

ドラム缶集積体の耐震安全性について

伏 見 英*
川 田 孝*

1. ま え が き

危険物貯蔵施設あるいは石油化学工場などでは、数多くのドラム缶を取扱っているが、その管理状態を見ると、個々の施設で、さまざまな集積方法がとられているのが現状である。これらの集積されたドラム缶が地震時において安定を失い、荷崩れを起した場合、高所からの落下によるドラム缶の破壊、人的被害、避難の障害、さらに消防活動を遅延させる等のことが予想される。

そこで、地震時におけるドラム缶集積体の耐震安全性に関して安全な集積方法を検討するため、Proto type, Model type (1/2縮尺) のドラム缶による強制振動実験を実施したので報告する。

2. 実 験 項 目

- (1) ピラミッド型横積実験 (P, m)
- (2) ピラミッド型縦積実験 (P)
- (3) パレットによる横積実験 (P)
- (4) パレットによる縦積実験 (P)

3. 試験体及び集積方法

実験に使用した鋼製ドラム缶は図1に示す形状、寸法であり、実大ドラム缶 (1種, M級) と1/2縮尺のドラム缶モデルを使用した。

ドラム缶の集積段数は、モデル実験において5段積とした他は全て3段積とした。また、実験項目(3)、(4)では、図2に示すような、木製横積用パレット (A型)、木製縦積用パレット (B型)、鋼製横積用パレット (C型) を使用した。

ドラム缶の内容液は水を用い、液量をパラメータとしたときの振動特性をみるため、満水時 (98%充填)、9%充填時を想定した。

4. 測 定 方 法

各々のドラム缶集積体の下段、中段、上段の頂部に加速度変換器素子を取付け固定する。センサーはブリッジボックスを通して電磁オシロに接続される。

まず、計測は加速度を一定にして、周期をパラメータにとり、周波数分析を行い電磁オシロの波形から、各周期での応答倍率 (a/a_0) を計算し、固有周期 (1次共振点) を見出す。

次に、この1次共振周期において、集積ドラム缶の径方向 (X方向)、軸方向 (Y方向) に強制振動を行い、ドラム缶集積体の移動、崩壊等の振動性状を観測した。なお、実験には、最大荷重2 ton の振動台を使用した。

5. 実 験 結 果

- (1) ピラミッド型横積実験

実大ドラム缶を3段積、横型ドラム缶を3段積およ

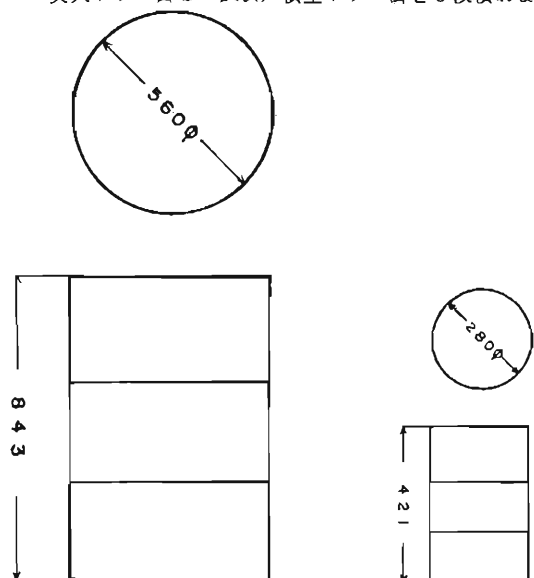


図 1 実大ドラム・モデルドラム

* 第二研究室

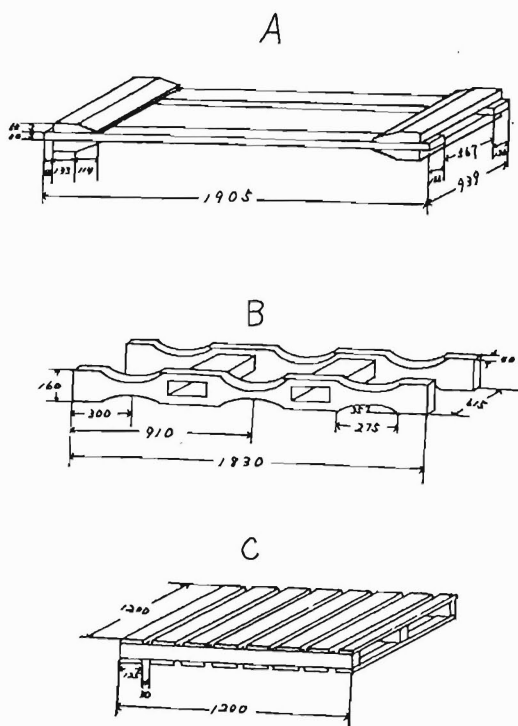


図 2 供試パレットの種類 (A, B, Cタイプ)

