

# 港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF  
PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

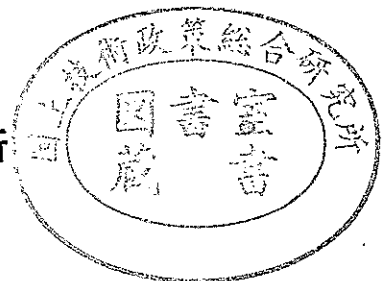
No. 28 April, 1967

地震波形振動試験装置について…………… 林 聰・荒井秀夫

放射性廃棄物の海洋投棄用容器としての  
鉄筋コンクリート容器の耐衝撃性について…………… 赤塚雄三・関 博

昭和 42 年 4 月

運輸省港湾技術研究所



# 放射性廃棄物の海洋投棄用容器としての 鉄筋コンクリート容器の耐衝撃性について

## 目 次

概要	
1 緒論	20
2 落下試験と加圧試験について	21
3 鉄筋コンクリート容器の設計と製作	22
3.1 鉄筋コンクリート容器の設計の要点	22
3.2 ストレーン・ゲージの埋め込み	22
3.3 コンクリートの配合と施工	28
4 試験方法	28
4.1 落下試験用床版	28
4.2 落下試験装置	29
4.3 測定計器	29
4.4 試験方法	30
5 衝撃波の特性	32
6 衝撃力と衝撃ひずみ	35
6.1 衝撃力	35
6.2 衝撃によって生じたひずみ	37
7 鉄筋コンクリート容器の耐衝撃性	45
8 結論	46
参考文献	46
付図	47

# Impact Resistivity of Reinforced Concrete Containers for Disposal of Radio Active Wastes into Deep Sea

by Yuzo Akatsuka, Dr. Eng. \*  
Hiroshi Seki, B. Sc. \*\*

## Synopsis

Drop tests were carried out to evaluate the impact resistivity of the reinforced concrete containers for disposal of radioactive wastes.

The tests were made using the fourteen model containers of five different types of 1/2 to 1/3 of the prototype proposed for the practical purposes. The impact was loaded on the model container through dropping them onto the test slab of massive concrete from the height of 1 to 3 meters under various conditions to simulate the collision with the rocky sea bottom at the depth of 2,000 meters or more when disposed into the sea and the accidental collision anticipated during their handling and shipping operations. The impact resistivity of the containers was evaluated based on the observed dynamic strain distribution in concrete and reinforcing steel and the crack formation in concrete.

---

\* Chief, Materials Laboratory, Structures Division

\*\* Member, Materials Laboratory, Structures Division

# 放射性廃棄物の海洋投棄用容器としての 鉄筋コンクリート容器の耐衝撃性について

赤塚雄三\*・関

博\*\*

## 概要

放射性廃棄物の海洋投棄に必要な、鉄筋コンクリート容器の耐衝撃性を検討するために、中空の鉄筋コンクリート模型容器を用いて落下試験を行なった。

用いた鉄筋コンクリート容器は外水圧をすべて鉄筋コンクリートの外殻で負担する構造の密閉式と、特殊な内外圧力の調整機構を設けて、鉄筋コンクリート容器には外水圧の作用しない構造の内外圧平衡式の2種である。前者は、外殻の形状によって、球形、卵形および円筒形の3種より成り、容積率（鉄筋コンクリート容器の全容積に対する放射性廃棄物を収容し得る容積の比率）も形状に応じて相違する。後者は、いずれも円筒形であるが、圧力調整機構により弁式と粘性層式の2種から成っている。これら5種の鉄筋コンクリート容器にストレーン・ゲージを埋め込んでおき、1～3mの高さから自由落下させて、海底岩盤と想定したマッシュなコンクリート床版と衝突した時の衝撃現象を観察した結果、次の事項が明らかとなった。

- 1 中空の鉄筋コンクリート容器を、容器重量に比較してかなりマッシュなコンクリート床版に落下させた場合、容器にはその衝撃によって、 $1/1000 \sim 3/1000$  sec で最大となるひずみが発生する。
- 2 実用化を提案されている密閉式模型容器を、2000mの海洋に投棄した時に生ずると考えられる衝撃力とほぼ同等の衝撃力を生ずるように、陸上で自由落下させた時に発生する衝撃ひずみは、引張、圧縮共に、 $180 \times 10^{-6}$  (約 $50 \text{ kg/cm}^2$ )程度であり、これらの容器は海底岩盤との衝撃に対して、ほぼ満足すべき耐衝撃性をもつものと判断される。
- 3 内外圧平衡式構造の弁式および粘性層式容器では、容器の内部に達する著しいひびわれが発生し、また、容器の上下端部がかなり破壊した。従って、これらの容器については、運搬や荷役作業における不測の落下などの事態に対し十分な安全性を確保しその実用化を計るためには、耐衝撃性を増すと共に内容物の飛散を防止するような構造上の改善が必要と思われる。

## 1 緒 論

放射性廃棄物には、固体、液体、気体の三種があり、放射能の強さによって、高、中、低の三レベルに分けられ、次の方法によって処分されている。すなわち、不燃性固体廃棄物は、保護容器に入れ減衰待ちとするが、可燃性ものは焼却しそのガスはフィルターなどを用いて許容濃度の $1/10$ 以下とし、残った灰はセメント硬化体として保管する。また、放射能の強い液体はコンクリート製容器に詰め、不燃性の固体と同様に保管するが、中、低レベルで、処理し許容濃度の $1/10$ 以下となったものは海へ放流する。

上述のように現時点では、放射性廃棄物のほとんどは陸上保管である。しかし原子力発電が実用化する時点では、本格的な処理、処分が必要と

なることが予想され、経済的な処分の一方法として海洋（2000m以深）への投棄が着目されその調査研究が進められている。放射性廃棄物の海洋投棄用容器は、十分な耐久性を有し、更に、取り扱いが簡単で廉価なことが必要である。これらの条件を満たすものとして、コンクリート容器が最も有力で、このためのコンクリートとしては、原子炉、ホットセル、荷電粒子加速器あるいは放射線治療室のように透過力の大きい放射線を対象とした重量コンクリートは必要でなく、施工を入念に行なうならば普通のコンクリートで十分であると考えられている。

海洋投棄用容器の設計製作においては、静荷重のほか特殊な動荷重の影響を考慮する必要がある。前者は、海洋に投棄された容器に加わる海水の静水圧で水深2000mでは、約 $200 \text{ kg/cm}^2$ である。後者は、容器の陸上輸送や港湾荷役における吊具やロープの破損による落下および容器が海底に到

\* 構造部 材料施工研究室長

\*\* 構造部 材料施工研究室

達したとき海底岩盤等との衝突によって生ずる衝撃荷重である。実用化を提案せられている海洋投棄用容器は、これらに対して十分な安全性をもつものでなければならない。

著者等は、すでに、放射性物質で汚染したガラス器具等の処分の一方法として、これらの物質を破碎圧縮して鉄筋コンクリート容器に入れ、その空隙をモルタル注入によって充填して一種のプレバッド・コンクリート体として、海洋投棄する方法を提案した<sup>1)</sup>。この処分方法では、海洋投棄用容器は固体と見なすことができ、外水圧に対する強度は十分であって、運搬・荷役等における不測の落下および海底岩盤に衝突した場合の耐衝撃性のみを考慮すればよく、これらの場合にも十分な耐衝撃性をもつことを実験的に確かめた。

