

弾性基礎上フレキシブルタンクの地震時浮き上がり挙動

LIFT-UP BEHAVIOR OF FLEXIBLE TANK DURING GROUND SHAKING

秋山 成興* 山口 宏樹** 阿部 和毅***
by Narioki AKIYAMA, Hiroki YAMAGUCHI and Kazutake ABE

The up-lift during earthquakes always gives rise to the crucial damage to a tank.

In the present study, horizontal excitation test is carried out on the tank model designed to mechanical-geometrical similarity to actual tanks, to detect the dynamic contact pressure by the direct measurement of strains in the elastic foundation.

In this test, the emphasis is placed on parameters of aspect ratio, defined by water depth/tank diameter, and it is clarified that the critical value of it, 0.6, gives the essentially different up-lift mechanisms and in case of small value of it base-plate thickness exerts the significant influence upon the up-lift resistibility, viz., the larger thickness, the stronger resistibility.

1. まえがき

地上タンクの地震被害として側壁下部のはらみ出しや側壁・底板結合部近傍の亀裂等が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。その原因は、地震時にタンク底板が基礎から浮き上がった結果、タンク隅底部に過大な応力が生じたためであるとされており、タンクの浮き上がり挙動は地上貯液タンクの耐震設計を考える上で早急に解決すべき重要な問題である。

タンクの浮き上がりに関する従来の研究アプローチは数値解析、及び模型実験の両面からなされているものの、その現象は未だ十分に解明されているとは言い難い。それは、タンクの浮き上がり挙動を動的接触問題として扱う数値解析が非常に難しいこと、及び相似則を十分に考慮したフレキシブルタンクの模型化、そのひずみや接触圧測定等がかなり難しいことから模型実験も簡単でないことなどによる。浮き上がりの特性を調べた実験は、Clough⁽³⁾や鬼束⁽⁴⁾などによる静的傾斜実験とClough⁽⁵⁾や三村⁽⁶⁾などによる振動台加振実験があるが、前者は浮き上がり時のタンクの静的変形モードが必ずしも動的なものと対応しないこと、及び後者は実タンクや実地盤のフレキシビリティを相似させた模型に対する動的測定が難しいこと等々欠点を有している。一方、タンクの浮き上がりを数値解析により扱ったものとして、頭井ら⁽⁷⁾はCell Collocation

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

** 工博 埼玉大学講師 工学部建設基礎工学科 (〒333 浦和市中大久保255)

*** 工修 三井建設 (元埼玉大学大学院)

Method を用いた合理的解析法を提示している。その解析結果と静的傾斜実験結果とはかなりよい対応を示しており、この解析法により地震時の浮き上がり挙動がある程度推定できることが考えられるが、現象が強い非線形性を呈すること等を考えると、静的解析の検討のみでは実現象を表し得るか否かは明らかではない

以上のことを踏まえて、筆者らは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、第一段階として剛基礎を用いた振動台水平加振実験を行って、浮き上がりのメカニズムを把握することを試みた⁽⁹⁾。測定は主としてタンク底板と基礎との接触圧に着目して行ったが、それにより浮き上がり条件、浮き上がりのメカニズム等基本的な特性は明かとなったものの、比較的軟弱な地盤に設置されることの多い実タンクの浮き上がり挙動解明には、変形する基礎上のタンクの挙動を調べることが不可欠である。そこで本論文では弾性地盤模型を用いて実験を行い、考察を加えた。タンクの浮き上がりに対する抵抗性は内容液の重量（液深）、タンク底板の剛性、および側壁の剛性に依存して決定されるものと考えられるが、基礎の弾性を考慮した場合タンク底板の剛性が相対的に重要になるものと考え、底板厚の差異による挙動の変化について、液深との関連を踏まえながら考察を加えている。なお前述のように、フレキシブル模型を用いた振動実験における動的測定は簡単ではないが、本論文では弾性基礎そのものを接触圧センサーとして用い、底板と基礎との接触圧を中心に測定を行った。