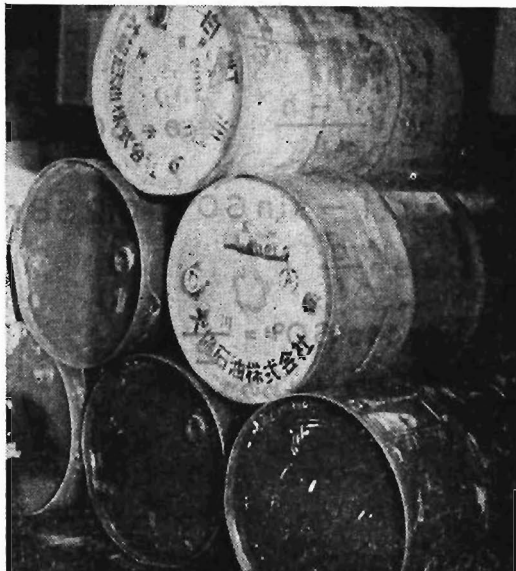


写真 1 横積ピラミッド型

び5段積とした強制振動実験結果からは、まず Proto type と Model type では、比較することができないような挙動の相異があり、この種の実験でもモデル実験が大して意味をもっていないことが判った。これは、単体ドラム缶相互の接触状態の相異が原因であると考えられる。モデルドラム缶による実験結果を図3, 4, 7, 8に、実大ドラム缶による実験結果を図5,

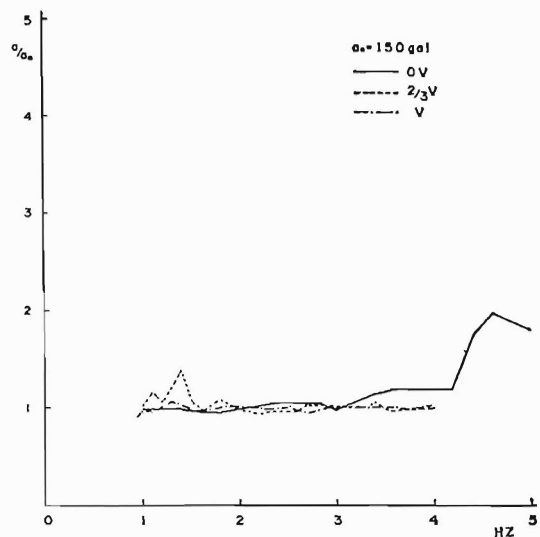


図 3 モデル3段積 (X方向) 応答曲線

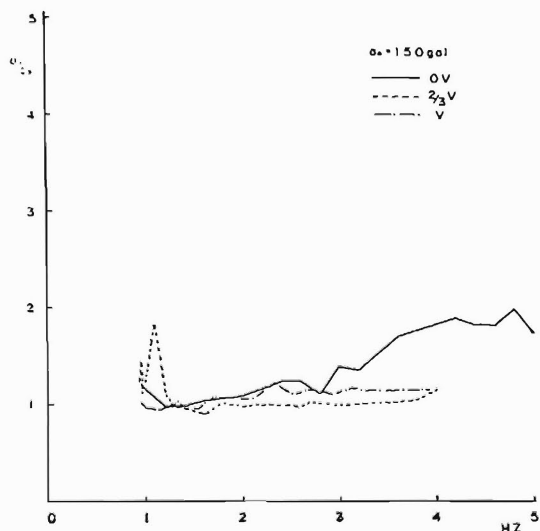


図 4 モデル3段積 (Y方向) 応答曲線

6に示した。

実物ドラム缶のX方向の正弦波強制振動実験において、液量 $\frac{2}{3}V$ では1.2Hz, 140galで集積体が動き出す、ドラム缶内の液体の動揺が全体の系に大きく影響し、複雑な応答を示す。1.2Hz, 250galで集積体の最下段が崩壊した。また、液量V(満水)では、2.3Hz, 120gal集積体が激動し崩壊の寸前に達した。したがって、ドラム缶の液量が増加するにしたがって応答が増大するが、これは重量増加によってドラム缶が変形するため、例えば、空ドラム缶の場合、2.5Hz, 150galで上段が動き始めるが、安定な状態を呈していることで説明がつく。