一方、液体としての処分を要するものについては、密閉容器に封入する必要がある、その封入に際して空隙の残留する可能性も大きい。従って、この場合の容器は、前述のように巨大な外水圧に耐え得ると共に、衝撃に対して十分耐え得るものでなければならない。

中空のコンクリート体が衝撃荷重の下でいかなる挙動を呈するかについて研究した例は皆無であり、特に、中空の鉄筋コンクリート容器がマッシュな固体に衝突した際に発生する衝撃応力の大きさや分布状態については、まったく知られてなく、これを解明する必要があると思われた。

本研究は、上述の必要性によって実施したもので、放射性廃棄物の海洋投棄用容器として実用化を提案されている、5種類の鉄筋コンクリート製の模型容器<sup>2)</sup>を用いて、各種の落下試験を行ない落下衝撃時の挙動を観察した。本落下試験における容器の落下条件は、海洋投棄後の容器の最終速度およびその速度における衝撃力、衝突時の容器の姿勢、容器の陸上運送や港湾荷役の際の不測の落下等を考慮して定めたもので、落下高さは1～3mとし、落下時の容器の姿勢を、垂直、傾斜および水平の3通りとした。被衝撃体は、堅固な土丹層上に打込んだマッシュなコンクリート床版(縦2m×横3m×厚さ0.5m)である。

コンクリート容器には、あらかじめストレイン・ゲージを埋め込んでおき動ひずみ計および電磁

オッシログラフを用いて衝撃波を記録し、これを解析すると共に容器に生じたひびわれの状態を観察して、容器の耐衝撃性を検討した。

本研究は、原子力の平和利用のために科学技術庁が土木学会に委託した“放射性廃棄物の海洋投棄用容器の試験研究”の一部であって、土木学会との共同研究(昭和40年度)として実施したものである。各種模型容器の設計、製作は、当所で製作した一部を除いて、鹿島建設技術研究所(百島裕信、岩城良両氏)が担当された。衝撃現象の測定および解析については、耐震構造研究室 土田肇室長および山田通一郎技官より有益な助言を頂いた。また、落下試験の実施に際しては、材料施工研究室、津端雅史、浅岡邦一、小野寺幸夫君の協力を得た。改めて、感謝の意を表する次第である。

## 2 落下試験と加圧試験について

海洋投棄用容器の海底岩盤との衝撃時の応力分布は、想定した投棄個所の水深(以下、これを想定水深という)の静水圧に相当する圧力を加えた状態で落下する場合にのみ正確に観察できる。しかし、このような条件下の落下試験は、實際上困難である。そこで、想定水深における衝撃力が同一となるように、模型容器を空気中で自由落下させ、その衝撃による応力を測定すると共に、落下試験に供したと同一形状・寸法の模型容器を圧力容器に封入して、想定水深の静水圧に相当する圧力を静的に加え、その時の応力分布を測定し、両者を重ね合わせて想定水深における衝突時の応力分布を推定することを試みている。模型容器の加圧試験は、東京大学、東京都立大学、中央大学および鹿島建設技術研究所の研究グループが分担し、各種の容器を用いて実用上の目安を得<sup>3)</sup>、更に、

注) すなわち、球形、卵形、円筒形の3種の密閉式構造の容器および弁式、粘性層式の2種の内外圧平衡式構造の容器である。ここで、密閉式構造とは、容器の想定水深2000mの海底において作用する全水圧を、鉄筋コンクリート殻で負担するように設計された構造をいい、内外圧平衡式構造とは、容器に特殊な内外圧力差の調整装置を設けて、容器自体には、水圧の作用しない構造としたものを意味している。

静的な圧力下における容器各部の応力分布を測定している。本研究は、このような実験研究の一部として、落下衝撃時の衝撃応力を測定すると共に、併せて、運搬荷役における落下等に対する耐衝撃性を検討したものである。

### 3 鉄筋コンクリート容器の設計と製作について

#### 3.1 鉄筋コンクリート容器の設計の要点

密閉式および内外圧平衡式合わせて、6種類、計14個の中空の鉄筋コンクリート容器を用いた。その構造様式と形状および内容積比等は、表一1に示した通りである。このうち、密閉式の円筒形I型容器は、予備試験用として製作したもので、海洋投棄用として実用化を提案されたものとは多少異なる。これらの中空の鉄筋コンクリート容器のうち、密閉式の容器は想定水深2,000mにおける静水圧 200kg/cm<sup>2</sup> を、すべて鉄筋コンクリート体で負担する構造として設計したもので、一般に厚肉で、放封性廃棄物を收容するための内容積は著るしく制限され、球形の容器が最大で36%、円筒形の容器が最小で2.7%程度である。

これに対し、内外圧平衡式はいずれも円筒形であるが、容器内部の圧力が外部より作用する水圧と平衡を保つ機構となっており、容器自体には荷重が加わらないことを前提として設計されている。内外圧平衡式のうち、弁式のものは、外部の海水が外圧の大きさに応じて特殊な弁を通して、容器内に侵入するような構造（逆流防止構造）として内外圧の平衡を計っている。一方、粘性層式は、円筒形容器の端部にはめ込まれた円形の蓋が、外水圧を受けて容器内壁に沿って滑動して、内外圧が平衡状態となるもので、内壁と蓋との間に設けられたアスファルト系粘性層によって、放射能の漏えいを防止する構造である。従って、これらの内外圧平衡式のものでは、運搬・荷役および海洋投棄における落下衝撃に対する安全性が、構造設計上の要点となっている。

球形容器は、製作および運搬・荷役における安定性を考慮して上、下両面に平坦部を設けているが、計算上は厚肉球殻として設計されている。卵

形容器は、球殻の一部と扇形回転体とからなるものとして設計されており、製作と運搬・荷役における安定性については、球形容器の場合と同様である。また、密閉式円筒形II型の容器は、側壁部の接線方向および直角方向の応力を厚肉円筒として計算し、側壁と上、下両端面の隅角部応力は、軸を含む面で円筒を切断したときの断面を閉合ラーメンとして求めている。

