

地上タンクの地震時浮き上がり挙動に関する基礎的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON LIFT-OFF BEHAVIOR OF TANK DURING GROUND SHAKING

山口宏樹* 秋山成興**

By Hiroki YAMAGUCHI and Narioki AKIYAMA

It has been reported that a lot of cylindrical tanks suffered great damages due to overturning moments induced by lift-off motions during earthquake. In this paper, the lift-off behavior of flexible liquid-storage tanks during ground shaking is studied experimentally. Scaled tank models are tested using a shaking table to clarify both the lift-off conditions and its effects on the flexible tank. It is found that the wave height takes a constant value and the axial strain of the tank wall becomes large suddenly at the critical moment of lift-off. These fundamental characteristics greatly depend upon the depth of liquid.

1. まえがき

地上貯蔵タンクの地震被害は1933年のロングビーチ地震において初めて記録されて以来、今日までに数多く経験されており¹⁾、タンクの耐震設計を目的とした研究も多数行われてきている。その研究動向は文献2)に詳しいが、その中で地上タンクの地震時浮き上がり関連の事項が今後の研究課題の一つとして指摘されている。

タンクの地震時浮き上がり挙動については実際にロッキング現象の目撃者がおり、1964年のアラスカ地震の報告書においても述べられているとされている^{1),3)}。浮き上がりが生ずるとタンク隅底部に過大な応力が発生することが予想され、それによって被害がもたらされていることから、タンクの地震時浮き上がり挙動は早急に解明すべき問題であるといえるが、これまでにいくつかの研究^{1),4),5),6)}がなされているものの、その現象についてはいまだはっきりしていないというのが現状であろう。それは浮き上がり挙動が動的接触問題という非線形現象であって解析が極めて難しいこと、ならびに浮き上がりに着目した模型実験がフレキシブルタンクの模型化および測定等の点からあまり簡単ではないことなどに原因している。

タンクの浮き上がりに関するこれまでの実験的研究は大きく二つに分類される。一つは震度法の考え方に基づく静的傾斜実験^{4),6)}であり、もう一つは振動台加振実験^{1),5)}である。前者はタンクの変形性状を十分に相似させた模型を用いて、浮き上がり範囲等、浮き上がりのメカニズムについて詳細な測定が可能である

* 工博 埼玉大学講師 工学部建設基礎工学科 (〒338 浦和市下大久保255)

** 工博 埼玉大学教授 工学部建設基礎工学科 (〒338 浦和市下大久保255)

が、静的変形モードは一意に規定されてしまい、そのモード形状がフレキシブルタンクの動的浮き上がり時の振動モードと必ずしも対応しないという欠点を有すると思われる。一方、後者の実験では測定等の問題からフレキシブルタンクを相似させた模型を用いておらず、必ずしも実現象を再現しているとは言い難い。

以上のことから、本研究では、地上タンクの地震時浮き上がり挙動に関する基礎的研究として、実物との動力学的相似性をできる限り考慮したフレキシブルタンク模型を用い、それを剛地盤上に設置して水平振動台加振実験を行い、浮き上がり挙動を解明することを試みた。測定はタンク底板と地盤との接触圧を中心に浮き上がり時波高等に着目して行い、浮き上がり発生条件および浮き上がりがタンクに及ぼす影響について水深をパラメーターに考察を加えた。

2. フレキシブルタンク模型による水平振動台加振実験

(1) 模型タンク

フレキシブルタンクの動的挙動につき考える場合、その挙動はタンクの形状と次の物理量により定まる。

E: タンク材料の弾性係数 (ヤング率) ν : タンク材料の弾性係数 (ポアソン比)
R: タンクの代表寸法 ρ : 内容液の密度
g: 重力加速度 δ : 減衰を表わす係数

