二種類あり、天井や上部の壁面が破損した事例、真ん中より下側の壁面や隅角部が破損した事例である。前者は、やや長周期地震動により励起されたスロッシングなどの液面揺動に起因し、後者はタンク構造体の振動が主体となるバルジングに起因すると考えられる。

一方、表-1に示す井上ら¹⁾の東日本大震災域での146機の被害受水槽の調査によると、125機余りがバルジングによる破損が主要因であると指摘している。このように東日本の広範な地域でバルジングの被害が顕著であるので、今後受水槽をはじめとする給水タンクの耐震安全性を向上させるためには、スロッシングのみならずバルジング現象の解明が重要であり、かつバルジング対策をどのように耐震設計に取り入れていくかが、一つのポイントになるものと思われる。

ところで一般に広く使われている受水槽は、壁面の素材によりFRPタンク（以下、FRP）、ステンレスパネルタンク（以下、SUS）、鋼板一体形タンク（以下、鋼板）に分けられる。また、壁面が液体と接して振動する場合、壁面が剛体として振動するか、弾性体として変形しながら振動するかによって、その性状に違いが出てくると考えられている²⁾。既往の研究では、箕輪ら³⁾や著者らの研究グループ⁴⁾のSUSタンクの実験、吉原ら⁵⁾、Sekiら⁶⁾のFRP製タンクの実験・解析などがあるが、これらはどれも同一構造形式のタンク毎の検討が主であり、構造形式の違いを比較・検討した研究は少ないのが現状である。

そこで本研究では、同一寸法の三種類の実機受水槽を大型振動台に設置して振動実験を行い、タンク構造形式の違いによるタンク構造体の振動が主体となるバルジング挙動の違いを明らかにする。ここでは、タンク壁面に加速度計と圧力計を設置し、加振時にタンク壁面の応答加速度と内溶液による動液圧を計測することで、タンク構造形式による挙動の比較・検討を行う。

2. 実験概要

写真-1～3に示す各辺3,000mmの各受水槽に水深2,700mmまで水を注水し、加振実験を行う。各受水槽の特徴として、SUSは天井と上段パネルの板厚1.5mm、材質はSUS329J4L、底板、中・下段パネルの板厚2.0mm、材質はSUS444Lである。内部構造は補強材などが入り組んでいる。鋼板は板厚4.5mm、材質はSS400を使用し、内外面溶接一体のコルゲート構造になっており、内部に補強材などはない。FRPは板厚10mmであり、外部に補強材と内部に屋根を支える棒が立ててある。

本実験で計測する応答加速度は、図-1に示すように壁面の中心に底面からの高さ500mm、1,500mm、2,500mmの3箇所それぞれ加振方向に加速度計を設置し計測する。圧力計は加速度計と同様の3箇所に加え、天井である3,000mm地点の

表-1 被災タンクの施工年度・材料別件数

施工年		1981年以前に施工 (1981年新耐震施行)	82～96年に施工	1997年以降に施工 (1995年版大震災)	不明	合計	
材料別	FRP	基数	31	39	6	31	107
		受水槽	14	26	5	21	66
		高層水槽	17	13	1	10	41
	ステンレス	基数	0	3	7	3	13
		受水槽	0	2	7	1	10
		高層水槽	0	1	0	2	3
	合計	基数	31	42	13	34	120
		受水槽	14	28	12	22	76
		高層水槽	17	14	1	12	44
耐震基準の値		絶対応答加速度 SA(cm/s ²)	地表0.2g 屋上0.3g	地表(2/3)g 屋上1g	地表1g 屋上1.5g	—	
		疑似相対応答速度 PSV(cm/s)	—	—	地表150 屋上375	—	