実物ドラム缶のY方向の振動実験では、液量 $\frac{1}{2}V$ で0.8Hz, 90gal、液量Vで、2.1Hz, 120galに滑り出し

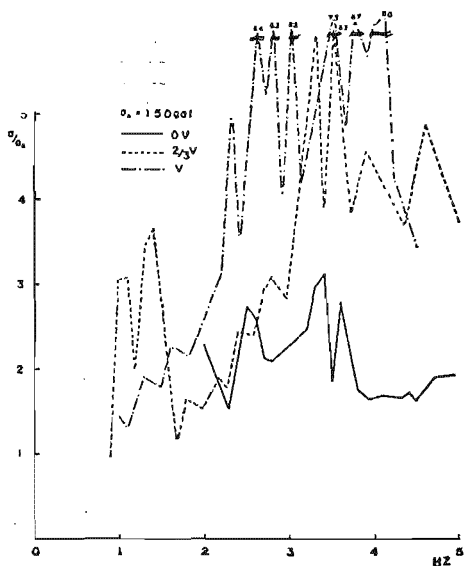


図 5 実物 3 段積 (X 方向) 応答曲線

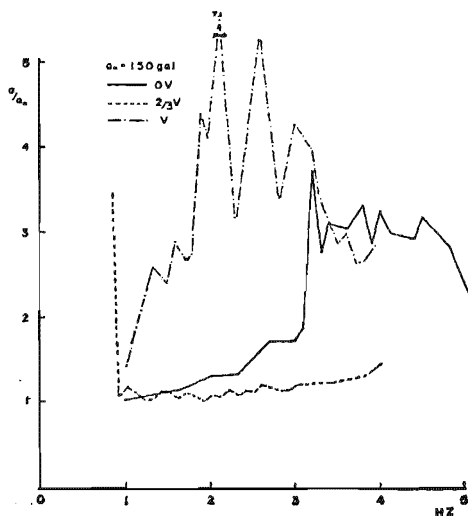


図 6 実物 3 段積 (Y 方向) 応答曲線

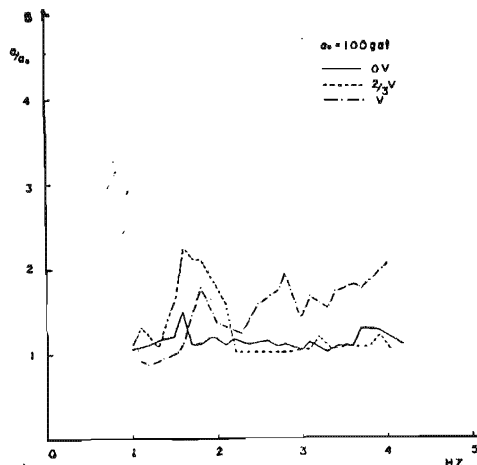


図 7 モデル 5 段積 (X 方向) 応答曲線

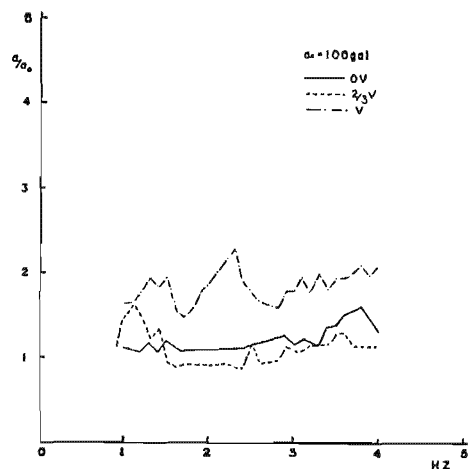
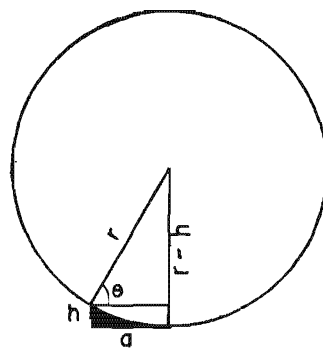


図 8 モデル 5 段積 (Y 方向) 応答曲線



$$\sin \theta = \frac{r-h}{r} \quad \theta = 60^\circ$$

$$h = r(1 - \sin 60^\circ) = 0.268r$$

$$\cos \theta = \frac{a}{r}$$

$$a = r \cos 60^\circ = \frac{r}{2}$$

図 9 歯止めの高さ (h)