表一1 落下試験に供した容器の種類

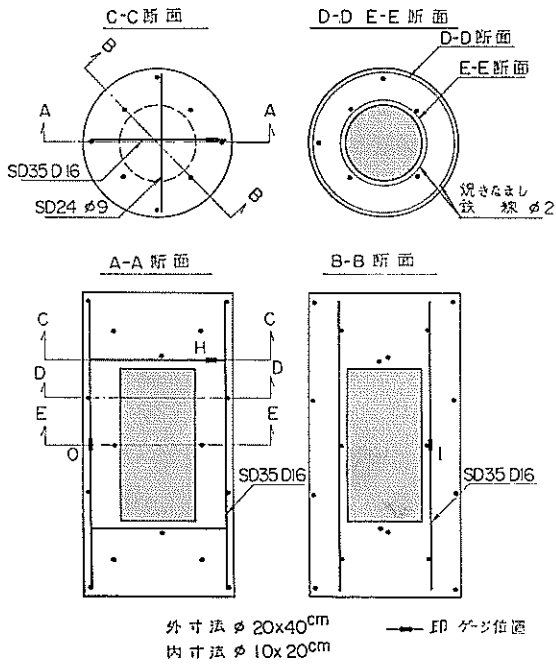
構造様式	形状	内容積比 (%)	記号	試容器数	
密閉式	—	球形	36	S	3
	—	卵形	19	E	3
	I型*	円筒形	13.2	C-I	5
	II型	円筒形	2.7	C-II	1
内外圧平衡式	弁式	円筒形	35	V-I	1
	粘性層式	円筒形	32	V-II	1

\* 予備試験用として港湾技術研究所において製作したもの。\* 印以外の設計は鹿島建設技術研究所が担当し、その依頼により日本鋼弦コンクリートKKが製作した。

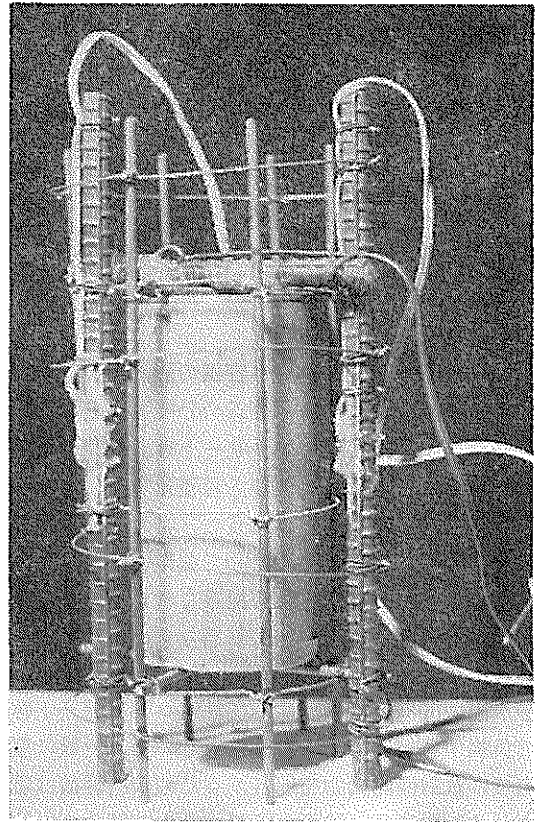
#### 3.2 ストレイン・ゲージの埋め込み

密閉式円筒形I型の容器は、実用化を提案されている他の容器の落下試験を実施するに当たって、その予備試験用として製作したもので、次の要領で製作した。すなわち、φ20×40cmの鋼製円筒形型枠に、上蓋を取り付けて中空とした、φ10×20cmの紙製型枠を埋め込み、その周囲にコンクリートを打込んで内部に空間を設けたものである。主鉄筋にはSD35、D16の異形鉄筋を用い、これに、ストレイン・ゲージ（測長20mm）を貼り付け防水処理を施した。配筋図、ゲージ位置を図一1に、配筋状況を図一2に示す。ゲージ0およびIは、それぞれ外側および内側の鉄筋に容器軸と平行になるように、ゲージHは横鉄筋に容器軸に直角方向に取り付けた。

密閉式円筒形I型以外の容器の形状、寸法と配筋図は図一3に示した通りで、ストレイン・ゲージは、図一4に示した位置と方向に埋め込んだ。



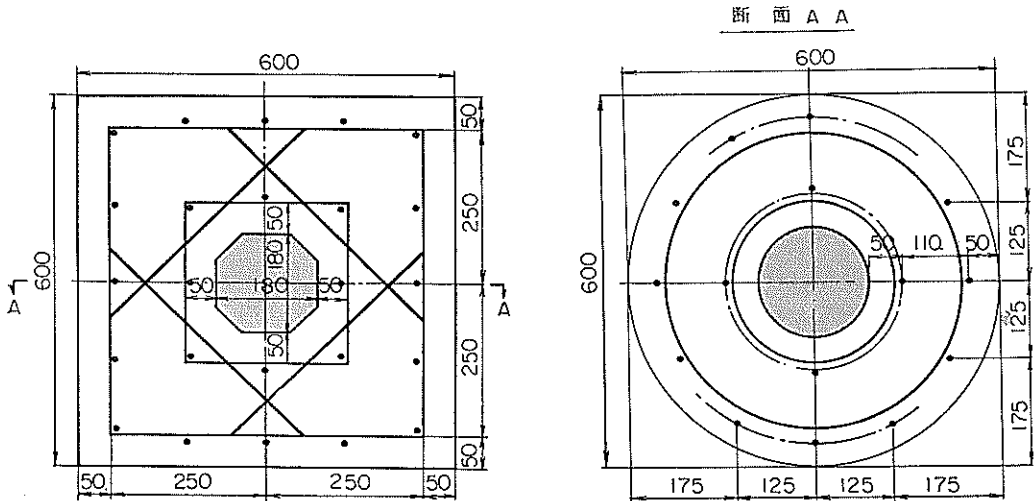
図一 密閉式円筒形 I 型容器配筋図およびゲージ位置



図二 密閉式円筒形 I 型容器の配筋状況

図一5 は一例として球形容器の場合の配筋状況を示したもので、これらの容器に用いた鉄筋は、SD 35、D10の異形鉄筋である。また、ゲージは測長 35mmのモールド・ゲージ（東京測器K.K.）で、

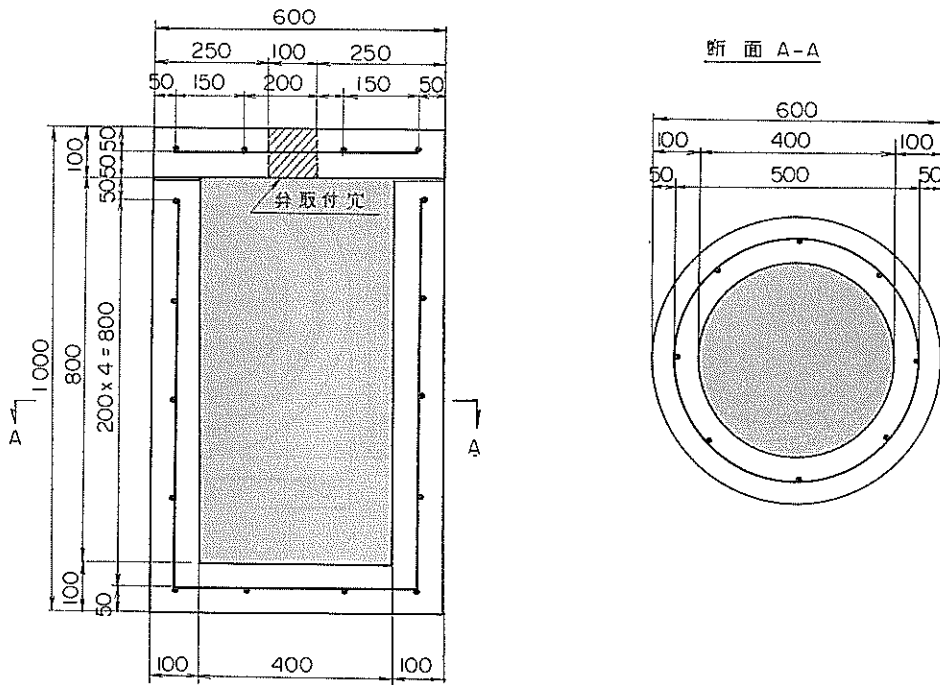
コンクリート表面より 2 cm の位置に、側壁部では円筒の接線方向(上、下端の平坦部と平行)に、上、下の平坦部では容器軸と直角方向に埋め込んだ。