写真-1 SUS タンク



写真-2 鋼板タンク



写真-3 FRP タンク

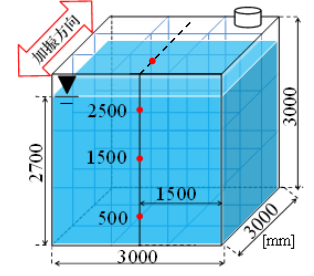


図-1 圧力計及び加速度計配置位置

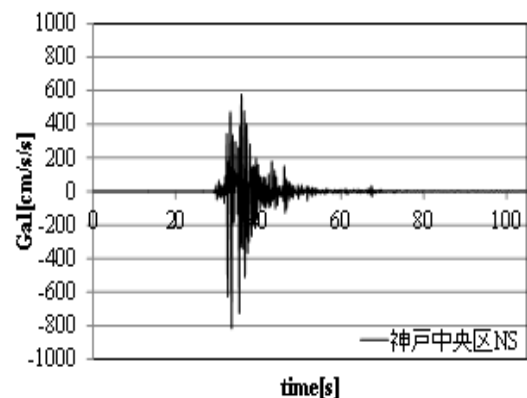


図-2 神戸波 NS 成分加速度波形

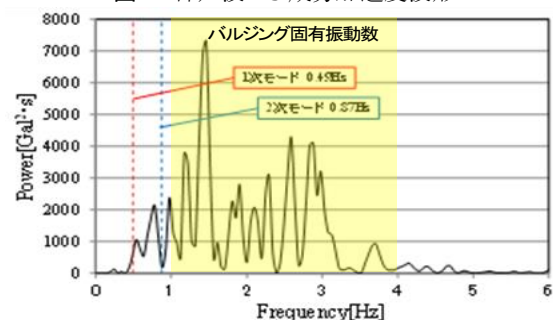


図-3 スペクトル解析結果

計4箇所を設置し計測する。圧力計には、(株)共和電業社製の低容量圧力変換器PGM-Gを用いる。これにより計測した圧力測定値は全圧力であるため、式(1)に示すようにそれぞれの圧力計の設置位置における静水压を差し引くことで動液圧を算出する。

$$\Delta P = P - P_0 \quad (1)$$

ここで、 ΔP は動液圧、 P は全圧力、 P_0 は静水压である。この方法によって、加振時の壁面に及ぼす動液圧に関して検討を行う。

入力波形は坂井が指摘しているバルジングの発生周波数域(1~4Hz程度)を有する地震波であり、図-2に示す兵庫県南部地震神戸海洋気象台で観測された加速度成分のうち、NS波成分を用いる(以下、神戸波)。

一般に最も波高が大きくなるのは振動台の入力振動数と容器のスロッシング固有振動数が一致して共振した場合である。そのため、矩形断面容器のスロッシング n 次モード振動数を式(2)の式より算出する。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot g}{L} \cdot \tanh\left[\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot H}{L}\right]} \quad (2)$$

ここで、 f_n はスロッシング振動数、 L は容器内壁間の幅、 H は水深であり、内溶液は水道水を用いる。本実験では水深を2,700mmに統一して実験を行うため、水槽の固有振動数は、1次モードで0.49Hz、2次モードでは0.87Hzである。

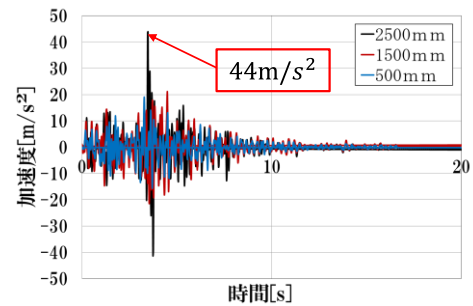
図-3に図-2で示した神戸波の加速度についてスペクトル解析を行なった結果を示す。ここに、今回使用する受水槽のスロッシング固有振動数1, 2次モードを破線で示す。

3. 実験結果

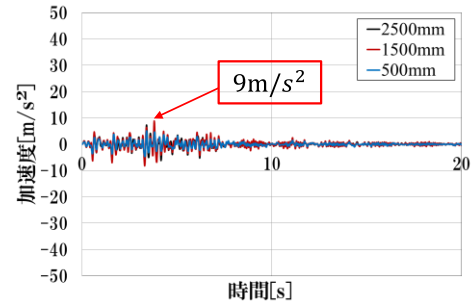
(1) 応答加速度

図-4に各受水槽において計測された壁面の応答加速度を示す。ここでSUSでは、最大加速度が約44m/s²であるのに対して、鋼板は約9m/s²程度となっており、鋼板の最大加速度はSUSの約1/5である。FRPでは最大加速度が約12m/s²程度でSUSと鋼板の間に位置する結果となった。