現象が見られ、やはり液量 $2/3V$ としたときの液体の動揺が集積体の系に複雑な応答を示している。Y 方向の強制振動実験をみると、全体的に低加速度で集積体が滑り出しを起しているが、これは横積されたドラム缶相互の接触面が加振方向に対して小さいことから、摩擦力と水平力の関係で、Y 方向振動の不安定さが現れるものと考えられる。

次に、実大ドラム缶集積体を 5 段積としたときの強制振動実験は、振動台の最大積載荷重と振動床台の大きさの制限から実験を中止した。そこで、5 段積モデルドラム缶集積体の強制振動実験によって、集積体の崩壊過程の検索を試みた。ドラム缶集積体の崩壊時の必要条件は、1.8Hz, 300gal であった。(X 方向)こ

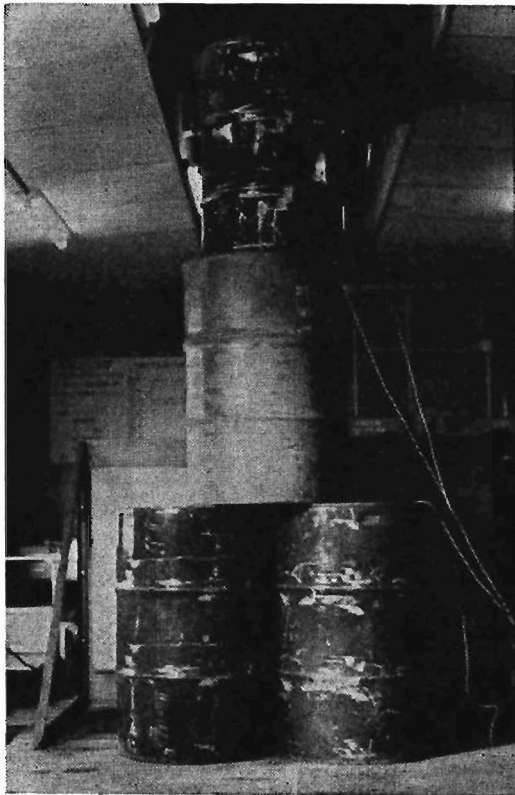


写真2 堅積ピラミッド型

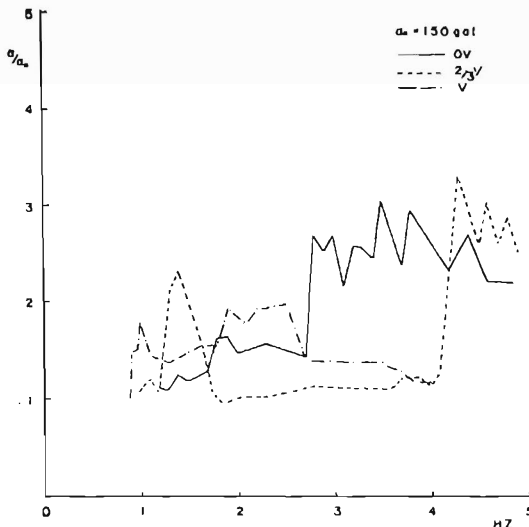


図10 実物3段積応答曲線 (堅型ピラミッド)

の崩壊過程を見ると、実物ドラム缶集積体とは相異して、集積体中段側面からの飛び出しによって、全体が崩壊した。同様に、液量を満水（V）としたY方向の実験では、2.2Hz、220galで、上段のドラム缶モデルが滑り出しを生じ、250galガルで振動台に落下した。

この実験から、最下段のドラム缶に歯止めをして固定しても、完全とはいえないわけで、この場合、モデ

ル実験結果からの推定であるが、集積段数が高くなれば、上、中段の位置からのドラム缶の飛び出しによるドラム缶集積体の崩壊を考慮する必要がある。したがって、図9に示すような、最下段のドラム缶に固定させる歯止め、あるいは杭の適切な高さの選定ばかりでなく、集積体の系の安定に対しても対策を講じておく必要がある。

(2) ピラミッド型堅積実験

実物ドラム缶を写真2のように堅積し、正弦波強制振動実験を行った。

X方向の振動実験においては、液量 $\frac{1}{3}V$ で、1.4Hz、140galでドラム缶が歩き出し、また、液量 $\frac{1}{3}V$ では、2.4Hz、280galで歩き出す結果を得た。ここでもドラム缶内の液体の動揺が集積体の系に複雑に作用し、系が不安定な応答を示している。また、空ドラム缶の接触状態がなめらかでなく、ガタを生じるため、この集積方法では不安定となり、2.8Hz、140galで歩き出し現象を生じた。

