

I-B91

鉛直加振によるスロッシングの過渡応答挙動

川崎重工	正会員	月岡 康一
川崎重工		吉原 健雄
川崎重工		谷口 朋代
川崎重工		中尾 彰紀

1. はじめに

地震によるスロッシング挙動については、原油貯槽の損傷や大型LNG貯槽の建設を機に活発な研究が進められた。柴田らはスロッシング波高を設定する手法として3波共振法を確立し、坂井らは設計用長周期地震波の研究を行った。ところが、兵庫県南部地震のような直下型地震では、従来研究されてきた水平動に劣らず鉛直動も重要な役割を果たすと言われている。しかし、地震によるスロッシングの研究で、鉛直動を扱った例はあまり見られない。高山⁽¹⁾は水平動と鉛直動が作用する貯槽振動の線形解を導き、池田ら⁽²⁾は鉛直動の場合の非線形解を求めて実験と符合するとした。これらは鉛直動の基本特性を解明する上で有益な情報を提供しているが、それを設計に反映するための研究はほとんどない。

さて、貯槽の耐震設計で変位型地震動を扱う場合、過渡応答挙動を知ることが重要である。ここでは、鉛直動による過渡応答挙動を調べると共に、水平動と鉛直動が同時に作用する場合についても検討する。振動数が最も小さい逆対称1次（以下(1,1)次と呼ぶ）と軸対称1次（以下(0,1)次と呼ぶ）のモードを対象に、大型模型実験および数値計算を行った。鉛直方向の加振では、応答が最も顕著な1/2-Subharmonicに着目して振動数を固有振動数の2倍とした。

2. 実験および数値計算方法

(1) 実験方法

14万K ϕ 貯槽を1/25に縮尺した内径2,560mmの剛体模型に、満液位の1/2相当の870mmまで注水した。当社振動台（30t, 3.5m $\times$ 3.5m）で水平および鉛直加振し、側壁位置での液面応答高さを計測した。

(2) 数値計算法

図-1に示す円筒形剛体貯槽（半径R）内で、非圧縮、非粘性、非回転の微小振幅重力波を扱う。水平および鉛直方向の強制変位HおよびVを各々 $H=A_h \sin(\omega t + \delta)$ および $V=A_v \sin(2\omega t)$ とおく。ただし、 A_h , A_v は各々水平、鉛直変位振幅、 ω は固有振動数、 δ は位相差、 t は時間である。この場合の液面応答高さ η は、次のMathieuの方程式で与えられる。

$$\eta_{tt} + \left[g - 4\omega^2 \cdot V \right] \left[\frac{\omega^2}{g} \right] \cdot \eta = \frac{2\omega^4 \cdot H}{g \{ (kR)^2 - 1 \} / R}$$

ただし、 g は重力加速度、 k は(1,1)次の角波数で、 η_{tt} は η を t で2階偏微分することを示す。上式にChan他による差分法を適用すると、液面応答高さ η の過渡応答挙動が計算できる。

3. 実験および数値計算結果

(1) 加振振幅と液面応答振幅

図-2は鉛直加振により液体を(1,1)次モードで共振させた時の過渡応答挙動である。加振振幅が2cm, 1.5cmおよび1cmの場合をまとめて示した。縦軸は液面応答振幅、横軸は波数で、図中の実線は計算値、破線は実験値（波峰高さ）である。実験値と計算は傾向が一致している。加振振幅2cmの場合、波数1~20程度まで応答が小さいが、その後は急激に増大している。加振振幅1.5cmおよび1cmでも同傾向で、波数がある程度多くなると応答が急増する。応答急増開始波数は加振振幅2cmで最も少なく、1.5cm, 1cmの順に多くなっている。

(2) 加振方向と液面応答振幅

図-3は水平、鉛直および水平と鉛直の同時加振により、(1,1)次モードで共振させた時の計算値である。加振振幅は全て2cm、同時加振での水平と鉛直の位相差はゼロとした。縦軸は液面応答振幅、横軸は波数で、図中の実線は水平加振、点線は鉛直加振、また一点鎖線は同時加振である。水平加振による応答は波数と共に直線的に増加している。一方、鉛直加振による応答は顕在化するまでにかなりの波数を要し、波数が少ない間はほとんど応答がない。しかし同時加振による応答は単独加振による応答の線形和より大きく、3波目