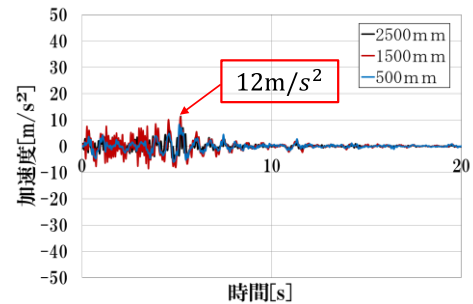
これは、SUSが板厚1.5~2mm程度のステンレスパネルの組合せで構成されていることから、元々パネルの剛性が低いので揺れやすい構造であることに起因している。さらにパネル間接合部分に補強材が多数入っているため、高さ方向に対して剛性の低い部分と剛性の高い部分とが入り組んだ構造となっている。そのためSUSは、加速度計の設置位置によって計測値に違いがある結果になった。また、内溶液の移動が起振元となってパネルが振動して加速度が大きくなったと考えられる。このことから、SUSでは壁面と内溶液が連成して振動するバルジング現象が発生したと推定される。一方、鋼板は、計測位置による違いは見られず、ほぼ同等の値を示している。これは、鋼板は板厚4.5mmかつコルゲート構造であるので壁面の剛性が高く、強度が均一になっていることによるものと思われる。また、剛性が高いことで壁面が振動せず、最大加速度が約9m/s²程度になったと考えられる。FRPでは、壁面の剛性が低いため内溶液の運動が支配的になり、そのため壁面自体の振動ではなく、内溶液の振動によって大きく壁面が変形するためSUSの最大加速度ほど大きくならなかったと考えられる。また、SUSと鋼板は加速度の最大が加振開始約3秒後で計測されているのに対し、FRPは約5秒後でありこのことからFRPの壁面が弾性体のように挙動していたことがわかる。



(a) SUS

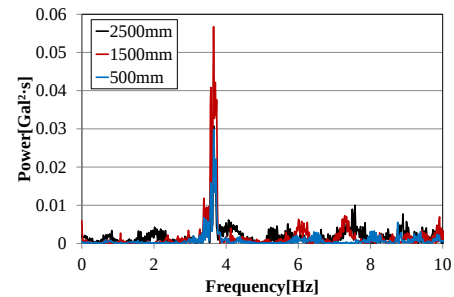


(b) 鋼板

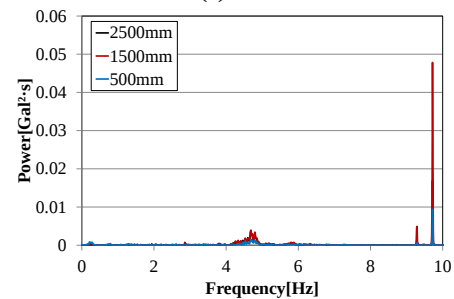


(c) FRP

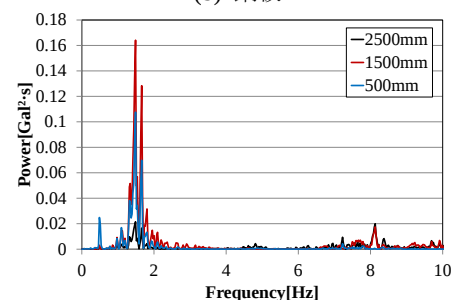
図-4 受水槽壁面の応答加速度



(a) SUS



(b) 鋼板



(c) FRP

図-5 加速度のスペクトル解析結果

(2) 加速度のスペクトル解析結果

壁面で計測された応答加速度をスペクトル解析した結果を図-5に示す。各受水槽を比較すると、スペクトルピークが異なっていることがわかる。SUSは、3.6Hz付近にスペクトルピークがあるのに対して、鋼板は4.7Hz及び9.7Hz付近にスペクトルピークが存在し、FRPでは2.1Hz付近にスペクトルピークを示している。この構造形式の違いによるスペクトルピークの差は、各受水槽の剛性が異なるためと考えられる。鋼板は剛性が最も高いことから高周波数側にスペクトルピークを示し、鋼板に比べSUSは剛性が低いため低周波数側にスペクトルピークが存在する結果になった。さらにFRPは剛性が低いことから最も低周波数側にスペクトルピークを示す結果となった。