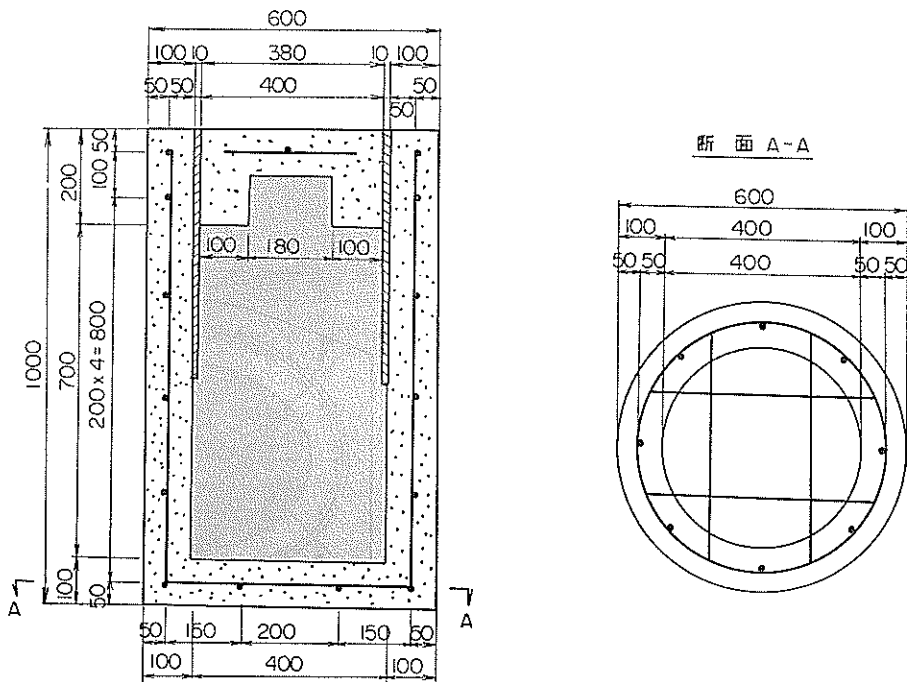
図一3.(a) 円筒形 II 型容器







图一 3. (d) 最弁式容器



图一 3. (e) 粘性層式容器

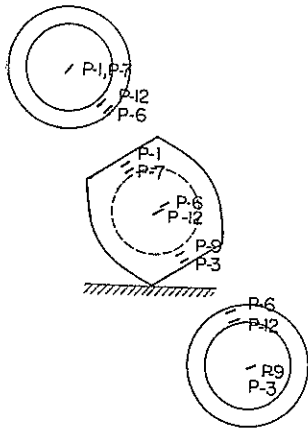


図-4. (a) ストレインゲージの埋め込み位置  
球形(S-3)

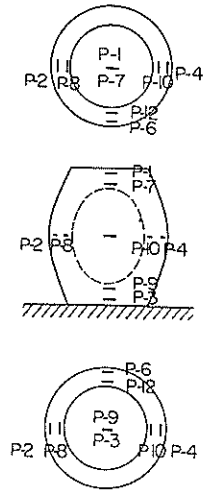


図-4. (b) ストレイン・ゲージの埋め込み位置  
卵形(E-1)

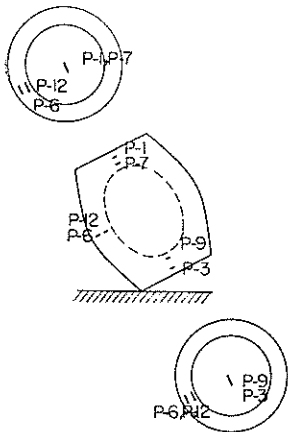
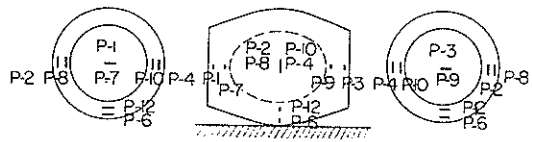


図-4. (c) ストレインゲージの埋め込み位置  
卵形(E-2)



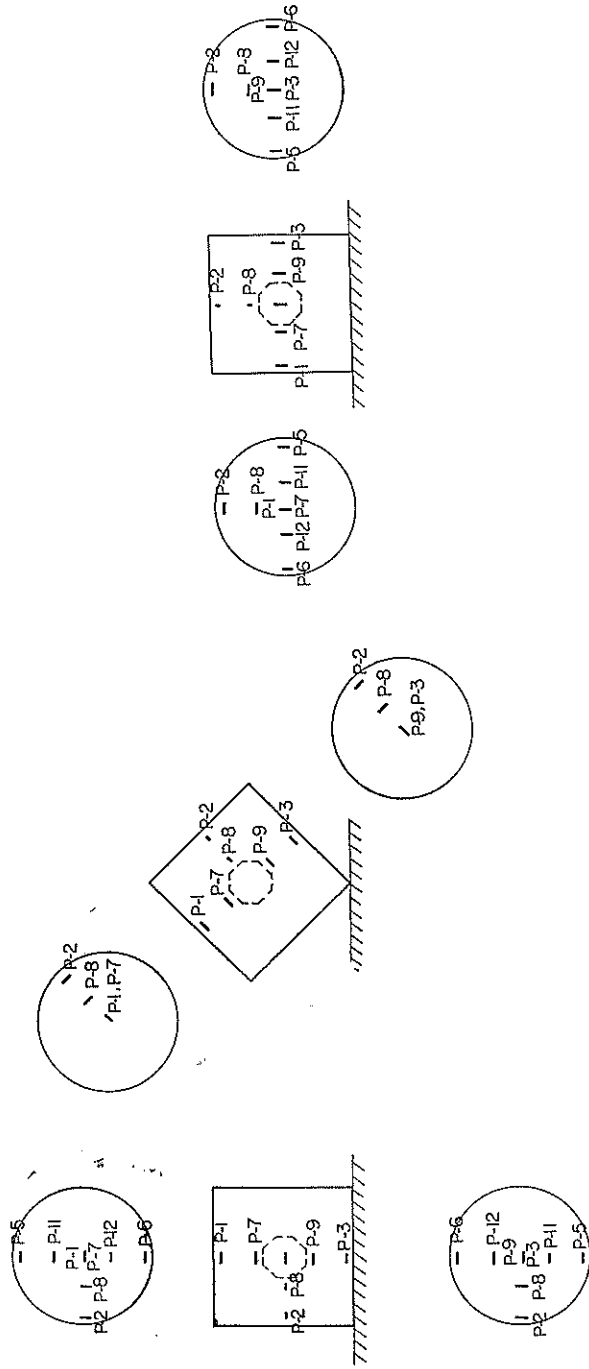


図-4. (d) ストレートン・ゲージの挿め込み位置  
円筒形II型(C-II)