ただし、タンクの質量は内容液の質量に比べ十分小さいとしてこれを無視した。

一般に、模型と原型の相似則は物理現象を支配する方程式の各項の基本的次元は同じであるという π 定理に基づき、次元解析により求められる。上述の物理量に対してこの次元解析を施せば、次の3つの独立な無次元パラメーターが導かれる。

$$\frac{E}{\rho g R}, \quad \nu, \quad \delta$$

これらのパラメーターが模型と原型との間で一致することを要求するのがフレキシブルタンクの模型実験での相似則である。つまり

$$\left(\frac{E}{\rho g R}\right)_m = \left(\frac{E}{\rho g R}\right)_p \tag{1.a}$$

$$\nu_m = \nu_p \tag{1.b}$$

$$\delta_m = \delta_p \tag{1.c}$$

ただし、添字 m は模型の値、p は原型の値を表わすものとする。

同じ重力場での実験であるため重力加速度 g は模型と原型とで同じ値とせざるを得ない。加速度の次元は $[LT^{-2}]$ であり、これを模型と原型とで同じとすることから、幾何学的縮尺率 $[L]_m/[L]_p$ を n とすれば

$$\frac{[T]_m}{[T]_p} = \sqrt{\frac{[L]_m}{[L]_p}} = \sqrt{n} \tag{2}$$

となり時間の縮尺率は \sqrt{n} となる。

内容液については原型と同じものを用いるとすれば、弾性力と重力の比を表わす無次元パラメーターの条件式 (1. a) は結局次式となる。

$$\left(\frac{E}{R}\right)_m = \left(\frac{E}{R}\right)_p \quad (1.a')$$

したがって

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{R_m}{R_p} = n \quad (3)$$

となり、ヤング率の縮尺率は n とするという結果が導かれる。

以上のことを考慮して、タンク模型材料はポアソン比 ν が 0.3、ヤング率 E が 5 GPa のマイラーフィルムが適当と考え、これを用いて模型を作成した。鋼製タンクを対象とするため、 $n = E_m / E_p = 1/41$ となり、幾何学的縮尺率は $1/41$ としている。ただし、マイラーフィルムの板厚が 0.18 mm ないし 0.1 mm であったため、模型タンク径は 25 cm とし、比較的小型のタンクに対応することとなった。模型形状、および寸法を Fig. 1 に示す。内容液については取り扱い上の簡便さから水を用いた。なお減衰の相似則については合わせる事が難しいため、考慮していない。

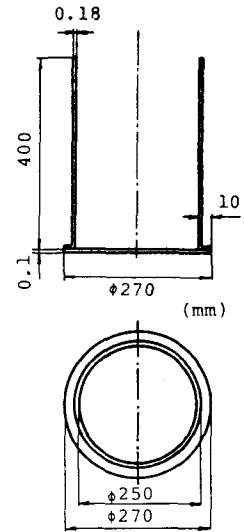


Fig. 1 Tank model

(2) 実験方法

実験装置の概要を Fig. 2 に示す。(1)で述べたタンク模型を水平振動台上の剛地盤を想定したアクリル板上に固定することなしに設置して水平方向に正弦加振し、アクリル板に埋め込んだ小型荷重計によりタンク底板と地盤との接触圧を測定した。またビデオカメラにより波高を、タンク側壁下部にひずみゲージを貼付して鉛直方向軸ひずみを測定している。ひずみゲージ貼付はタンクの局所的剛性を変え得ると考え、1カ所に限って行った。

接触圧の測定は非常に難しいが、本研究では Fig. 3 に示すような小型荷重計 (容量 10 N) を使い、直径が 1.5 mm のセンサー部を約 0.2 mm だけ地盤表面より突出させてその点の反力を測定し、静的キャリブレーション値により圧力に換算した。