を例に比較すると、水平加振による値の約1.3倍になる。ただし数値計算によると、この値は加振位相差に依存し約1.3～0.8倍の範囲で変動する⁽³⁾。

（3）共振モードと液面応答振幅

図-4は鉛直加振により(1,1)次および(0,1)次モードで共振させた時の実験値である。加振振幅が2cmおよび1cmの場合をまとめて示した。縦軸は液面応答振幅（波峰高さ）、横軸は波数で、図中の実線は(1,1)次モード、破線は(0,1)次モードである。加振振幅2cmと1cmで傾向が同じなのでいずれか一方に着目して、(1,1)次モードと(0,1)次モードの過渡応答挙動を比較する。両者共に波数が少ない間は応答も小さいが、ある程度多くなると応答が急増している。しかし、(0,1)次モードの方がより少ない波数で、かつより急激に応答が増大している。

4. 結 論

鉛直加振により液体を共振させた時の過渡応答挙動について、実験および数値計算を行い以下の結論を得た。

（1）(1,1)次モード共振の場合

- 1) 波数が少ない間は応答も小さいが、ある程度多くなると応答が急増する。
- 2) 加振振幅が大きい程、より少ない波数で応答が急増しはじめる。
- 3) 水平加振による応答は、波数と共に直線的に増加する。
- 4) 水平と鉛直の同時加振による応答は、位相差ゼロの場合は単独加振による応答の線形和より大きい、位相差の値によっては逆に小さくなる。

（2）(0,1)次モード共振の場合

- 1) (1,1)次モードの場合と傾向は同じだが、より少ない波数で、かつより急激に応答が増大する。

5. 参考文献

- (1) 高山知司：振動外力を受けるタンク内発生波の非定常解析について、港湾技研報告，第15巻，第2号，(1976.6)。
- (2) 池田，秋山，中村，白井：円筒タンク内の液体動揺に関する研究，土木学会論文報告集，第290号，1979年10月。
- (3) 吉原，月岡，谷口，中尾：鉛直加振によるスロッシング特性，機械学会全国大会講演論文集(Ⅱ)，1996，(投稿中)。

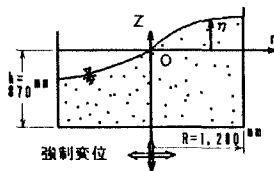


図-1 円筒形剛体貯槽

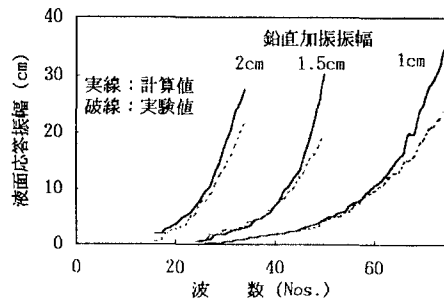


図-2 加振振幅と液面応答振幅

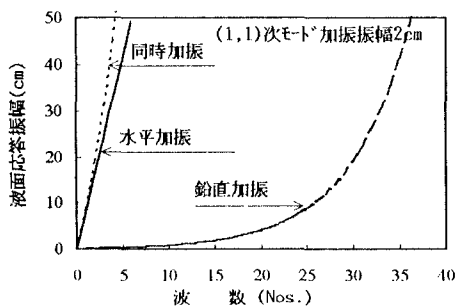


図-3 加振方向と液面応答振幅

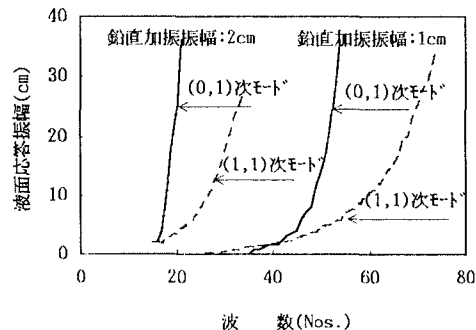


図-4 共振モードと液面応答振幅