図-5 球形容器の配筋状況

### 3.3 コンクリートの配合と施工

円筒形 I 型容器には、住友セメント社の普通ポルトランドセメント、静岡県富士川産の砂（比重 2.66，粗粒率 2.61）および神奈川県酒匂川産の砂利（比重 2.66，最大寸法 15mm）を用いた。コンクリートの配合は表-2 に示した通りで、配合強

度は  $\sigma_{28} = 400 \text{ kg/cm}^2$  である。コンクリートの練りませには、容量 200 l の強制練りミキサ (KO KEN, FP-200) を使い、練りませ直後にスランブおよび空気量を測定した後、容器型枠に打込んだ。コンクリートの打込みは、ほぼ高さの等しい 4 層に分けて行ない、各層を径 25mm の棒状バイブレーターを用いて十分に締め固めた。また、容器のコンクリート打込みと同時に、強度試験用供試体 ( $\phi 15 \times 30 \text{ mm}$ ) を製作した。コンクリート容器は、 $21^\circ \text{C}$ 、100% R. H. の恒温高湿槽で 24 時間養生した後脱型し、直ちに被覆養生剤を塗布して、 $21^\circ \text{C}$  の恒温室で 2 カ月間の被覆養生を行ない、次いで常温の屋内実験場に移した。

円筒形 I 型以外の容器は、日本鋼弦コンクリート K. K. の工場で作成したもので日本セメント社の早強セメント、東京都多摩川産の砂（比重 2.61）および砂利（比重 2.63，最大寸法 20mm）を用いた。コンクリートの配合は、表-2 に示した通りで、配合強度は  $\sigma_{28} = 600 \text{ kg/cm}^2$  である。容器は、最初に中空の埋め殺しの木製型枠を組んだのち、図-5 に示したようにその周囲に鉄筋を組み立て、これを鋼製の外型枠でおおい、内外型枠の間にコンクリートを打込んで製作した。コンクリートの締め固めには、棒状バイブレーターを用い、これを外型枠に接触させながらコンクリートを締め固めた。コンクリートの打込み後、直ちに容器上面をぬれむしろでおおい、3 日後に脱型し以後試験日まで屋内養生を継続した。

表-2 コンクリートの示方配合

容器型式	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位 $\text{m}^3$ 当りの重量 (kg)				
						W	C	S	N	* 混和剤
円筒形工型	15	12±1	4.5±1	45.6	43	180	395	735	974	1.98
密閉式 (円筒形工型を除く)、内外圧平衡式	20	4±1	—	34.0	47	174	512	810	810	—

\* ポゾリス No. 5L 使用 C×0.5%

## 4. 試験方法

### 4.1 落下試験用床版

容器落下時の被衝撃体は、縦  $2 \text{ m}$  × 横  $3.3 \text{ m}$ 、厚さ

$0.5 \text{ m}$  のコンクリート版 (圧縮強度:  $\sigma_{28} = 190 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_{182} = 270 \text{ kg/cm}^2$ ) である。床版の下は、 $-5 \text{ m}$  程度まで埋立土丹層、その下は堅固な土丹層であって、床版コンクリートの材令 200 日前後に落下

試験を行なった。

#### 4. 2 落下試験装置

図-6に示すような落下試験装置（設計：山村一級建築士事務所，製作：山村建設工業 K. K.）を用いた。その主要諸元は，表-3に示す通りで，電動ホイストを用いて供試容器を所定の落下高さまでつり上げたのち，容器にかけたワイヤーを支えているトンビを急激に引張り，支えをはずすことによって容器を自然落下せしめる構造である。

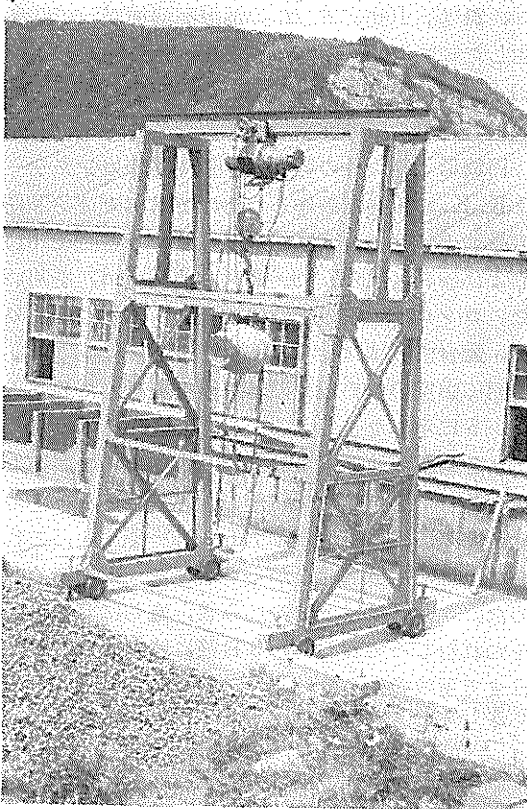


図-6 落下試験装置

表-3 落下試験装置の構造および主要諸元

構 造	鉄骨製 移動用車輪付 スクリーンジャッキ付
吊り揚げ荷重	2 ton
吊り揚げ速度	1 m/sec
最大落下高さ	3 m
落下試験面積	2.0×3.3m

#### 4. 3 測定計器

ひずみ測定に用いた動ひずみ計（共和電業 K. K. DPM-8 H 型）の測定可能周波数は  $1/1000$  %s 以下で，較正用の標準ひずみは  $\pm 100 \times 10^{-6} \sim 3,000 \times 10^{-6}$  である。電磁オシログラフ（共和電業 K. K. ラピコーダー）のガルバノメーターは油制動方式で，固有振動数は約 1000 %s である。それぞれのガルバノメーターの周波数特性曲線から，許容誤差を 5 % 程度として測定可能な周波数の範囲を推定すると，800 %s 程度である。ストレイン・ゲージの高速現象に対する応答性については，この程度の周波数では特に問題とならないから，本測定計器により 800 %s 程度までの現象を捕捉することが可能である。記録紙の紙送り速度は 1 m/sec 程度で，記録紙は Dupont 社の WRIT. 5, TYPE B を使用した。（図-7）。