そこで、最も不安定な液量 $\frac{1}{3}V$ について、集積体の各段に木板を入れて実験を行ったところ、歩き出し加速度として220galガルを得たことにより、各段を仕切ることによっても安定性を増すことができることが確認された。

(3) パレットによる横積実験

運搬作業の効率の点から、施設内では、各種のパレットを使用した集積方法が多く見られるが、このパレットによる集積方法は、外観上、安定がよいように見え、したがって、耐震性においても問題がないと黙過され易いことから、2機種のパレットについて横積実験を行なった。

ア) A型タイプ

A型タイプのパレットは木製であるが剛体に近く単板の両端上下に歯止め（つめ）を取付けて、ドラム缶3本を集積して使用するパレットである。この実験においては、3段積として振動実験を行なった。

まず液量満水（V）のX方向加振実験においては、1.6Hz、250galで安定した状態を示している。

次にY方向加振実験においては、横積ピラミッド型と同じく、X方向加振実験に比較して安定性がよくないが、2.5Hz、160galから集積体の系が揺れ始めて250galで最上段のドラム缶が滑り出しを始める。しかし、横積ピラミッド型よりも安定性がよく、数値的にも高いことから、A型タイプの耐震安全性は、横積ピラミッド型よりも優れているといえる。

イ) B型タイプ

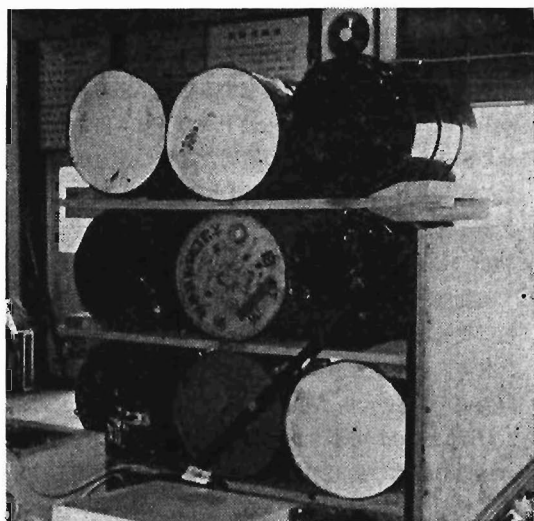


写真3 A型パレット3段階

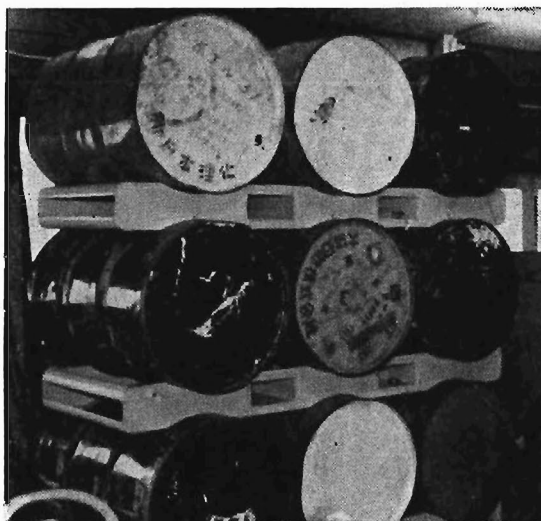


写真4 B型パレット

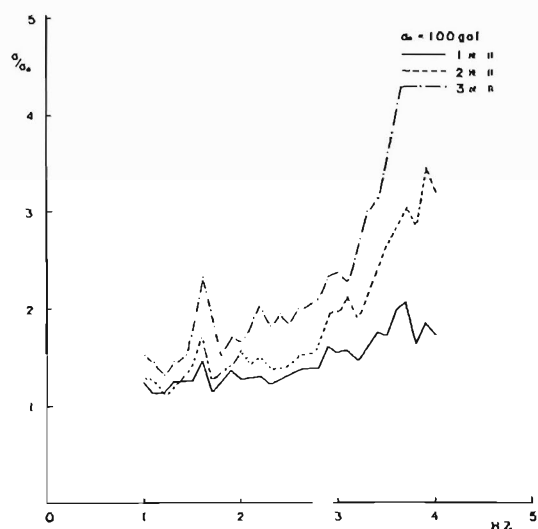


図11 A型パレット3段階(X方向)応答曲線