実験は水深 H をパラメーターに、まず入力加速度と加振振動数との種々の組み合わせで水平加振し、いかなる条件のもとに浮き上がり挙動を呈するかを調べた。荷重計の配置は Fig. 4 に示すとおりである。次に浮き上がりの生ずる場合、タンクにどのような影響が生ずるかを調べるため、ひずみゲージを貼付してタンク側壁下部の鉛直方向軸ひずみを、また Fig. 5 (a), (b) に示すような荷重計配置により接触圧分布を測定した。この場合、各水深に対し、加振振動数は一定とした。

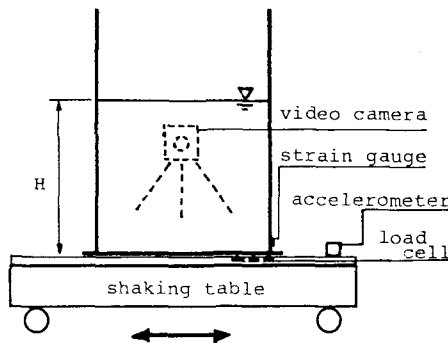


Fig. 2 Experimental equipment

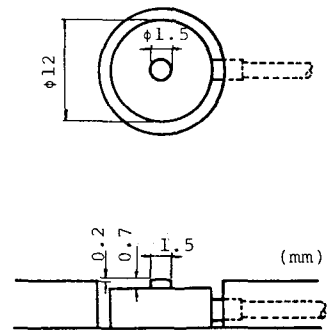


Fig. 3 Load cell

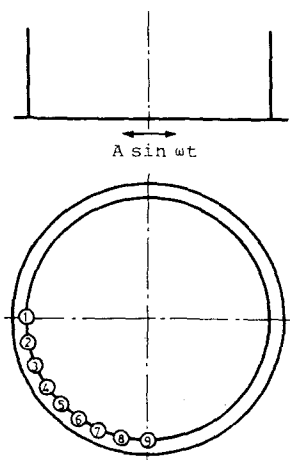


Fig. 4 Locations of load cell

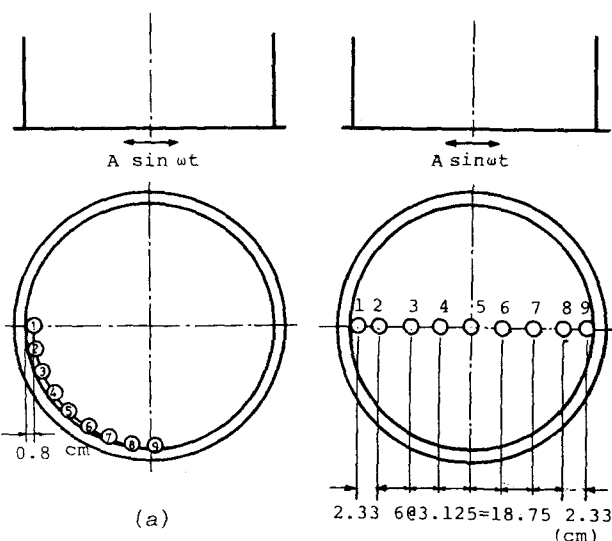


Fig. 5 Locations of load cell (a) (b)

3. 浮き上がり発生条件

Fig. 6 はアスペクト比、つまりタンク直径 D に対する水深 H の比 H/D が 0.5 の場合のタンク側壁直下部での接触圧 (Fig. 4 の荷重計①) の周波数応答曲線で、入力加速度は 50 gal である。縦軸の動的接触圧は接触圧応答波形の圧縮側片振幅を静止時静水圧で無次元化したものである。浮き上がりが起これば接触圧が 0 となり、応答波形の引張側に着目することによって浮き上がり発生の判定が理論的には可能であるが、荷重計の設置状況等の点から判定が難しく、本研究では圧縮側に着目して上述の圧縮側無次元接触圧が 1 を越えた場合を浮き上がりとした。Fig. 6 より明らかなようにスロッシング 1 次共振点付近で顕著な浮き上がりが生じている。実験では 40 Hz まで加振振動数を変えて浮き上がり挙動を観察したが、スロッシング高次振動や周方向モードが高次のバルジング 1 次振動と思われる固有振動での共振応答が認められたものの、100 gal の入力加速度に対し浮き上がりは認められなかった。そこで本研究ではスロッシング 1 次共振点付近での浮き上がり挙動にのみ着目することとした。