2. フレキシブルタンク・弾性基礎模型振動台加振実験

(1) タンク模型

タンク模型はFig.1 に示すように直径25cm、高さ40cmで、動力学的に実タンクとの相似性をできる限り満足するようにした。タンクの模型材料はポアソン比が0.3、ヤング率が5GPaのマイラーフィルムが適当と考えて、側壁は板厚0.18mmを使用し、底板はその板厚による曲げ剛性が接触圧分布及び浮き上がり挙動に大きく影響すると考えられるので、0.10mm(Aタイプ)と0.18mm(Bタイプ)の2種を使用して、底板厚の異なる2種類のフレキシブルタンク模型を作成した。実際のタンク本体の構造は、底板、側壁及び固定屋根又は浮き屋根の三つの部分から構成されるが、タンクの模型化においては、実験時の内容液の取り扱いが不便であるため屋根は無いものとし、タンク模型は底板と側壁で構成されるものとしている。

実物と模型の縮尺率は1/41である。したがって実際のタンクとしては直径が約10m、側壁高さが約16mの鋼製円筒形タンク、つまりいわゆる'Tall tank'を想定していることになるが、側壁高さに関しては特に実タンクとの相似性を考慮したわけではなく、内容液として使用した水が振動実験時にあふれ出ないよう配慮したものである。内容液の液深はパラメータとし変化させており、いわゆる'broad tank'をも同時に想定していることになる。

なお模型材料がフレキシビリティに富んでいるため、タンク模型は完全な円筒形ではなく初期不整を持っている。

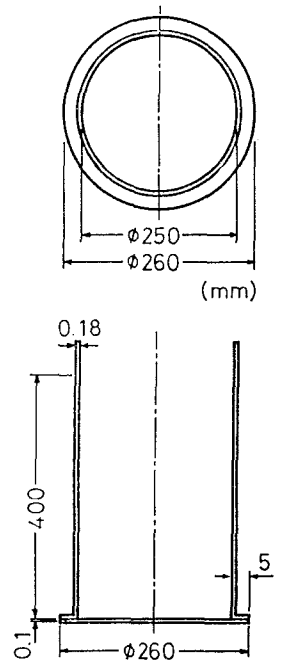


Fig.1 TANK MODEL

(2) 弾性基礎模型

実際の基礎マウンドや地盤は粘性や塑性等の多種多様にわたる性質を持つ材料で構成されているが、実験の目的がタンクの浮き上がりという非線形挙動の解明であるため、基礎材料の非線形性を考慮した模型化を行っていたずらに問題を複雑化することは適切でない。そこで基礎模型は実際の地盤との相似性を特に考慮せず、硬度45°の天然ゴムを用いた。ただし、後述する接触圧測定の関係から、10mm×10mm×20mmの小プロ

ックを敷き詰めて弾性地盤とした。Fig.2 に示すようにアクリル板で台座を作って2mm ×2mm の木製角棒を格子状にわたし、小ブロックを角棒の高さ(2mm) 分だけ埋め込んで敷き詰め、ブロック間は角棒の幅2mm がけ間隔を開けた。つまり各々のブロックを独立なバネとしたわけであるが、この天然ゴムブロックのバネ定数は静的載荷試験を行った結果、平均的に約130N/cmであった。またブロックの背の高さには多少バラつきが見られ、基礎模型の表面には凹凸が存在することが分かっている。タンク模型と基礎模型の支持条件は、両者の付着を特別に考えておらず、基礎上にタンクを設置したままである。さらに弾性基礎模型の台座は振動台に固定している。

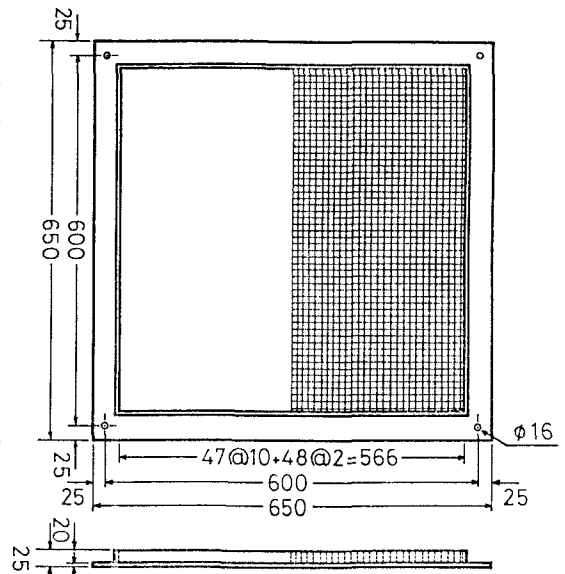


Fig.2 FLEXIBLE FOUNDATION MODEL

(3) 測定システム

振動加振実験の測定システムをFig.3 及びFig.4 に示す。

a) 加振方法

使用した振動台は埼玉大学工学部建設系教室所有の振動台(島津サーボパルサーEHV5型)である。加振方向は水平方向であり、加振は振動数 1.0 ~ 35.0Hzの正弦波を0.5 ~ 5.0Hzの間隔で加速度制御で行った。入力加速度及び加振振動数のチェックのため、加速度計(東京測器製AR-2C)を振動台に固定してある。