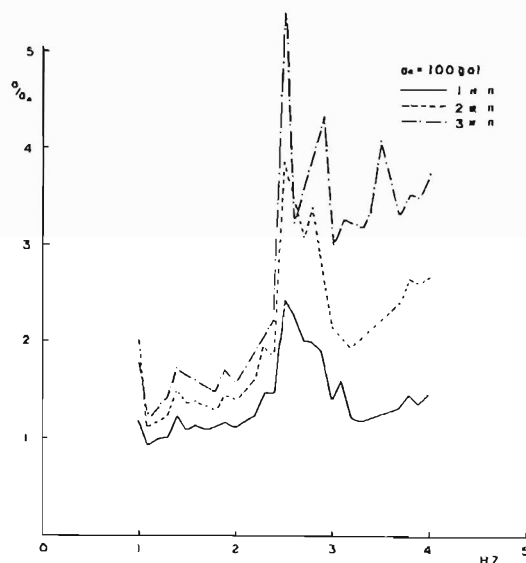


図12 A型パレット3段階(Y方向)応答曲線

B型タイプのパレットは鋼製であり、A型タイプと同様にドラム缶3本を横に集積して使用するパレットである。このパレットの特徴は、ドラム缶の弯曲にはほぼ一致するようにパレットを工夫して製作してあるもので、パレットの上下が弯曲(図2参照)していることから、ドラム缶の固定方法としては堅固である。

X方向加振実験においては、1.2~1.7Hz、40galで大動揺し、100galで崩壊する。

Y方向加振実験においては、1.9~2.2Hz、70galで大揺れして、それ以上の加速度では最上段のドラム缶が落下する。

この実験結果から、最も耐震性があるものと予想したB型パレットがよくないという結果を得た。この原因は、まず、パレットの弯曲部がドラム缶の径に比較して浅いことが考えられる他、ドラム缶の変形、ガタによる遊びがあげられる。また、ドラム缶同士が接触していないため、ドラム缶相互の動きを打消すことがないことも考えられる。この他、パレットが鋼製であ

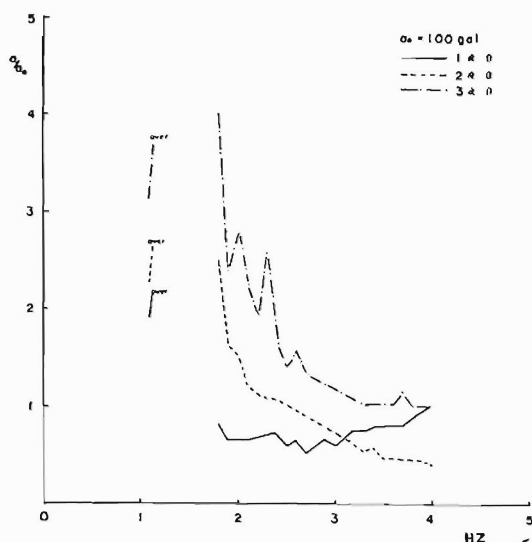


図13 B型パレット3段積(X方向)応答曲線

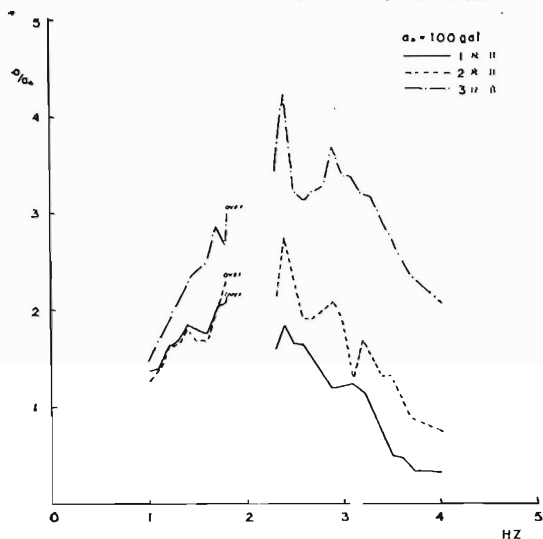


図14 B型パレット3段積(Y方向)応答曲線

ることから、ドラム缶とパレットの摩擦が小さく、滑り易いことがあげられる。したがって、パレットを鋼製とする場合、何んらかの方策によって堅固に固定しなければならない。

(4) パレットによる堅積実験

堅積実験に用いたC型パレットは、木製すのこ状パレットで弾力性が小さく、ほぼ剛体に近い。1枚のパレットにドラム缶4本を縦に積載することができる。この実験でも3段積として強制振動実験を行った。