コンクリートの静弾性係数は，供試体中央部に相対する 2 枚のストレイン・ゲージを貼り，図-8に示した要領で，ひずみ計（共和電業 K. K. DM-6 H 型）およびペン書きオシログラフ（渡辺測器 K. K. ED-6 型）を用いて測定した。

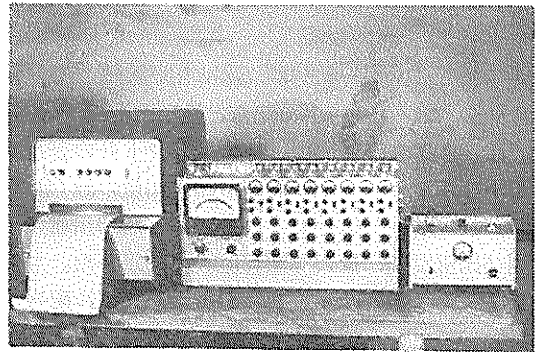


図-7 動ひずみ測定装置

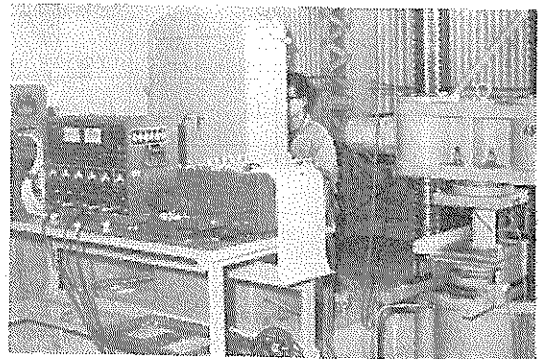


図-8 静弾性係数測定用計器

#### 4. 4 試験方法

容器を海洋に投棄した場合、落下後数秒でほぼ定常運動となり、落下速度は次式で表わすことができる<sup>2)</sup>。

$$W = \sqrt{\frac{M-m}{0.5 \rho A C_D} g}$$

ただし  $W$  : 最終速度

$M$  : コンクリート容器 (放射性廃棄物を含む) 全質量

$m$  : コンクリート容器と同体積の水の質量

$\rho$  : 水の密度

$A$  : コンクリート容器の落下方向の投影面積

$C_D$  : 抵抗係数

$g$  : 重力加速度

抵抗係数  $C_D$  はレイノルズ数の関数であり、また容器の形状と海洋中を落下する時の姿勢で変化する。ここで、円筒形 I 型容器 ( $l/a=2.0$ ,  $d$  : 直径,  $l$  : 高さ) の軸が落下方向に平行なときと垂直なときの抵抗係数を、それぞれ 0.8 と 0.7, その他の容器についてその軸が落下方向に平行および垂直なときの抵抗係数を、それぞれ 0.6 と 0.4 とし、水深 2,000m における落下速度を求めると、表一 4 に示した値となる。同表に示した最終速度は、 $C_D$  の推定値をもとにして求めたもので、必ずしも正確でないが、大体 3 ~ 8 m/sec の範囲と考えるとよいだろう。この最終速度は、内容積に放射性廃棄物 (比重を 2.0 と仮定した) を 100% 充填したと考えると求めたものである。

容器が海底と衝突したときに生ずる衝撃荷重と同等の衝撃荷重を、陸上における落下試験で再現するための落下高さを求めると、以下の通りである。今、海底における衝突と陸上における衝突の状況を同一であると仮定すると

$$W(M-m) = v'M'$$

ただし  $M'$  : 放射性廃棄物を含まないコンクリート容器の質量

$v'$  : 陸上で  $h'$  の高さより落下させたときの衝突時の落下速度

$$= \sqrt{2gh'}$$

上式より、陸上において放射性廃棄物を充填していない容器を用いて落下試験を行なうとその、所

要落下高さ  $h'$  は

$$h' = \frac{W^2}{2g} \left( \frac{M-m}{M'} \right)^2$$

で表わせる。

それぞれの容器についての計算結果を表一 5 に示す。これより、本実験に用いた密閉式の容器の場合には、高さ 1m の落下試験でその耐衝撃性を評価してもかなり安全側にあると判断してよいであろう。

吊具やロープの破損などの不測の落下による衝撃に対しては、落下試験装置の能力を考慮して、最大落下高さを 3m とし、耐衝撃性を検討した。ただし、供試模型容器の数の点で、弁式および粘性層式の容器については、落下高さが 2.8m の場合についてのみ落下試験を実施した。質量  $M'$  の中空の容器を高さ  $h_0$  から落下させたときの衝撃力と全く等しい衝撃力を、放射性廃棄物を含んだ容器 (質量  $M$ ) の落下によって得るための落下高さ  $h'$  (以下では、対応落下高さという) は次式で与えられる。

$$h' = \left( \frac{M'}{M} \right)^2 h_0$$

$h_0$  を 2m および 3m としたときの対応落下高さ  $h'$  を、表一 5 に示した。これによると、本実験における落下試験による耐衝撃性の評価は、放射

表一 4 容器の海中落下の最終速度

容器型式	落下時の姿勢	最終速度 W (m/sec)
球 形	垂 直	4.0
	水 平	4.8
卵 形	垂 直	3.1
	水 平	3.4
円筒形 I 型	垂 直	3.6
	水 平	2.4
円筒形 II 型	垂 直	5.3
	水 平	5.7
弁 式	水 平	5.4
粘 性 層 式	水 平	5.4

注) 最終速度は、容器内に放射性廃棄物が充填されたとして計算した。

表一五 落下高さ  $h'$  および対応落下高さ  $h''$

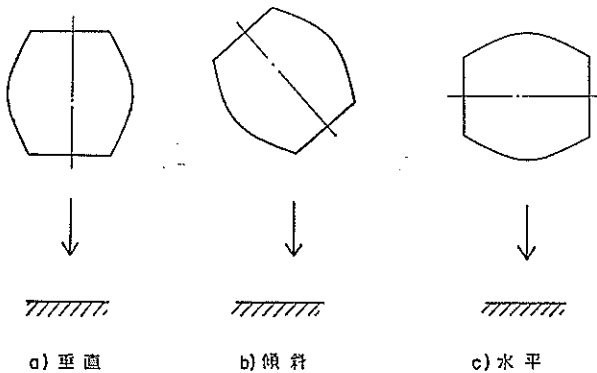
容器形式	落下時の姿勢	落下高さ <sup>①</sup> $h'$ (m)	対応落下高さ $h''$ <sup>②</sup> (m)	
			$h_0=2m$ のとき	$h_0=3m$ のとき
球形	垂直 直平	0.55 0.80	0.9	1.4
卵形	垂直 直平	0.22 0.26	1.4	2.1
円筒形 I 型	垂直 直平	0.28 0.13	1.9	2.9
円筒形 II 型	垂直 直平	0.50 0.59	1.9	2.4
弁式	水平	0.98	0.9	1.4
粘性層式	水平	0.90	1.0	1.5