b) 接触圧測定

弾性基礎上のフレキシブルタンク模型による振動実験の際、応答量の測定において多くの困難な問題が生じる。まず、タンク本体の剛性が非常に低くフレキシブルであることから、ひずみゲージや接触型変位計等を用いると局部的に剛性が高められ、タンクの挙動に影響を及ぼすことが問題として考えられる。そのため、付着型の測定器具の使用は好ましくない。そこで、タンク底板の接触圧測定が増々重要となってくるが、弾性基礎との動的接触圧ということで通常の圧力計等の使用では接触圧測定は一般的に困難である。

本研究では、弾性基礎模型そのものを接触圧測定センサーとして使用することによりこの問題を解決している。つまり、弾性基礎模型として用いるゴムマットを2.(2)で詳述したような小ブロック側面にひずみゲージを貼付して(Fig.5)接触圧センサーとした。この接触圧センサーを用いて振動時基礎内のひずみ変動を測定し、静的載荷試験より求めたキャリブレーション値によって動的接触圧を求

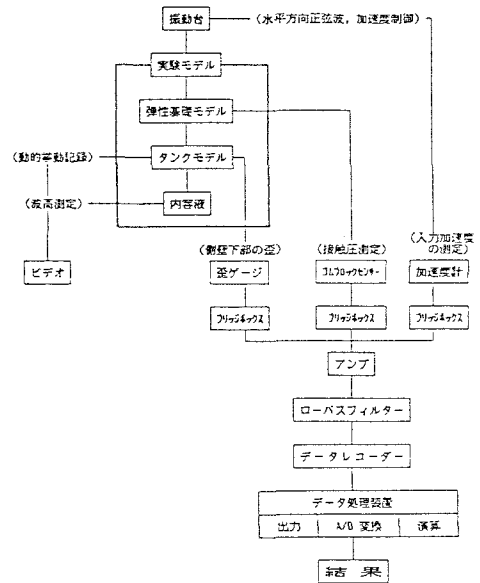


Fig.3 MEASURING SYSTEM

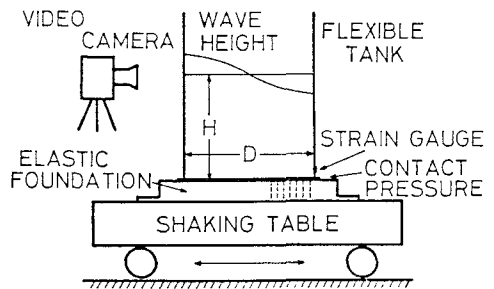


Fig.4 TEST SETUP

めている。Fig.6 の英数字は使用したセンサーの位置を示しており、全部で29個である。センサーの配置は、振動軸を対称軸と考えて、(1/4) 円の範囲内であり、主に接触圧変動が顕著であると思われる振動軸方向と側壁直下近傍に集中させた。

c)側壁下部のひずみ測定

浮き上がりがタンクに及ぼす影響を調べるため、タンク側壁の鉛直方向軸ひずみを測定した。但し、ひずみゲージの添付は、前述したように側壁の剛性を局所的に変化させてしまうことから、あくまでも側壁下部1箇所のみとし、ひずみ変動の定性的把握を意図した。

d)液面波高測定

ビデオカメラを使用して振動中のタンクの挙動及び波高を記録した。実験中は振動直角方向にカメラを設置して録画し、再生時に液面の上下動をタンク側壁の目盛りにより画面から読み取っている。

(4) 実験ケース

実験は底板厚の異なる2種のタンク模型について、まず弾性基礎上フレキシブルタンクの振動性状及び浮き上がり挙動の発生する振動数帯を把握するため、入力加速度を一定にし、加振振動数を変化させて測定を行った。さらに浮き上がりが顕著であった振動数域において、加振振動数を一定にし、入力加速度を0から徐々に増加させて測定を行い、水深をパラメーターに浮き上がり発生条件、浮き上がり範囲、接触圧分布等を詳細に調べた。