共振振動数 1.9Hz, 220gal で試験体は安定しており、滑り出し、歩き出しは認められなかった。重心が比較的高いにもかかわらず安定した性状を示すのは、ドラム缶の縦方向荷重に対する変形が少ないためであると考えられる。したがって、このC型パレットは少ない面積に多くのドラム缶を集積する方法として有効



写真5 C型パレット

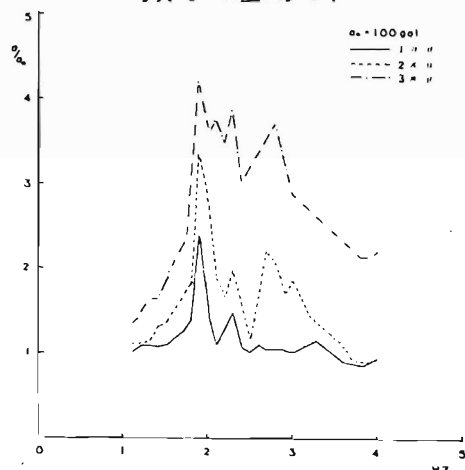


図15 C型パレット3段積(X方向)応答曲線

であると考えられるが、やはりドラム缶同士のガタがある場合には不安定になる。

6. 考 察

ドラム缶集積体の耐震安全性に関して、正弦波による強制振動実験を試みたが、本実験体系は全て3段積集積体(model typeは、一部分、5段積集積体系による実験を試みた。)であることから、一般的な安定条件は一意的に判定できないと同時に、集積体系種別による安定性の比較は、ドラム缶集積体系の固有振動数がほとんど一致しないことから、単に応答加速度の

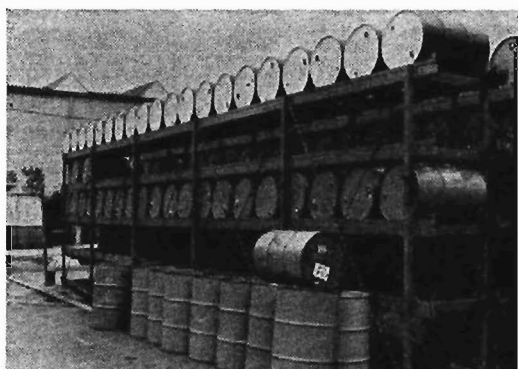


写真 6 集積ラック状態図

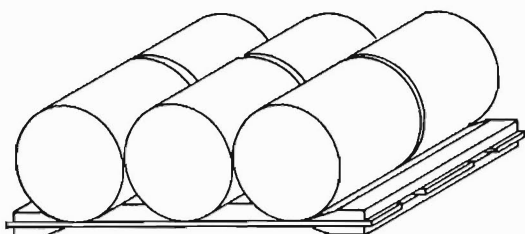


図16 A型パレット改良型

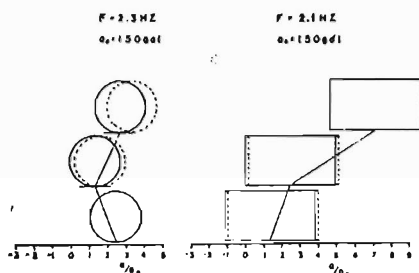


図17 横積ピラミッド型振動モード

gal 数値の大小からは判定されないわけで、本実験において実施した個々の集積方法について述べる。

まず、ドラム缶最下段の両端に歯止めを設けたピラミッド型横積については、集積体系の方向性に問題があり、軸方向加振に対して不安定であるが、径方向加振に対して水平震度 (α/g , α : 地動水平加速度, g : 重力加速度, $9.8m/sec^2$) 0.2 の耐震性があり、この集積方法は最も経済的であるが、常に、歯止めの高さを適切に処置しておく必要がある。

ピラミッド型縦積に関しては、一般の縦積集積体と同じように、ドラム缶の落下防止という点から注意をする必要があり、常識的には、空ドラム缶を縦積にしておく施設はないと考えるが、この実験において、3段目上部ドラム缶(98%充填)は、固有振動数 2.4Hz, 280gal で歩き出し現象を呈するが、300gal の加速度を入力として与えても、ドラム缶の落下は認められなかった。したがって、この集積体系の耐震性をどのよ