注 ①海底との衝突によって生ずる衝撃荷重と同等の衝撃荷重を生ずるに必要な陸上での落下高さ

②容器内容積を放射性廃棄物で充填したときの、 $h_0=2, 3m$  の落下高さによって生ずる衝撃荷重と同等の衝撃荷重を生ずるような陸上での落下高さ

性廃棄物を充填した容器を、本実験の落下高さの約  $1/2$  の高さから落下したときの耐衝撃性の評価に相当することがわかる。

上述の観点から、本落下試験では、落下高さを 1, 2 および 3 m (ただし内外圧平衡式の弁式および粘性層式は 2.8 m) とし、また落下時の容器の姿勢を図一 9 に示したように、容器軸がそれぞれ、垂直、傾斜および水平となるように変えて試験した。また、1 回の落下のみでは、残留ひずみやひびわれのほとんど生じなかった容器については、



図一 9 落下時の姿勢

落下条件とひずみの測定点を変えて試験を繰り返し、ひびわれの状況、容器の破壊時の状況等を観察した。これらの落下条件の組み合わせを表一 6 に、また、落下試験の状況の一例を図 10 に示す。落下試験においては、先に述べた方法で衝撃ひず

表一 6 落下条件の組み合わせ

容器形式	容器番号	落下条件		
		回数	高さ(m)	姿勢
球形	S - 1	1	3	垂直
		4	1	水平
	S - 2	1	3	水平
球形	S - 3	1	3	傾斜
		2	3	傾斜
		3	3	傾斜
卵形	E - 1	1	3	垂直
		2	1	垂直
卵形	E - 2	1	3	傾斜
		2	1	水平
		3	1	水平
円筒形 I 型	C - I - 1	1	1	垂直
		3	3	水平
	C - I - 2	1	2	垂直
		2	2	垂直
	C - I - 3	1	1	水平
		2	3	垂直
C - I - 4	1	2	水平	
	2	2	水平	
円筒形 II 型	C - II	1	1	垂直
		2	1	垂直
		3	1	水平
		4	1	水平
		5	3	垂直
		6	3	水平
		7	3	傾斜
弁式	V - I	1	2.8	水平
粘性層式	V - II	1	2.8	水平

注) S-1の落下 2回および3回

C-I-1の落下2回

は落下条件不備のため、データとして用いていない。

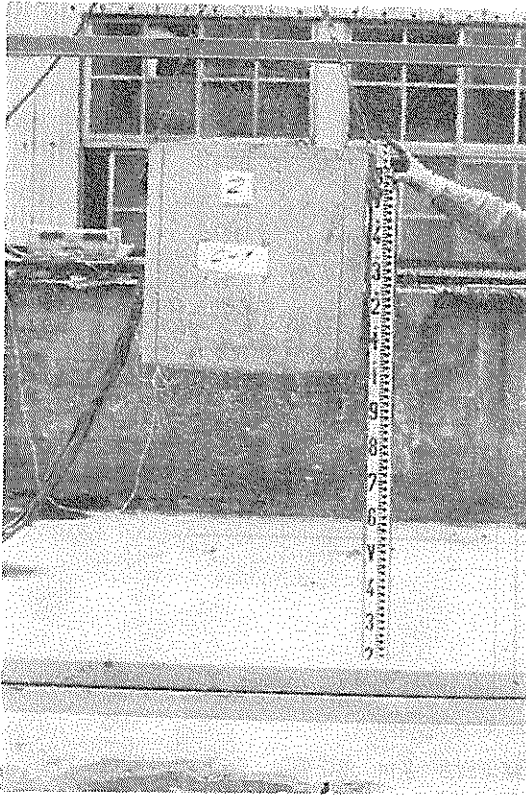


図-10 容器の位置決定 落下姿勢 垂直,  
落下高さ: 1m(C-II)

みを測定すると共に、衝撃によって生じたひびわれおよび破損の状況を観察し、更に、接眼鏡（最小目盛  $1/10$  mm）を用いて、ひびわれを測定した。また、落下試験と並行して、容器と同時に製作した供試体を用いて強度試験を行ない、容器の落下試験の時点におけるコンクリートの圧縮強度と静弾性係数を求めた。

### 5. 衝撃波の特性

コンクリート容器の落下衝撃時の応答現象は、たとえば、図-11~13に示したように、ひずみが最大値に達する時間が  $1/1000 \sim 3/1000$  sec 程度の鋭い波形を示す高速現象であり、落下と共にほぼ同一の時点で、全測定点のひずみが記録された。図-14, 15 は、各容器の測定記録を例示したものである。

落下開始前における容器の姿勢は、前述の如く、垂直、傾斜、水平（容器軸が被衝撃体である床版の面に対してなす角度による）の三通りとしたが、容器の接地の瞬間における姿勢は、図-16~18に示したように、必ずしも同一でない。特に、容器の姿勢を垂直ないし水平にして落下した場合には、