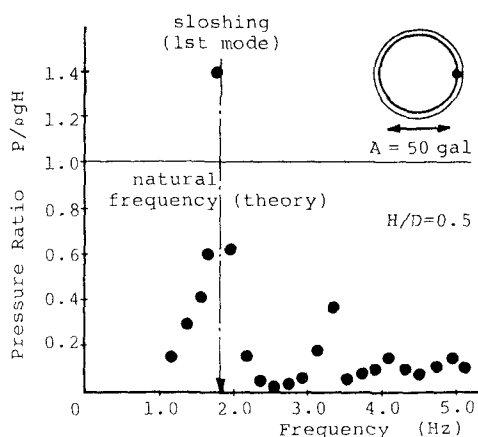


Fig. 6 Frequency response curve of contact pressure

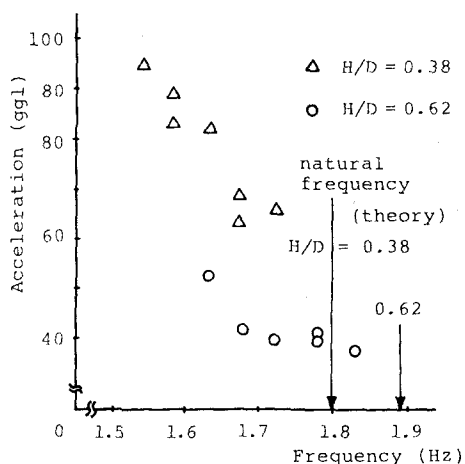


Fig. 7 Lift-off acceleration vs. input frequency

(1) 浮き上がり加速度

Fig. 7 は二つのアスペクト比につき、浮き上がりが生じたときの加振振動数と入力加速度との関係を示したものである。当然のことながらスロッシング1次共振振動数に近づくほど、小さな入力加速度で浮き上がりが生じているが、共振点より大きな振動数域では内容液はいわゆるスワール（旋回）を起こし、共振点に近くとも浮き上がりは生じていない。

共振点から離れるにつれ浮き上がり加速度が増大する割合はアスペクト比が大きい 0.62 の場合のほうが小さく、また浮き上がり加速度そのものも小さいことから、アスペクト比が大きい場合のほうが浮き上がりが生じ易いといえる。Fig. 8 はアスペクト比に対して浮き上がりの発生する最小入力加速度をプロットしたもので、この図からも浮き上がり易さの違いがわかる。なお Fig. 8 においてアスペクト比 0.2 以下で実験値が示されていないのは、浮き上がりが生ずる以前に横ずれを生じてしまったためである。

(2) 浮き上がり波高

浮き上がり時のスロッシング波高について着目し、各加振振動数に対し浮き上がりが生じたときのタンク側壁での波高をプロットしたものが Fig. 9 である。前述のように浮き上がり加速度は加振振動数により変化するが、浮き上がり波高は振動数によらず各アスペクト比に対し一定値となることが Fig. 9 より明らかである。そこで浮き上がり発生条件を波高でみると Fig. 10 ようになる。Fig. 10 は横軸にアスペクト比、縦軸に浮き上がり波高をとったもので、負の波高は液面の下降を意味する。アスペクト比が小さい場合、液面モードが非対称となり波高もかなり大きくなると浮き上がらなもののに対し、アスペクト比が大きいと波高が小さく液面が対称に動揺する、いわゆる線形応答の範囲内で浮き上がりが生じており、アスペクト比により浮き上がり易さ、および浮き上がりのメカニズムが異なるといえよう。なお、浮き上がり時のタンクの挙動を観察するとタンク上部の断面変形が大きく、このことと関連して浮き上がりが生じていると考えられる。この点に関しては理論的検討が必要であろう。