3. 浮き上がりの発生条件

(1) 浮き上がりの判定

浮き上がりは底板と基礎の離れた状態を示し、側壁直下が周方向に沿ったある一点で基礎より持ち上がった瞬間を”浮き上がりの発生”とすることになろう。しかし、持ち上がった瞬間やその位置を確認することは測定上非常に難しく、また確認できたとしてもその浮き上がりがタンク等に影響を及ぼすものでなければ工学的にあまり意味がない。そこで本研究では、タンク本体に浮き上がりの影響が出はじめた時を浮き上がりの発生時と定義して、側壁下部に貼付したひずみゲージの応答に着目した。Fig.7(a)に代表的な側壁ひずみ応答波形を入力加速度波形とともに示したが、静水時の初期変形により側壁には曲げが生じているため、ひずみゲージの応答は浮き上がり前では曲げによるひずみ応答であって入力加速度と同周期、同位相である(図の'Bending' と示した部分)。しかし、入力加速度を増加させていくとタンク側壁下部に軸ひずみが発生し、波形に乱れが生ずる(図の'Axial' と示した部分)。この軸ひずみ成分のみを応答波形から読み取り、入力加速度に対してプロットしたものがFig.7(b)であるが、側壁直下が浮き上がったことにより側壁に軸

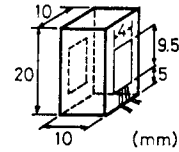


Fig.5 SENSOR

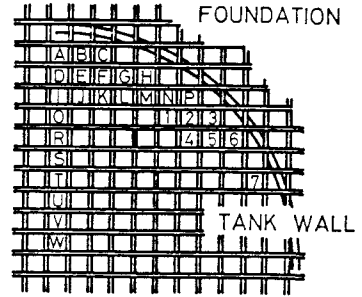


Fig.6 LOCATION OF SENSOR

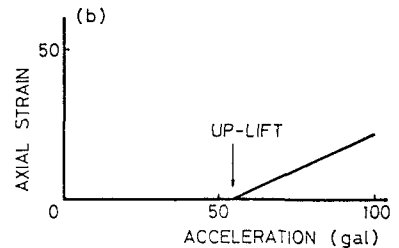
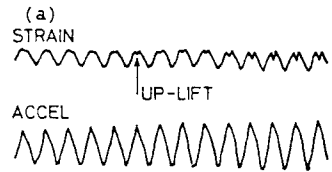


Fig.7 AXIAL STRAIN vs. INPUT ACCELERATION

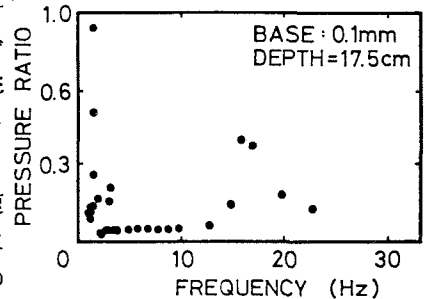


Fig.8 RESONANCE CURVE OF SENSOR A

力が発生したと考えられ、本研究ではこの軸力が作用し始めた時点
を”浮き上がり”と定義することにした。Fig.7において、UP-LIFTと図中に示した時点が”浮き上
がり発生”である。

(2) 浮き上がり発生振動数帯

Fig.8は、底板厚0.10mm(A9イ)のタンク模型におけるアスペクト比(水深と直径の比 H/D) 0.7の場合の周波数応答図である。入力加速度は60galで一定とした。横軸は加振振動数、縦軸はセンサーA (Fig.6)により測定された接触圧変動分を静水時接触圧で無次元化した値である。1.8Hzおよび16Hz付近に共振ピークが存在しているが、前者は流体のみのスロッシング1次共振点であり、後者はタンクと流体と基礎の連成振動であるロッキング1次共振点と思われる。本研究では加振、測定等の関係から加振振動数を35.0Hzまでとしており、この範囲内で周方向高次モードのバルジング振動(タンクと流体との連成振動)発生も予想されたが、実験において顕著なバルジング振動は認められなかった。Fig.8によるとロッキング共振振動数帯に比べてスロッシング共振振動数帯は非常に狭い範囲であるが、接触圧が大きく、浮き上がりも顕著に発生していたため、以後の実験はスロッシング1次共振点付近に限り行った。

