

実機貯水槽を用いてのスロッシング発生時の 壁面に及ぼす動液圧変化に関して

小野 泰介¹・曾根 龍太²・井田 剛史³・平野 廣和⁴・佐藤 尚次⁵

¹学生会員 中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)
E-mail:ono@civil.chuo-u.ac.jp

²学生会員 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 榊十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市中区上之516)

⁴正会員 中央大学教授 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野742-1)

⁵正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

東北地方太平洋沖地震において、上水道配水施設での矩形貯水槽の破損被害が多数報告されている。多くの場合、壁面が破壊されている。このような貯水槽の被害は、やや長周期地震動により励起されたスロッシング現象（液面揺動の励起）が一つの原因とされている。そこで本論文では、実機貯水槽タンクを大型振動台で加振実験を行い、壁面に作用する力を圧力計を用いて計測し、加振方向の変化、加振時間の変化と加振振幅の変化によりスロッシング挙動がタンク壁面に与える影響を検討し、その違いを明らかにすることである。これにより、タンクの隅角部ならびに天井付近が構造的に弱点となる可能性が高いことを把握した。

Key Words : sloshing, real scale tank, fluid pressure, quadrate section, shake direction angle

1. はじめに

我国では、2~20秒のやや長周期地震動による各種の地震被害が懸念されている。その中2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)において、被害地域内の上水道配水施設での矩形貯水槽の破損被害や、震源から遠く離れた地方においても矩形貯水槽の破壊被害^{1)~3)}が多数報告された。東日本大震災ではこのように上水道貯水槽の被害により病院、学校の避難所等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。同様な上水道貯水槽の被害⁴⁾は、2004年新潟県中越地震、2007年の能登半島地震、同年新潟県中越沖地震でも発生したが、この事実の詳細は、十分に把握されずに至っている。

このような貯水槽の被害は、やや長周期地震動により励起されたスロッシング現象（液面揺動の励起）が一つの原因であると考えられている^{1)~3)}。近い将来発生する東海地震、南海地震、南海地震等の海溝型地震、一部の直下型活断層型地震などは、2~20秒のやや長周期の地震を強く励起する可能性が高いので、貯水槽の動的な挙動を把握することは、社会的に大きなニーズがあると考えられる。その際、大型容器の内容液が放射性物質や汚染物質であれば、溢流した場合には甚大な被害が生じる可能性が高い⁵⁾。そのため、円筒形である石油タンク、核燃料貯蔵プールなどの矩形水槽をはじめとして、各種大

型容器におけるスロッシング現象の把握^{6),7)}、さらにはスロッシング対策の必要性が挙げられ、浮屋根の減衰対策⁸⁾や溢流の把握^{9),10)}に代表される各種の研究がなされている。

これを受けて著者ら^{11),12)}は、まず矩形断面容器の中でも断面の各辺の長さが等しいことが特徴である正方形断面容器について、アクリル製の小型容器を用いて、加振方向角を変化させた場合のスロッシング挙動の違いを把握し、正方形断面が特徴ある挙動を示すことを明らかにしてきた。正方形断面は加振方向角が変化することによって、隅角部で波高が著しく増大し、スロッシング対策等を実施する場合には、隅角部での十分な注意と検討が必要であることがわかった。

次に小型容器での成果を基に、実機ステンレス製パネル式タンクを大型振動台に設置して1次、2次モード付近の振動数で加振実験を行い、容器内の波高を計測して基本的なスロッシング挙動を把握してきた^{13),14)}。ここでは、加振方向角45°、1次モード加振時に隅角部に波が集中し、応答波高が著しく増大することを確認した。また、減衰定数は加振方向角に依存せず小さな値をとり、一度共振するとなかなか減衰しないことがわかった。そのためスロッシング対策等を実施する場合には、隅角部に十分注意し、かつ減衰を付加させる検討が必要であることを掴んだ。