4. 浮き上がりの及ぼす影響

フレキシブルタンクの動的挙動が浮き上がり発生によってどのように変化するか、その影響について考察

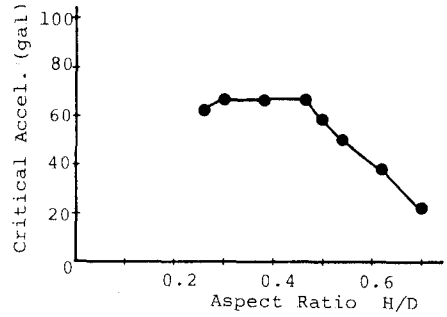


Fig. 8 Critical acceleration vs. aspect ratio

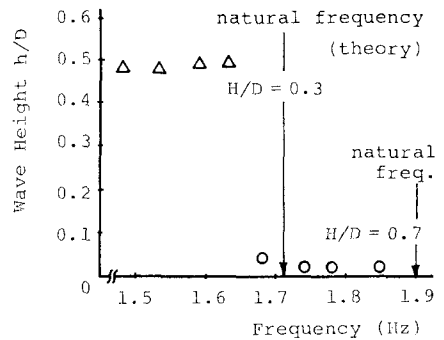


Fig. 9 Lift-off wave height vs. input frequency

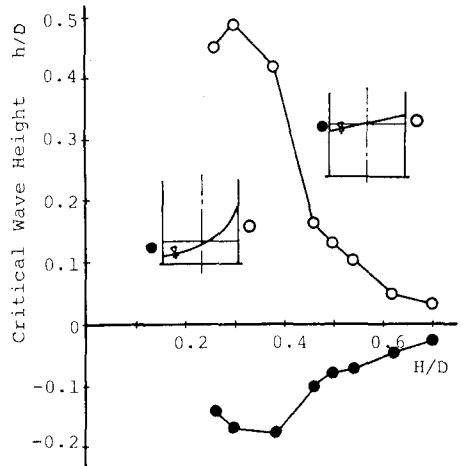


Fig. 10 Critical wave height vs. aspect ratio

を加える。

(1) 接触圧

Fig. 11 は側壁から $D/8$ だけ内に入った点での接触圧を入力加速度に対しプロットしたもので、アスペクト比は 0.5、加振振動数は一定（1次固有振動数の 95% 程度の大きさ）である。図には速度ポテンシャル理論から求めた理論値（動水圧⁷⁾をも実線で示したが、この場合 70 gal 付近で側壁直下が浮き上がりを生じており、浮き上がりが生じた時点での接触圧のみが線形理論から外れて大きくなっている。