なお、前述のようにタンク模型は初期不整を有しているため、タンクの設置位置をいろいろに変化させて実験を行ったが、本研究で対象とした現象に関する限り、初期不整の影響はほとんどないことを確認している。

(3) 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時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。横軸に加振振動数、縦軸に浮き上がり時の波高を直径で無次元化したものをもってある。浮き上がり波高は、タンク模型A、B共に振動数によらず、アスペクト比に対しほぼ一定値をとることがこの図より明らかである。アスペクト比毎に両タイプの波高を較べると、底板厚の厚いBタイプの方が波高が大きくなる。そこで両タイプのアスペクト比による浮き上がり発生条件の差異を詳しく調べるため、アスペクト比を1.0より0.1ずつ減少させた場合の浮き上がり波高をアスペクト比に対してプロットしたのがFig.10である。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ある。正の波高は液面上昇を、負の波高は液面の下降を示している。浮き上がり波高は、アスペクト比が大きい場合小さく、逆にアスペクト比が小さい場合大きいことが分かる。

Fig.11は各アスペクト比に対して正負の浮き上がり波高の比を示したものであるが、アスペクト比が0.8以上の場合は液面が対称に動揺しており、線形的な応答の範囲で浮き上がりが生じているが、0.5以下の場合は、液面が非対称にならないと浮き上がりが生じないことが分かる。つまりアスペクト比0.6近傍を境にして浮き上がりのメカニズムが異なると考えられる。Fig.10には有限要素・境界要素結合解法⁽⁹⁾による線形解析結果を実線で示してあるがアスペクト比が0.6以上では線形解析と実験結果とが良好な対応を示してい

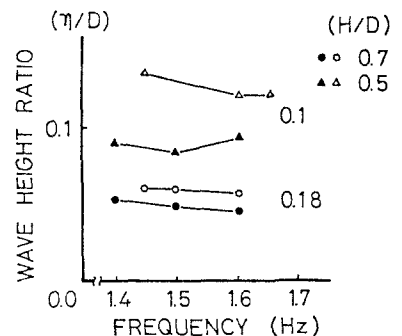


Fig.9 CRITICAL WAVE HEIGHT vs. FREQUENCY

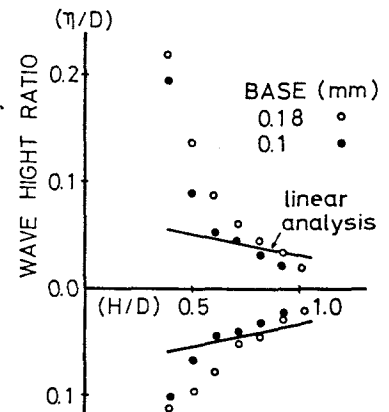


Fig.10 CRITICAL WAVE HEIGHT vs. ASPECT RATIO

ることからも、このことが言えよう。なお、解析においてはタンク側壁直下における動的接触圧が静止時接触圧と等しくなる時の波高を浮き上がり波高としている。

さらに底板厚の差異については、アスペクト比が1.0 のとき差異は見られないが、アスペクト比が小さくなるにつれて差は広がる傾向にあり、同じアスペクト比では底板厚の厚い方が相対的に波高が大きくなると浮き上がりが生じないことが分かる (Fig.10)。つまり、底板厚の厚い方が浮き上がりに対する抵抗性が大きいといえる。Fig.11においては底板厚の差はあまり見られず、両タイプともアスペクト比に対しては同様な傾向を示している。