次に図-3に示した神戸波のスペクトルと比較すると、SUSやFRPのスペクトルピークは、神戸波のスペクトルピークに近い値となっているため、SUSでは3.6Hz、FRPでは1.5Hzでバルジング現象が生じ、パネルの振動につながったと考えられる。これに対して鋼板は、内溶液のみのスロッシング現象が生じたことが考えられる。また、10Hz付近の高周波数帯をスペクトルピークに含む地震は起きにくいことから、高周波数側にスペクトルピークを有することで共振し、受水槽が破損する危険を防ぐことができる。

(3) 内溶液による動液圧

図-6, 7は、各受水槽において計測された壁面の最大圧力を計測地点毎に示す。この結果から全ての受水槽において、最大圧力が8~10kPa前後の値を示していることがわかる。しかし、最大圧力を計測した地点は異なっており、SUS、FRPでは、最大圧力を計測した地点が受水槽の高さ方向の半分である1,500mm以下の地点で計測されている。さらにSUSとFRPは、受水槽の底部に近づくにつれて圧力がほぼ一定となっている。これに対して鋼板は、壁面上部の2,500mm地点や天井の3,000mmで圧力が最大値を示している。また鋼板は受水槽の上部に近づくにつれて圧力が増加する傾向である。

これらの結果は、内溶液が起振によって水平に揺動する際に、SUSとFRPの場合は壁面の剛性が低いことから、壁面に直接作用して受水槽の壁面が膨らむように変形したことによると考えられる。一方、鋼板は、壁面の剛性が高いため起振によって内溶液が揺動した際に剛体に近い挙動となり、壁面の変形が少なかったと考えられる。その結果、内溶液が壁面を昇る様な形となり、天井や受水槽の上部に大きな圧力がかかったと考えられる。これらのことから、壁面の剛性の差により、内溶液の挙動とそれに伴う壁面への内溶液の荷重としての作用する状態が異なることが確認できた。

(4) 動液圧のスペクトル解析結果

壁面で計測された動液圧をスペクトル解析した結果を図-8に示す。各受水槽のスペクトルピークを比較すると、0.5Hz付近のところで全ての受水槽がスペクトルピークを示している。これは、タンク全体の1次モード固有振動数であることから加振時やその後の自由減衰になった際に、1次モードの挙動を示していたことが考えられる。

構造別に検討すると、SUSでは0.5Hzのほか3.7Hz付近にもスペクトルピークを示していることがわかる。この振動数は、加速度をスペクトル解析した際のスペクトルピークとほぼ一致していることから、内溶液の移動によって壁面の振動が生じていると考えられる。さらに、3.7Hz付近で卓越し