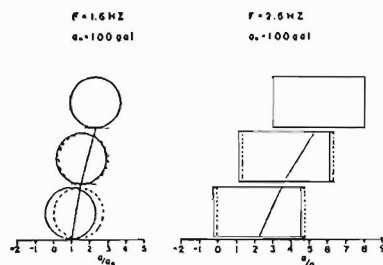


図18 A型パレット振動モード

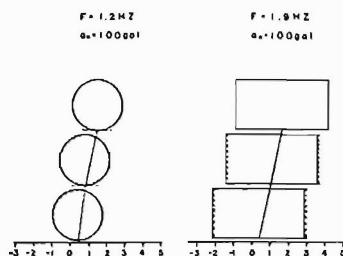


図19 B型パレット振動モード

$F = 1.9 \text{ Hz}$
 $a_0 = 100 \text{ gal}$

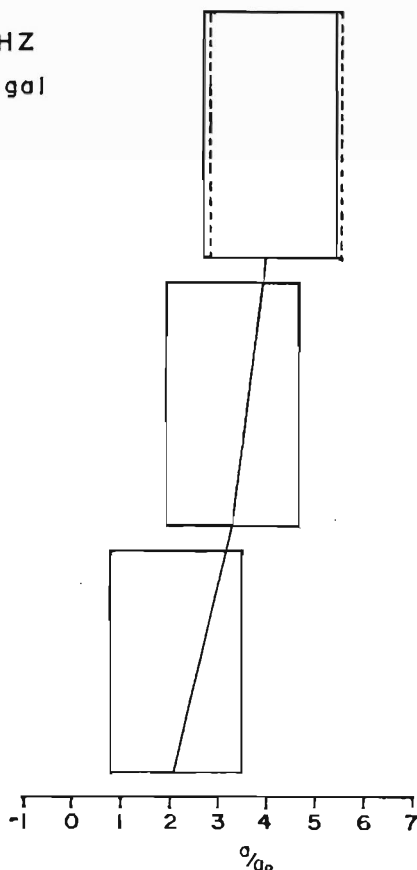


図20 C型パレット振動モード

うに評価するかが問題であるが、同一周期の振動継続時間を考慮すれば、水平震度 0.3 の耐震安全性は充分あると考えてよい。しかし、ドラム缶液量補充の強制振動実験においては、液体動揺によって系が不安定になることから、表面の短い仕切板を各段に入れる必要があろう。また、この種の集積方法において、仮に、ドラム缶が落下した場合の状況を見るため、JIS-Z-0202—1976 に定める試験方法の落下高さの 2 倍 (2.4 m) の高度から対角落下を試みたところ、ドラム缶の変形が認められたが、亀裂による漏水は生じなかったことから、ドラム缶集積体周辺に鋭利な障害物を置かなければ、ドラム缶は破壊しないといえる。この堅積ドラム缶の歩き出し、滑動防止のためには、上段ドラム缶相互をロープ等で固定することにより、安全性を増すことができる。

次に、パレットによる積積では、A, B type のパレットを使用した。この種のパレットは、方向性に問題があり、A type は、図 16 のように、1 枚のパレットに 6 本のドラム缶を積載すれば、軸方向の安定性が増加するものとする。また、B type のパレットは、ドラム缶を受けるパレットの湾曲部を深くしてドラム缶の径に合致するように改良する必要がある。

パレットによる堅積では、C type パレットを使用した。この集積体系の強制振動実験においては、固有振動数 1.9 Hz, 220 gal でもドラム缶の歩き出し、滑り出しは認められなかった。この系は非常に安定した性状を示していることから、水平震度 0.3 以上の耐震性を有しているものとする。

近年、多量の危険物を有効に貯蔵し、ドラム缶に負荷をかけないで積載するラック方式のものが使用されており、このラック方式の集積体系の耐震実験は実施していないが、この方式において問題となるのは、ドラム缶の歯止めの方法、飛び出し防止方策ならびに基礎の固定方策等であるが、やはり、実験的に検討する必要があるものとする。

7. 終 り に

今回の実験は、水平単弦定常波による強制振動によって耐震性を検討したものであるが、やはり、上下動振動に対して考慮すべきである。実際の地震動に対してドラム缶集積体がどのような応答をするかは複雑であり、地震動と正弦波振動の相関も問題があるとされており、また最も単純な単体の転倒振動に関しても、多量のパラメータを無視できないから理論的にも難解である。

いずれにしても、今回の実験は、静的震度法による耐震強度の検討の域を出ていないが、多段積集積体のおおよその振動性状を把握することはできたわけであり、多量のドラム缶を取扱う施設においては、地震時の安全管理に対して周到な配慮がなされなければならない。

終りに、貯蔵容器の耐震性に関連して、一般家庭に広汎に普及している引火性液体容器、あるいは作業場等における容器の安全管理を含める必要があるが、これについては、まず、正確な実状を認識することが先決であり、将来の研究課題としたい。 終 り