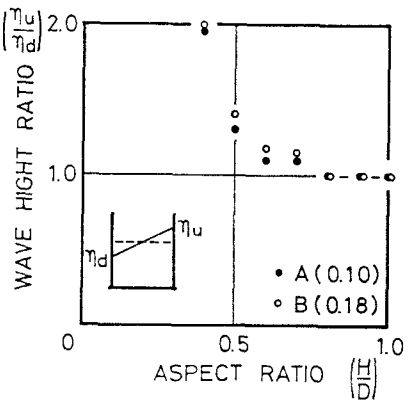


Fig.11 η_u/η_d vs. ASPECT RATIO

4. 浮き上がり分布

側壁に軸力が生じ、“浮き上がり”と判定された後の底板の浮き上がり範囲を示したのがFig.12である。図中、円は側壁直下を示し、格子は2.(2),(3)で述べた弾性基礎模型ゴムブロックに対応する。接触圧センサーを兼ねるゴムブロックから底板が完全に離れるとゴムブロックのひずみはゼロとなり、センサーの応答波形記録によって底板の基礎ブロックからの剝離の判定が可能である。このことを用いて底板が基礎から離れた、つまり浮き上がった範囲を求め、それを図の黒色の部分で示している。図は、アスペクト比0.7、加振振動数1.6Hzとした条件下で入力加速度を徐々に増加させた場合の浮き上がり範囲を示したものである。左側はAタイプ、右側はBタイプであり、両者ともに浮き上がり範囲は三日月状の部分である。

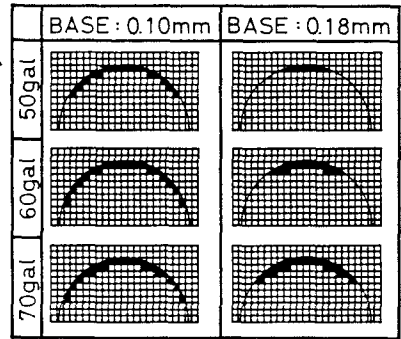


Fig.12 UP-LIFT REGION

底板厚の薄いAタイプの浮き上がり範囲は側壁近傍に沿って振動軸より広い角度にまで及んでいるが、BタイプではAタイプ程広い角度まで及ばず、側壁近傍より内側に進行する傾向が若干見られる。

Fig.13(a)及びFig.13(b)は浮き上がり範囲の周方向への進展状況を浮き上がり分布角として整理したものであり、横軸に入力加速度、縦軸に広がり角をとっている。Fig.13(a)は底板厚の薄いAタイプの場合で、アスペクト比により浮き上がり加速度は異なるものの、浮き上がり後の入力加速度に対する進行性はほぼ等しく且つ急激である。一方、Fig.13(b)は底板厚が厚い方で、浮き上がり範囲の周方向への進展性状はアスペクト比により大きく異なり、アスペクト比が大きいと急激に進行するが、アスペクト比が小さいと徐々に広がる傾向にあることが分かる。さらに同じアスペクト比で比較すると、アスペクト比が大きい場合、底板厚による差は顕著ではないが、アスペクト比が小さくなると底板厚による差が顕著になってくる。

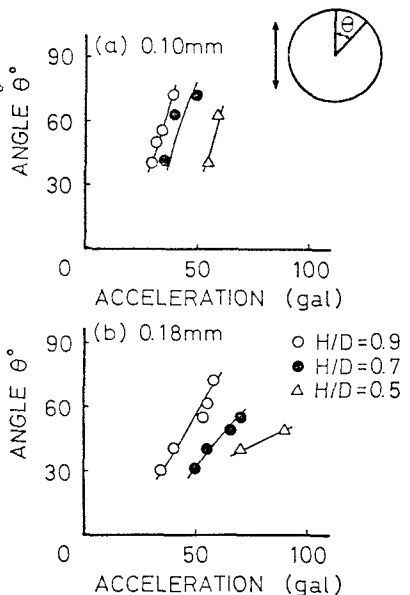


Fig.13 UP-LIFT ANGLE vs. INPUT ACCELERATION

5. 浮き上がり後の軸力

浮き上がり後の側壁に生ずる軸力の増加状況を側壁下部の軸ひずみを用いて定性的に示したのが、Fig.14(a),(b)である。横軸には入力加速度の浮き上がり時からの増分を浮き上がり加速度で無次元化してとり、縦軸には側壁の軸ひずみをとっている。アスペクト比が大きいと浮き上がり後の軸力は線形に増加しているのに対し、アスペクト比が小さくなると急激に非線形に増加しており、浮き上がり後のタンク挙動はアスペクト比により大きく異なることがこのことから明らかである。また、Fig.14(a)と(b)はほぼ同じ傾向を示している。