これを受けて本論文では、貯水槽タンクの破壊被害の原因の一つとして考えられるスロッシ

ング現象が、貯水槽タンク壁面に及ぼす影響を検討する。ここでは、貯水槽タンク壁面に作用する力を圧力計を用いて計測する。具体的には実機の正方形ステンレス製パネル式タンク（以下、タンク）を用いて、これを大型振動台に設置して1次、2次モード付近の振動数で加振実験を行い、タンク壁面の動液圧変化を計測する。ここでは、加振方向の変化、加振時間の変化と加振振幅の変化によりスロッシング挙動がタンク壁面に与える影響を実機の貯水槽で検討し、その違いを明らかにする。

2. 実験概要

(1) ステンレス製パネル式タンク

本実験には、写真-1に示す実機の正方形断面ステンレス製パネル式タンクであり、実際に貯水槽として使用されていたタンクである。タンクの寸法は、3,000mm×3,000mm、高さ3,000mmとなる。タンクの板厚は天板、側板の上段と中段が1.5mm、側板下段と底板が2.0mmである。このタンクに通常貯水槽として使用されている時と同じである内容量9割の水深2,700mmまで水を満たして加振実験を行う。

(2) 圧力計設置位置

圧力計設置位置は、図-1に示すように圧力計をタンクの底から高さ500mm、1,500mm、2,500mm及び天井の3,000mmの4箇所の位置の容器壁面に設置する。これにより、スロッシング現象がどの水深まで影響を及ぼすか鉛直方向の比較検討をする。また、それぞれ隅角部から200mm離れた点をA（以下、隅角部A）、1,500mm離れた点をB（以下、壁面部B）とし、これから、スロッシング現象が同水深において水平方向の比較検討を行う。よって、合計8箇所に圧力計を設置して動液圧変化を計測する。

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)に示すように図-1に示すそれぞれの圧力計設置位置における静水圧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 は動液圧変化、 P は全圧力、 P_0 は静水圧である。この方法によって、スロッシング発生時の壁面に及ぼす動液圧変化に関して検討を行う。

(3) 実験パラメータの設定

振動台は、愛知工業大学所有の大型振動実験装置を使用する。大型振動台の諸元は、テーブルサイズ 6,000×10,000mm、搭載荷重 1,500kN、最大変位±20mm（運用上現在は±10mm 以下）、振動数範囲 DC~50Hzである。この振動台で設定



写真-1 実験に用いたステンレス製パネル式タンク

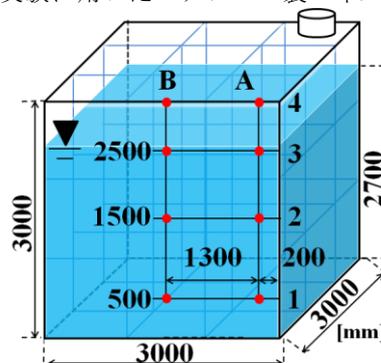


図-1 圧力計の配置位置

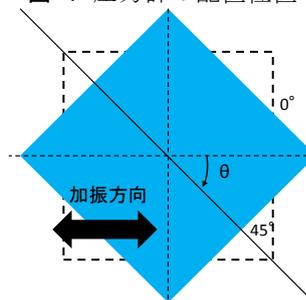


図-2 加振方向角θの設定方法

できるパラメータは振動数と振幅の2つであり、振幅を設定するアナログ式のダイヤルを手動で調節することで、振幅と加振時間とを設定する。ここで加振時間は、加振立上、定常加振、加振収束までの時間とする。加振は大型油圧ジャッキを用いて、タンクを設置した振動台を水平方向から正弦波を外力として変位制御することで行う。

ところで正方形断面を有する容器の特徴は、長辺と短辺がなく、各辺の長さが等しいために各辺のスロッシング固有振動数が等しくなること¹²⁾が特徴である。そのために加振方向角を変化させて行った場合に、スロッシング挙動に影響してくることを確認している。そこで本研究では、正方形断面容器を加振する方向角θを図-2のように定義して、θ=0°~45°の間で15°間隔で設定する。事前の加振実験^{13),14)}より、タンクの固有振動数はいずれの加振方向角においても1次モードは0.49Hz、2次モードは0.87Hzで最大波高が卓越した。また、1次モード0.49Hz加振、加振方向角45°において波高は最大となることがわかっている。以上より、入力振動数は1次モードでは0.49Hz、2次モードでは0.87Hzとする。