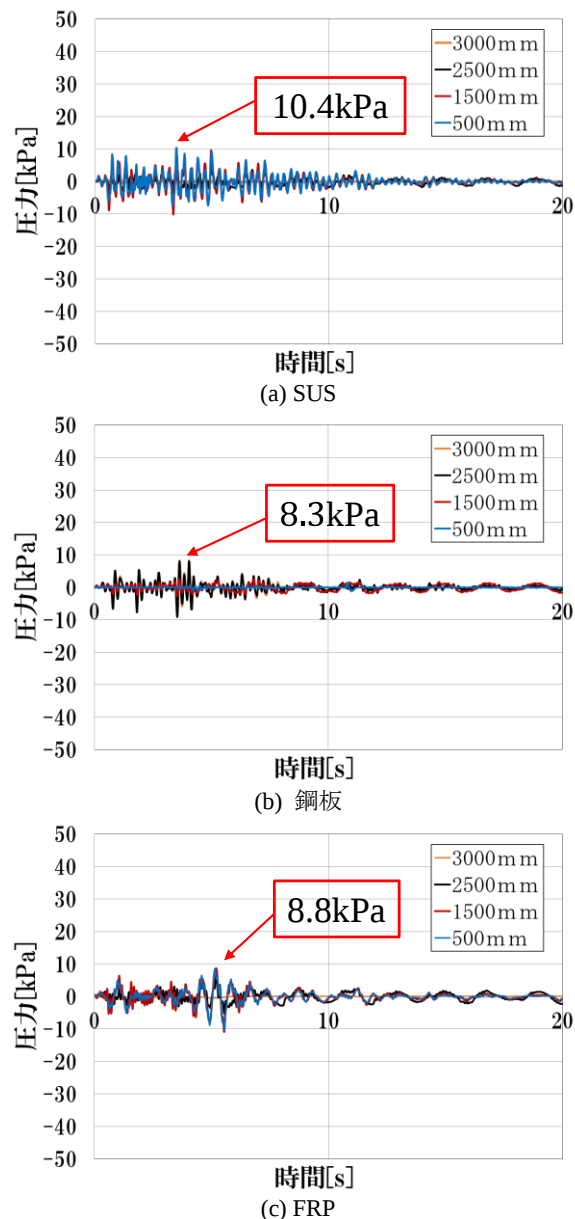


図-6 受水槽壁面の応答動液圧

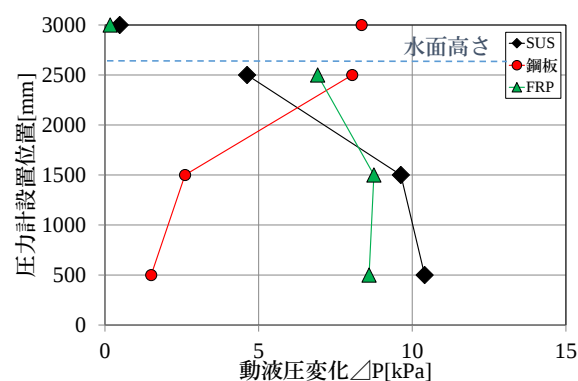


図-7 受水槽壁面の最大動液圧比較

ているスペクトルピークは、1,500mmと500mm地点での圧力計が主であることから、タンク下部では内溶液の移動により壁面の振動が生じたことがわかる。このことからSUSは、バルジング現象が発生したと推測できる。

次に鋼板は、スペクトルピークはほぼ0.5Hzに集中しているが、わずかに9.7Hzにもスペクトルピークが存在していることがわかる。これはSUS同様、加速度のスペクトル解析した結果と一致していることから壁面での振動が微小なが

らも内容液に影響を与えていたことが考えられる。しかし、0.5Hz でのスペクトルピークの卓越ほどではないことから、鋼板ではほぼタンクの1次モード固有振動数で内容液が揺動していたことがわかる。加速度計による計測結果や最大動液圧の推移から推測していた通り、壁面の剛性が高いことから壁面が振動せずタンク上部で顕著に揺動するスロッシング現象の挙動がより表れた結果になったと考えられる。

最後に FRP は、タンクの1次モード固有振動数である0.5Hz の他に1.5Hz 付近にもスペクトルピークが存在している。さらに他の受水槽と比べ、明確に0.5Hz 以外の周波数にスペクトルピークを示している。これは、前述した壁面の剛性が低いことに要因していると考えられる。また SUS 同様、タンクの1次モード固有振動数である0.5Hz では、タンクの上部である2,500mm でスペクトルピークが存在しているのに対し、1.5Hz 付近では500mm や1,500mm でスペクトルピークが存在している。このことから水面付近で顕著に発生するスロッシング現象とタンク下部で主に発生するバルジング現象の特徴が混在している結果になったと考えられる。

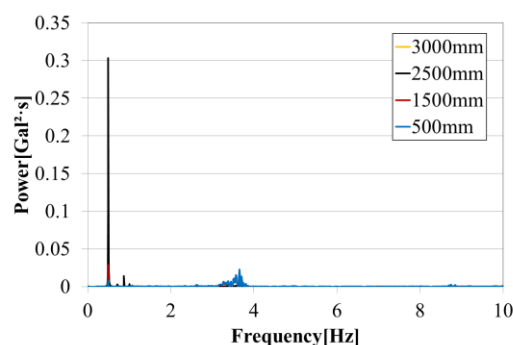
4. おわりに

本報では、一般に広く使われている壁面の構造形式が異なる3種類の同一寸法の受水槽を使い、大型振動台を用いて実際の地震動での振動実験を行い、バルジング応答特性の違いを明らかにしてきた。この結果、タンクの構造別に比較すると、壁面の剛性の違いが内容液の挙動や動液圧の作用する位置に関与していることがわかった。具体的には、受水槽の壁面での応答加速度のスペクトルピークは、FRP、SUS、鋼板の順で高周波側に存在している。さらに、FRP と SUS のスペクトルピークは、坂井ら²⁾が指摘しているバルジング発生域周波数帯に入っていることである。