6. 接触圧分布

Fig.15は入力加速度70gal に対する浮き上がり後の底板・基礎接触圧分布を示したものであり、Fig.6の各々のセンサー位置での接触圧応答値を静的接触圧で無次元化し、ブロック高さでそれを表して3次元的に示したものである。図中の曲線はタンク側壁直下であり、0.1mm,0.18mmの底板厚別にアスペクト比0.5,0.9の場合の分布図を比較して示している。2.(2)で述べたように基礎模型の表面は多少の凹凸があるため、接触圧としては静的接触圧からの動的増分値を静的接触圧で無次元化したものを考えて凹凸の影響を除いている。これにより、完全にはその影響を除去できていないものの、定性的考察は十分なし得ると考えられる。

接触圧分布は側壁近傍でかなり大きな値となり、内側では相対的に小さな値となっている。このことはどの場合でも多少の違いがあるもののほぼ同じ傾向であり、線形理論である速度ポテンシャル理論から導かれる動水圧の分布とはかなり異なっているのが特徴的である。特に、アスペクト比が大きいく、側壁近傍の狭い部分で接触圧は大きな値を示しているといえる。また、接触圧分布はアスペクト比が大きくと底板厚の差はそれ程見られず、側壁近傍に集中した形であるが、アスペクト比が小さくなると底板厚の差が顕著になり、底板厚が薄いと側壁近傍に集中して、厚いと内側にも分散された形となっている。アスペクト比が小さくなると底板厚の差の影響が顕著になるのは、前述の浮き上がり波高及び浮き上がり分布と同様である。

浮き上がりによって接触圧分布にどのような影響を与えるかをより詳しくみるために、浮き上がり後の接触圧の値より線形応答分を差引いて浮き上がりによる接触圧増分を求め、比較したのがFig.16である。図は横軸に側壁近傍のセンサー（中心）の振動軸からの角度をとり、縦軸に浮き上がりによる接触圧増分をとっており、側壁近傍の周方向接触圧分布を示している。但し、側壁直下からのセンサーの中心までの距離は各々のセンサーで異なっている。図中のA,B,C,H,P,3,6,7はFig.6のセンサーの位置を表している。底板厚が

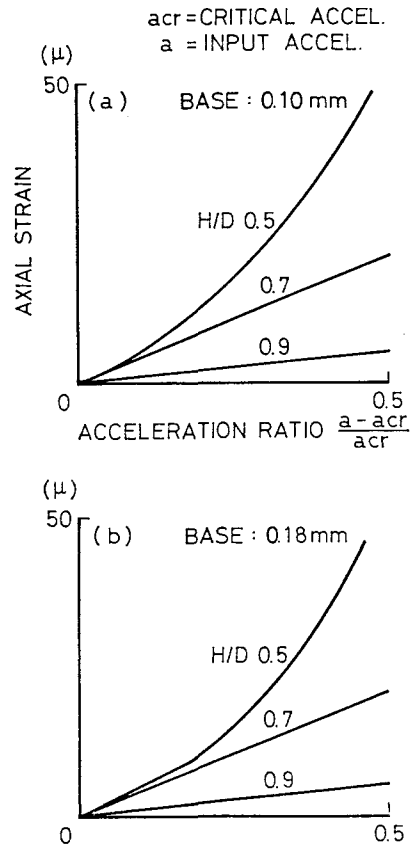


Fig.14 AXIAL STRAIN vs. ACCELERATION RATIO

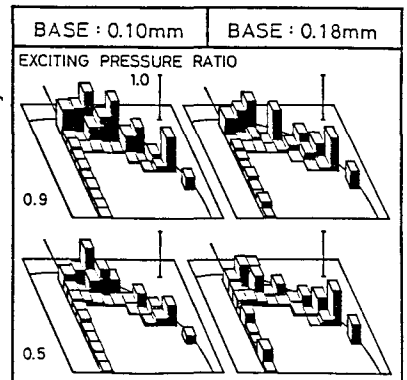


Fig.15 PRESSURE DISTRIBUTION

薄い場合のFig.16(a),(b)をみると、共にセンサーCで最大となりそのモードにおいてはあまり差はないがアスペクト比の大きい(a)の方が相対的にかなり大きく浮き上がりの影響が及んでいるのがわかる両者とも0~25°の間で浮き上がりの影響が顕著である。また底板厚の厚い場合はアスペクト比によりかなり異なりアスペクト比0.9(c)の場合は(a)や(b)と同様な傾向であるが、アスペクト比0.5(d)の場合は、25までの間、顕著なピークが存在していない。

7. まとめ

地上タンクの地震時浮き上がり挙動解明を念頭に、フレキシブルタンク・弾性基礎系の模型振動実験を行い、スロッシング1次共振時の浮き上がり挙動に関して以下の結果を得た。