加振方向の変化による動液圧の変化を把握の

表-1 実験条件

	1次モード	2次モード
容器内壁間の幅L[mm]	3000	
水深H[mm]	2700	
固有振動数理論値[Hz]	0.50	0.88
入力振動数[Hz]	0.49	0.87
加振方向角[°]	0, 15, 30, 45	
振幅[mm]	1~8(1mm刻み)	
設定加振時間[s]	10, 20, 30	

ための加振実験では、振幅±3mm、設定加振時間10秒に統一し行う。この設定条件における加振時の加速度は、1次モードでは3Gal相当で地震震度階級では震度2程度、2次モードでは9Gal相当で地震震度階級では震度3程度となり、小さな加速度で加振実験を行うこととなる。

次に、加振時間の変化による動液圧の変化を把握するための実験では、波高が最大となる1次モード0.49Hz、加振方向角45°に統一し、振幅±3mmにおける設定加振時間を10秒、20秒、30秒と変化させ加振実験を行う。

また、加振振幅の変化による動液圧の変化を把握するための実験では、波高が最大となる1次モード0.49Hz、加振方向角45°に統一し、振幅±1mmから1mm刻みで±8mmまで変化させ、設定加振時間10秒に統一し加振実験を行う。この設定条件における加振時の加速度は±8mmで最大で8Gal相当で地震震度階級では震度3程度となる。以上の実験条件をまとめて表-1に示す。

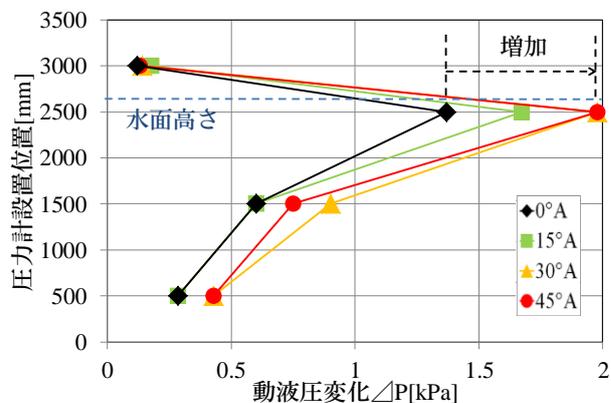
3. 実験結果

(1) 加振方向の変化による検討

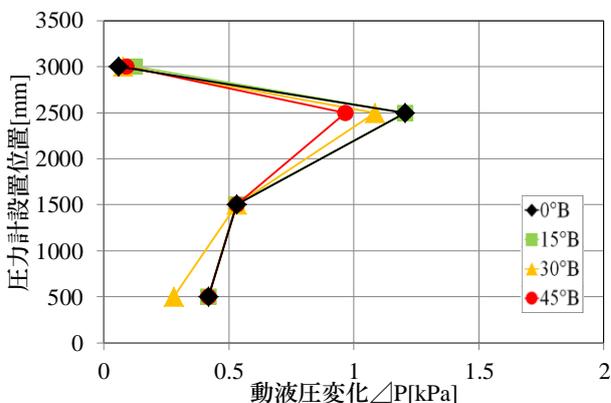
図-3、図-4にそれぞれ1次、2次モードの振幅±3mm、設定加振時間10秒、各加振方向を変化させた時の動液圧変化(ΔP)を示す。ここで(a)は隅角部A、(b)は壁面部Bの結果である。

図-3の加振方向角0°に着目すると、2,500mm位置において、隅角部Aでは最大値1.3kPaを示し、壁面部Bでは1.2kPaを示し、同水深位置で両者ほぼ同等の値となった。また隅角部Aでは、加振方向角が増加するにつれて500mm位置を除き動液圧変化が増加していることが確認できる。しかし、壁面部Bでは加振方向角が変化することでの動液圧変化は、どの計測位置においてもほとんど見られない。