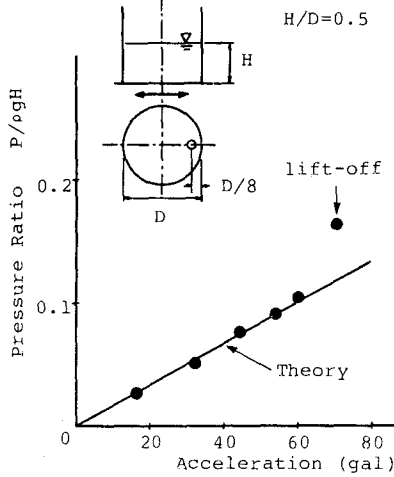


Fig. 11 Contact pressure vs. input acceleration

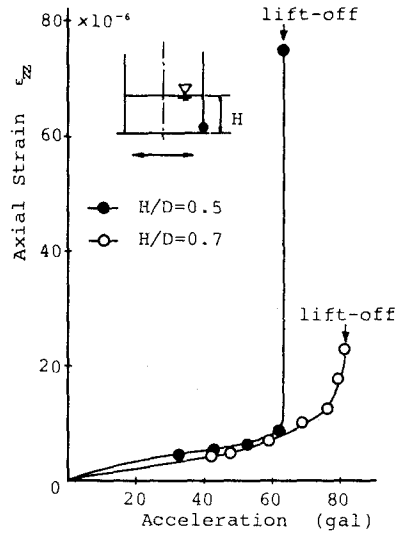


Fig. 12 Axial strain vs. input acceleration

(2) タンク側壁軸ひずみ

Fig. 12 の ● は Fig. 11 に対応するもので、縦軸に側壁下部の鉛直方向軸ひずみをとっている。浮き上がるにより軸ひずみが急激に、しかも非常に大きな値をとることがわかる。図にはアスペクト比 0.7 の場合も示したが、軸ひずみに及ぼす浮き上がりの影響はアスペクト比により異なり、水深の大きい 0.7 の場合には浮き上がり後の軸ひずみの増加がそれほど顕著ではない。

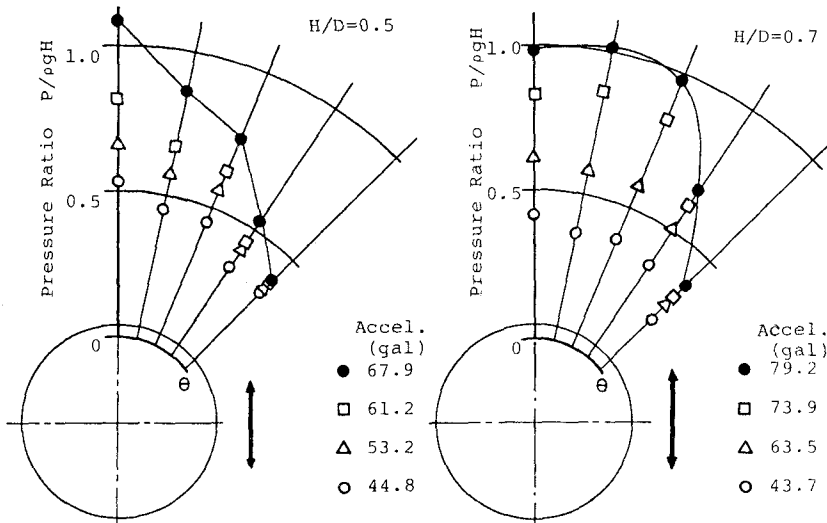


Fig. 13 Circumferential distribution of contact pressure

(3) 接触圧分布

上述のアスペクト比による浮き上がりの影響の差異を詳しく調べるため、接触圧分布の測定結果を示す。

Fig. 13 に周方向接触圧分布をアスペクト比 0.5、及び 0.7 について対比して示した。入力加速度が 40 gal 程度と小さな場合、接触圧分布はアスペクト比によらずほぼ同じ形状をしているものの、浮き上がりが生じた場合の分布形状には明らかな違いが認められる。

つまり、アスペクト比 0.5 の場合には ひずみ測点直下での接触圧が最も大きく θ に対し線形的に減小するのに対し、0.7 の場合にはひずみ測点直下のみならず、 θ のある範囲で接触圧が大きな値をとっている。これは浮き上がりが生じたときにその反力の取り方において差異があることを意味するわけで、浮き上がりのメカニズムがアスペクト比により異なるということと対応する。また、この接触圧分布形状の差異は、(2)で述べた浮き上がりが軸ひずみに及ぼす影響のアスペクト比による違いをよく説明している。つまりアスペクト比が 0.5 の場合、浮き上がりにより $\theta = 0$ に反力が集中して軸ひずみが非常に大きくなるのに対し、アスペクト比が 0.7 の場合は 反力が分散されるために浮き上がり後の軸ひずみがあまり大きくならないといえよう。

Fig. 14 は 浮き上がり後の接触圧の径方向分布をアスペクト比が 0.3、0.5、および 0.7 の場合につき示したものである。アスペクト比、つまり水深が大きいものは側壁近傍で急激に接触圧が大きくなるのに対し、水深が小さくなるにつれ、内部まで浮き上がりが影響して接触圧が大きくなっている。