- (1) 浮き上がり発生時の波高は各アスペクト比により一定値をとり、アスペクト比が大きい程小さく浮き上がり易いと言える。この浮き上がり波高はアスペクト比0.6以下で非対称になり、浮き上がりのメカニズムが異なる。
- (2) 浮き上がりに対する抵抗性はアスペクト比が大きい場合には底板厚によらないが、アスペクト比が小さい程底板厚の差が顕著になり、底板厚が厚い程大きい。
- (3) 浮き上がり範囲は三日月状である。浮き上がり範囲の進行性において、アスペクト比が大きいと底板厚の影響は目立たないが、アスペクト比が小さいと底板厚の影響が顕著になる。
- (4) 浮き上がり後のタンク側壁軸ひずみはアスペクト比が小さい程急激に増加し、底板厚によるその傾向の差異はない。
- (5) 弾性基礎上の接触圧分布はアスペクト比が大きい程側壁近傍付近に集中した形であり、アスペクト比が小さいと内側にも分散された形になる。
- (6) 浮き上がり後の接触圧増分は、底板厚とアスペクト比により異なり、底板厚の薄い程、アスペクト比の大きい程増分は大きい。また周方向分布は底板厚の薄い方が0~25°に集中した形であり、厚いと0~40°位に分散された形となっている。

本研究では、正弦波連続加振としたこと等、実際のタンクの条件とは多少異なる実験条件としたこともあって、スロッシング1次振動応答時において浮き上がりが増著となったため、そのみに着目して詳しく考察を加えた。これにより上記のような浮き上がり特性が明らかになったわけであるが、短周期地震動によるバルジング振動応答時浮き上がり挙動も含め、多岐にわたるであろう実タンクの浮き上がり現象の解明にはさらに研究が必要である。

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高柳幸一氏（現 三建設備）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石川幸一、同大学院生、塩冶幸男各氏に協力頂いた。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

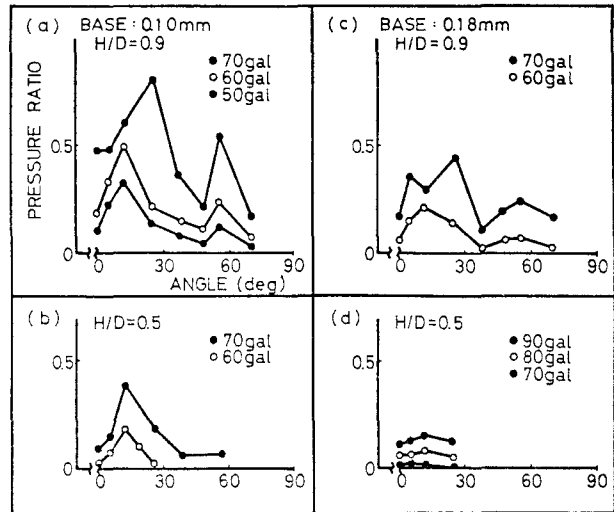


Fig.16 INFLUENCE OF UP-LIFT

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。

参考文献

- 1) 土木学会屋外貯蔵タンク振動解析小委員会：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報告書、1982年11月
- 2) Manos<G.C. and R.W.Clough:Tank Damage During The May 1983 Coalinga Earthquake, Earthquake Eng.& Structural dynamics, Vol.13, PP.449-466, 1985.
- 3) Clough,R.W.and A.Niwa:Static Tilt Test of A Tall Cylindrical Liquid Storage Tank, NO.UCB/ERC-79/06,Univ. of California,Feb.,1979.
- 4) 鬼束博文・磯江 暁・秋山成興・坂井藤一：地震時における平底円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．
- 5) 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.
- 6) 三村長二郎・ほか5名：鋼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．
- 7) 頭井 洋・新家 徹：底板の浮き上がり変形をともなう円筒タンクの地震時変形解析，構造工学論文集，Vol.31A, PP.537～550,1985年3月．
- 8) 山口宏樹・秋山成興：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，構造工学論文集，Vol.31A,PP.529～536,1985年3月．
- 9) 塩治幸男：弾性地盤上タンクの振動特性に関する解析的研究，埼玉大学工学部建設基礎工学科卒業論文，1985年3月．

（1986年1月24日受付）