ここでの特徴は、加振方向角45°において2,500mm位置で隅角部Aが2.0kPaとなり、加振方向角0°の時の1.3kPaの1.6倍、加振方向角45°の壁面部Bで示した1.0kPaの2倍の値を示したことがある。これより隅角部Aと壁面部Bの比較から、隅角部に近いほど、かつ水面に近いほど内容液の壁面に及ぼす力が大きいことがわかる。これは加振方向角を45°に近づけることで、隅角部に

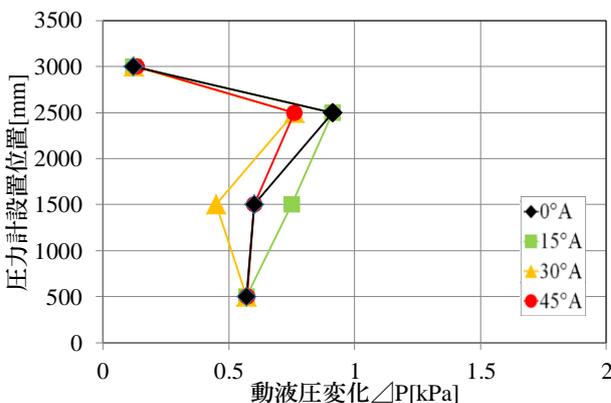


(a) 隅角部 A

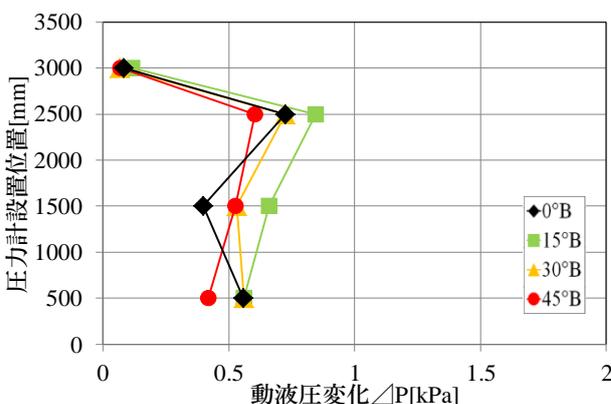


(b) 壁面部 B

図-3 1次モードの加振方向角毎の動液圧分布



(a) 隅角部 A



(b) 壁面部 B

図-4 2次モードの加振方向角毎の動液圧分布

内容液が集中しているためと考えられる。また、内容液の水面の高さに近い2,500mmの位置で、いずれの加振方向角においても、動液圧変化は1.0~2.0kPaとなっている。これよりスロッシング現象による力の作用が、内容液の水面高さ付近である2,500mmの位置で大きく作用していることが考えられる。これはタンクの壁面全体に力を及ぼすバルジング現象ではなく、内容液水面付近で局所的に力を及ぼすスロッシング現象（液面揺動の励起）特有のものであることがわかる。

図-4より、2次モードでは圧力計の計測点に関わらず、動液圧変化は0.6~0.9kPaとほぼ同等の値を示した。このことから2次モードでは1次モードに比べ計測点の違いと加振方向角の変化による影響が小さいことがわかる。

以上より、1次モードの方がいずれの加振方向角においても動液圧変化の値が大きくなり、1次モードのスロッシング現象がタンク壁面に及ぼす力が大きいことがわかる。特に水面に近い程、その傾向は顕著に表れている。