5. 結論

フレキシブルタンクの地震時浮き上がり挙動に関する基礎的研究として、剛地盤上の模型フレキシブルタンクを用いた水平振動台加振実験を行い、水深により浮き上がりのメカニズムが異なることなどその定性的な特性を明らかにした。本研究での実験条件ではスロッシング 1次共振点近傍で最も顕著に浮き上がりが認められたため、1次スロッシング応答時の浮き上がり挙動に限定して考察を加えたが、その結果得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 浮き上がり発生時の波高は入力加速度および加振振動数によらず一定値をとる。したがって浮き上がり発生条件は波高により整理できる。
- (2) 水深により浮き上がり易さが異なり、水深の大きなものほど浮き上がり易い。
- (3) 浮き上がりが生ずることにより、タンク底板と地盤との接触圧が線形理論よりかなり大きくなり、その結果タンク側壁下部の鉛直方向軸ひずみが大きくなる。
- (4) 浮き上がり後の接触圧分布は水深により大きく異なる。

謝 辞

本研究での実験に関しては、埼玉大学建設基礎工学科学生であった小林宏光（現・熊谷組）、佐々木秀敏（現・八王子市役所）両氏によるところが大である。また図面および原稿の作成にあたっては埼玉大学文部技官の石川幸一、金子重男両氏に協力頂いた。なお本研究は文部省科学研究費（一般研究A-58420035、代表久保慶三郎）の補助を受けて行ったものである。末尾ながらここに記し、深謝の意を表する。

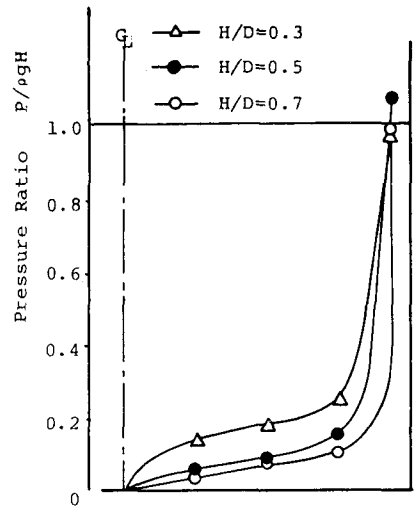


Fig. 14 Radial distribution of contact pressure

参考文献

- 1) 曾我部 深・重田達也・柴田 碧: 液体貯槽の耐震設計に関する基礎的研究, 東京大学生産技術研究所報告, 26巻, 7号, 1977年3月.
- 2) 清水信行: 貯槽の耐震設計の研究動向, 日本機械学会論文集(C編), 49巻438号, PP. 145~153, 1983年2月.
- 3) 土木学会: 屋外貯蔵タンク本体と基礎を一体とした振動解析を用いたタンク本体の安全性の検討及び基礎に作用する荷重条件の把握に関する調査検討, 屋外貯蔵タンク振動解析小委員会報告書, 1982年11月.
- 4) Clough, R. W., A. Niwa and D. P. Clough: Experimental Seismic Study of Cylindrical Tanks, Proc. of ASCE, Vol. 105, No. ST12, PP. 2565~2590, Dec., 1979.
- 5) 三村長二郎・ほか5名: 剛製石油タンクの地震時浮き上がり振動に関する模型実験, 鹿島建設技術研究所年報, 第29号, PP. 27~30, 1981年6月.
- 6) 鬼東博文・磯江 暁・秋山成興・坂井藤一: 地震時における平底筒タンクの浮き上がり挙動に関する研究(その1), 土木学会第39回年次学術講演会概要集, 第1部, PP. 691~692, 1984年10月.
- 7) たとえば、池田駿介・秋山成興・中村広昭・白井伸一: 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, PP. 53~65, 1979年10月.