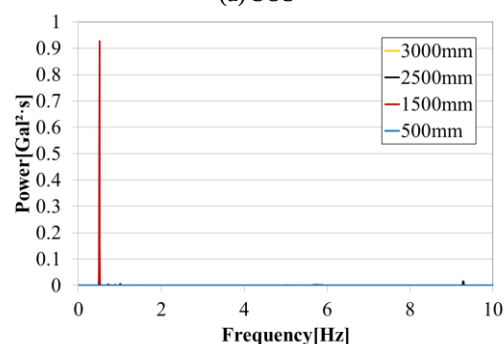
鋼板は、壁面の剛性が他の二つより高いので、応答加速度の値が小さく、壁面の応答加速度のスペクトルピークが高周波側にあることから、バルジング発生域周波数に入っていないことがわかる。さらに、内容液による動液圧の結果からも、0.5Hz 付近にスペクトルピークを示し、かつタンク上部に行くにつれて動液圧が大きくなっていることからバルジング現象の発生は考えにくい。よって、鋼板のバルジング現象に関してはここで取り上げた大きさでは安全であると考えられる。ただし、スロッシングに関しては十分な検討をする必要がある。

これに対して SUS と FRP は、鋼板と比較して壁面の剛性が低いことから、応答加速度のスペクトルピークが低周波側に存在し、これがバルジング発生域周波数に存在している。さらに動液圧ではスロッシングの固有振動数以外にもスペクトルピークを示しており、最大動液圧も下部に行くにつれて大きくなっている。これより壁面の剛性の低い SUS と FRP では、バルジング現象の発生が考えられる。

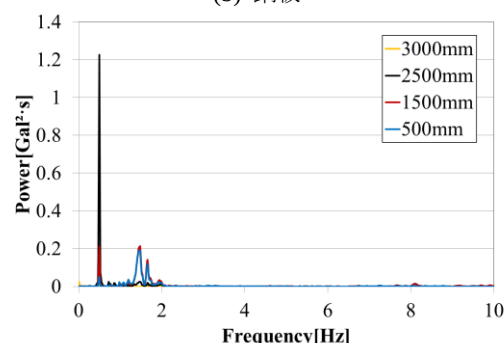
ところで、各受水槽形式毎の最新の設計基準において、バルジングに対する設計基準がほとんど無いのが現状である。特に SUS と FRP に関しては、壁面の応答加速度のスペクトルピークがバルジング発生域周波数に入る可能性が高いので、早急にバルジングに関する新たな設計基準を規定する必要がある。これらの形式は、最新の設計基準で設計された水槽においても東日本大震災で多数の被害発生例が報告されている¹⁾ことを鑑み、早急に新たな設計基準を規定することが必要である。



(a) SUS



(b) 鋼板



(c) FRP

図-8 動液圧のスペクトル解析結果

謝辞：本研究の一部は、(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究 (B) ならびに中央大学特定課題研究費の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 井上 他：2011年東北地方太平洋沖地震における水槽の広域被害および地震動特性との関連の分析，第34回地震工学研究発表会，A13-639，2014。
- 2) 坂井 他：土木学会地震工学委員会水循環 NW 災害軽減対策研究小委員会 TF 報告書，2015.3。
- 3) 箕輪親宏，清水信行，鈴木純人：ステンレス長方形水槽の耐震実験(その1)，(その2)，日本機械学会，Dynamics and Design Conference 2000，2000。
- 4) 小野泰介，曾根龍太，井田剛史，平野廣和，佐藤尚次：スロッシング発生時に受水槽壁面が受ける動液圧に関する実物実験，土木学会論文集 A2 分冊(地震工学)特集号，2014.6。
- 5) 吉原醇一，角田智彦，安井謙，中村獄：可撓性矩形水槽の振動特性について，大林組技術研究所報，No.20，pp17-24，1980。
- 6) Seki, W.C. Minowa and M. Toyosima: Earthquake response analysis of a FRP water tank, ASME PVP (Am Soc Mech Eng Press Vessels Pip Div), No.364, pp.47-54, 1998