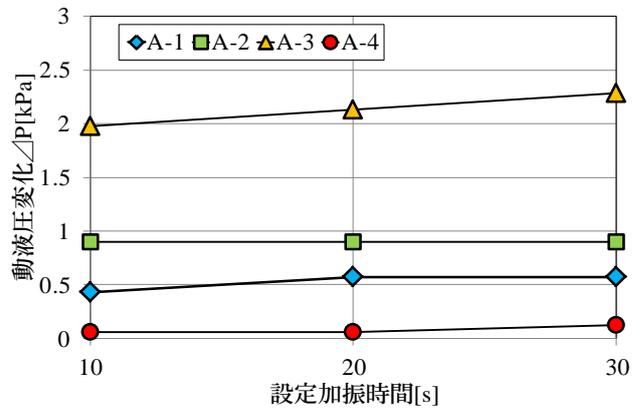
(2) 加振時間の変化による検討

図-5に振幅±3mm、1次モード加振方向角45°における設定加振時間と動液圧変化の関係を示す。それぞれ(a)隅角部Aと(b)壁面部Bにおける設定加振時間と動液圧変化の関係である。ここでは、設定加振時間を10秒、20秒、30秒と変化させた結果を示す。いずれの圧力計設置位置においても設定加振時間を変化させた場合、動液圧変化の値の変化はほとんどなかった。このことから、動液圧変化の値は、内容液が天井に到達しない場合、設定加振時間の変化に依存していないことがわかる。

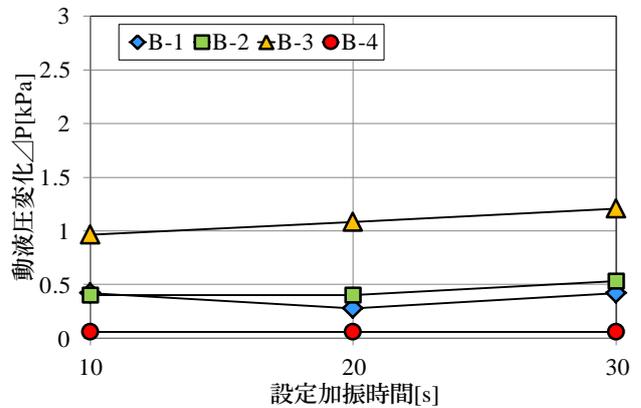
(3) 加振振幅の変化による検討

図-6は、1次モードにおける加振方向角45°での振幅と動液圧変化の関係を表したものである。ここで(a)は隅角部A、(b)は壁面部Bの結果である。

図-6(a)の3,000mm位置（天井部）であるA-4に着目すると、内容液が天井に到達し始める振幅±4mmから動液圧変化が急激な増加を示している。ここで、設定した最大振幅±8mmにおいて、動液圧変化の値は最大の18kPaを示している。このことから振幅の増加に伴い内容液が天井に到達することで、壁面に及ぼした2~9倍の大きな力が天井に作用していることがわかる。これが天井付近での被害^{2),3)}を発生させた可能性が高い。なお、今回の実験では大型振動実験装置の性能限界から最大振幅が±8mmであったが、より大きな振幅を与えることができれば、天井や壁面隅角部にさらに大きな動液圧変化を及ぼすことになると予想される。前述のようにここでの加振加速度は、最大で8Gal相当で地震震度階級では震

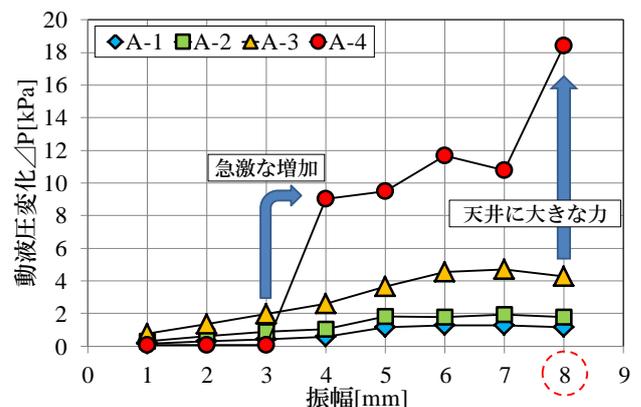


(a) 隅角部 A

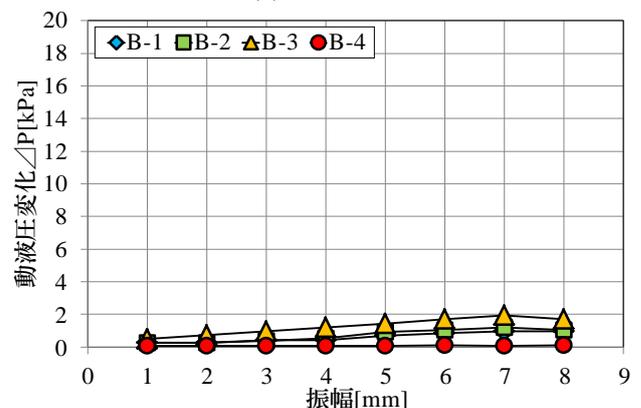


(b) 壁面部 B

図-5 1次モード加振方向角45°における設定加振時間と動液圧変化の関係



(a) 隅角部 A



(b) 壁面部 B

図-6 1次モード加振方向角45°における振幅と動液圧変化の関係

度3程度である。そのため、震度が大きくなればさらなる力が作用することになる。

一方、2,500mm位置であるA-3に着目すると、振幅±6mmまでは、動液圧変化は振幅と比例関係があり、振幅依存性を有していることが考えられる。特に振幅±6mm以降では動液圧変化の増加は見られなかった。これは振幅が増加することで内容液がタンク天井に到達し、砕波したためと推測される。これに対してタンク底からの高さ1,500mm位置のA-2、500mm位置のA-1に着目するとこれらには振幅依存性は見られず、ほぼ一定の値を示している。このことからスロッシング現象は、水面近くのみで大きな揺動が生じていることになる。一般にタンクは上段の方が板厚が薄いので、強度的に弱い部分でスロッシング現象が生じていることになる。

図-6(b)に壁面部Bで計測した1次モード、加振方向角45°における振幅と動液圧変化の関係を示す。壁面に設置したB-1～B-3の圧力計設置位置では、振幅の増加に伴い緩やかに増加傾向を示しているものの、ほとんど影響が見られない。また、天井に設置したB-4についても隅角部Aと比較すると、B-4では今回の実験範囲で内容液がタンク天井に到達することはなかった。これらことから壁面部Bは動液圧変化の振幅依存性はほとんどないと考えられる。

以上のことから、隅角部Aは振幅依存性が有り、壁面部Bは振幅依存性がなかった。このことから隅角部Aでよりタンクの破壊が懸念される。

4. おわりに

本論では、実機の正方形ステンレス製パネル式タンクを用いて、加振方向の変化、加振時間の変化と加振振幅の変化による加振実験を行い、内容液の動液圧変化の把握を行なうことでスロッシング挙動の検討を行った。

1次モード、加振方向角0°において、隅角部Aと壁面部Bで動液圧の変化はほぼ同等の値となった。一方、加振方向角が増加することで、動液圧の変化はいずれの加振方向角においても隅角部Aの方が壁面部Bより大きな値を示し、タンクに及ぼす力が大きかった。さらに、内容液の水面2,500mm付近において動液圧変化の値は大きく、スロッシング現象によりタンクに及ぼす力が大きくなった。

また、動液圧変化は振幅の増加に伴い増加傾向であった。このことから動液圧の変化は、振幅依存性を有していることを確認した。さらに振幅の増加により内容液が天井に到達し始めると、隅角部Aで動液圧変化は壁面部Bの2~9倍となり、最大の振幅±8mmにおいて動液圧変化の値が最大の18kPaと大きな値を示した。これより内容液は、タンクの天井に大きな力を及ぼし、隅

角部ならびに天井付近が構造的に弱点となる可能性が高いと考えられる。

ところで、実際の東北地方太平洋沖地震の様な大地震動では、今回の実験における振幅よりもはるかに大きい加速度と振幅が生じる。そのため、大地震が発生した際には、スロッシング現象によってタンクの隅角部ならびに天井付近における破壊が予測される。これは、被害調査結果^{1)~3)}と合致している。

今後の課題としては、動液圧による応力度を算定し破壊モードを特定していくことが必要である。ここで使用したステンレス製パネル式タンクは、内部に主として引っ張り材としての補強材が張り巡らされているので、スロッシングによる変動液圧を外力とした補強材を介しての力の伝達を考慮した構造解析が必要である。

謝 辞

本研究を行うに際し、愛知工業大学都市環境学科、奥村哲夫教授及び鈴木森晶教授の協力を得た。また、(株)ムラジ 連重俊博士から貴重な助言を得た。実験を行うに際しては、愛知工業大学都市環境学科及び同大学院工学研究科建設システム専攻の学生諸君から協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。最後に、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)(研究代表者：平野廣和)及び(独)科学技術振興機構研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：東日本大震災水道施設被害状況調査報告書(平成 23 年度災害査定資料整理)，2012.12.
- 2) 水上邦夫：東日本大震災によせて一水槽の被害一，(社)埼玉建築設計監理協会会報，pp.10-15, No.110, 2012.3.
- 3) (社)リビングアメニティ協会給水タンク委員会：東日本大震災における給水タンク調査，ALIA NEWS No.128, pp.4-9, 2012.5.
- 4) 厚生労働省健康局水道課：平成 19 年能登半島地震水道施設被害等調査報告書，2007.8.
- 5) 東京電力株式会社：柏崎刈羽原子力発電所 1~7 号機原子炉建屋オペレーティングフロアにおける溢水について，健全委第 10-5 号，参考資料 1，2008.9.
- 6) 消防研究所：平成 15 年(2003 年)十勝沖地震に際して発生した出光興産(株)北海道製油所原油タンク火災に係わる火災原因調査報告書，2004.3.
- 7) 坂井藤一：2003 年十勝沖地震における浮き屋根子規タンクの被害について，日本鋼構造協会，JSSC, No.52, 2004.4.
- 8) 井田剛史，平野廣和，有田新平，佐藤尚次，奥村哲夫：スロッシング発生時の貯槽浮根挙動の一考察-φ4000 タンクモデルでの振動実験，土木学会論文集 A, Vol.63, No.3, pp.444-453, 2007.6.
- 9) 座間信作，山田實，西晴樹，廣川幹浩，平野廣和，

- 鈴木森晶：石油タンクのスロッシングによる内溶液の溢流の算定，消防研究所報告，第 101 号，pp.14-20，2006. 9.
- 10) 酒井理哉，東貞成，佐藤清隆，田中伸和：溢流を伴う矩形水槽の非線形スロッシング評価，構造工学論文集 vol.53，pp.597-604，2007. 3.
- 11) 池田達哉，井田剛史，平野廣和，佐藤尚次：矩形断面容器におけるスロッシング対策案の検討，応用力学論文集，vol.11，pp.549-556，2008. 8.
- 12) 遠田豊，井田剛史，平野廣和，佐藤尚次：矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象，土木学会論文集 A2 分冊（応用力学）特集号，Vol.15，pp.637-644，2012.8.
- 13) 遠田豊，曾根龍太，小野泰介，井田剛史，平野廣和：実機貯水槽を用いたスロッシング挙動の把握，防衛施設学会年次フォーラム 2013，B-3，2013.2.
- 14) 曾根龍太，小野泰介，井田剛史，平野廣和，佐藤尚次：矩形断面貯水槽におけるスロッシング制振対策の検討，土木学会論文集 A2 分冊（応用力学）特集号，Vol.16，pp.833-843，2013.8.

(2013. 9. 12 受付)

A REPORT ABOUT DYNAMIC FLUID PRESSURE BY SLOSHING ON THE WALL OF A REAL WATER TANK.

Taisuke ONO, Ryuta SONE, Tsuyoshi IDA, Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

It has been reported that many cases of damages at rectangular water tanks in water supply facilities, under Tohoku earthquake. In many case, wall panels are destroyed. This kind of damages is thought to be caused by sloshing which is risen by long term earthquake. In this paper, the authors measured water pressure by sensors at surface of the wall through experiment with real scale water tank on large shaking table. The purpose is examining an effect on wall by variety of shake direction angle, shake time and shake amplitude and understanding the differences. In the end, we found out some possibility of that the part near corner and roof of tank being structural weak point.