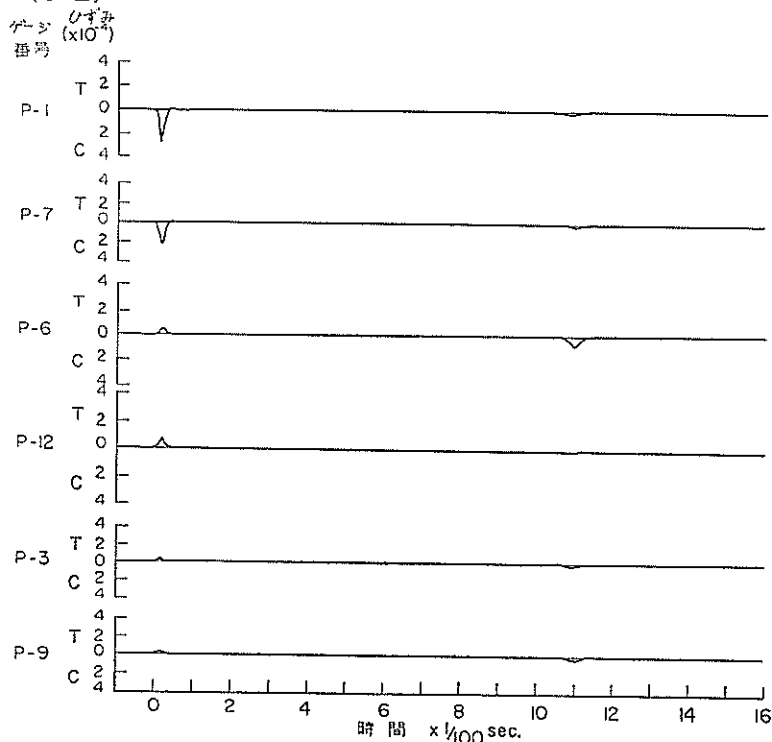


図-11 衝撃波形の1例 (1)卵形 (E-1) 落下高さ: 1 m 落下姿勢: 垂直 落下回数: 2回



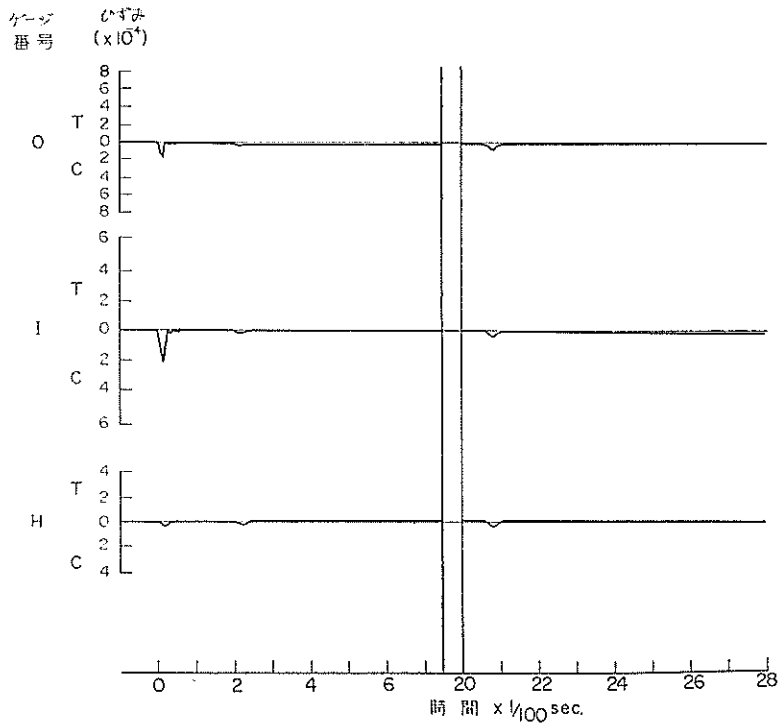
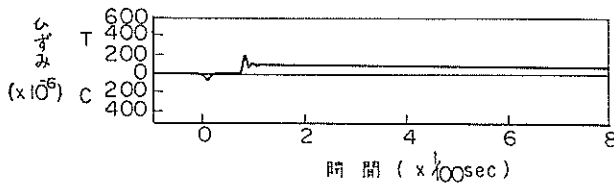
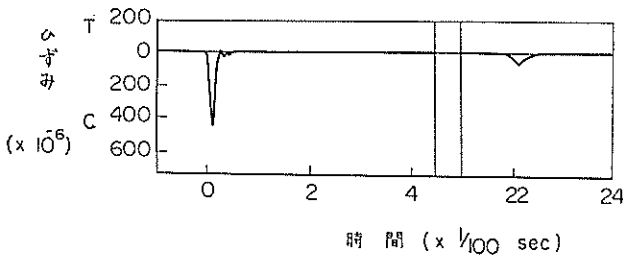


図-12 衝撃波形の1例 (2)円筒形I型(C-I-2) 落下高さ: 2 m 落下姿勢: 垂直 落下回数: 1回



(a) 2段階の落下をした場合  
(C-I-4, 落下姿勢: 水平)



(b) 再落下による波形  
(C-I-3, 落下姿勢: 垂直)

図-13 衝撃波形の1例(3)

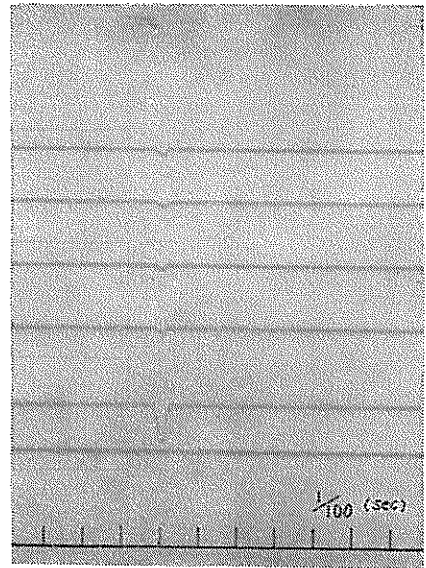


図-14 E-2  
(落下高さ: 1m 落下姿勢: 水平)

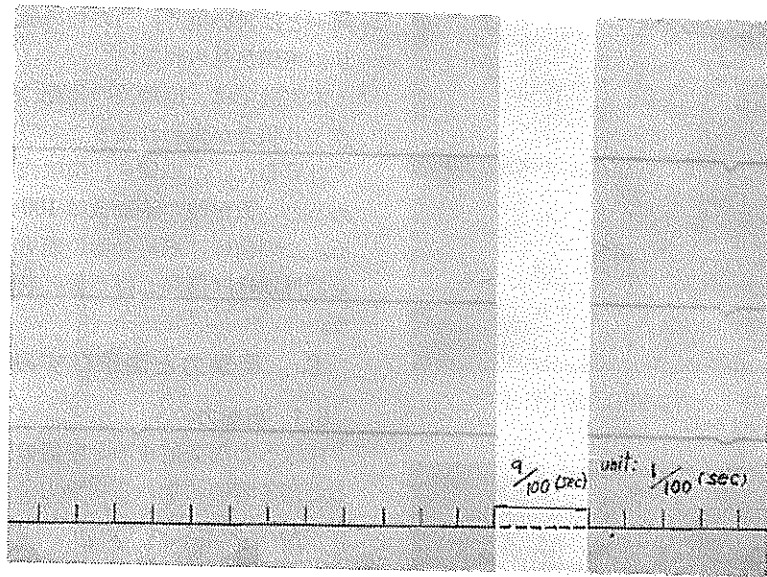


図-15 C-I-3 (落下高さ: 3m 落下姿勢: 垂直)

図-19~21に示したように、多少傾いて接地する  
 場合が多かった。たとえば 図-13 (a) に示し  
 た衝撃波形の例では、落下直後  $1/100 \sim 2/100$  sec 以  
 内で第2段階の波形が表われているが、これは、  
 接地時の容器の姿勢に起因すると考えられる。す  
 なわち、容器の一端が接地した瞬間は、他端はまだ  
 5~10cm の空中にあって、これが続いて接地  
 して第2段階の波形として現われた衝撃を起こし  
 たものと推定される。図-19がこのような場合を  
 示している。図-13 (b) のように、第1段階の  
 衝撃波に続いて、 $20/100 \sim 30/100$  sec 経過した後  
 に表われるゆるやかな波形は、容器がはね上って、  
 再び落下して生じたものと考えられる。たとえば、  
 この場合、再落下までに  $22/100$  sec を要してお

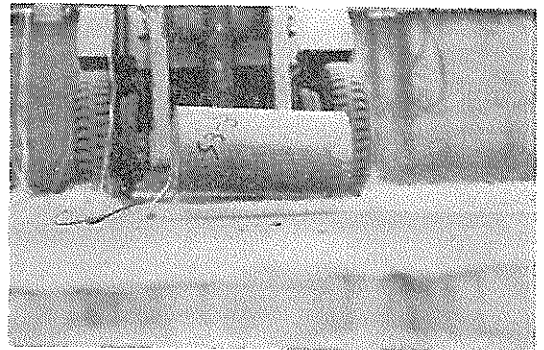


図-17 容器の落下状況(2) 落下姿勢: 水平 (C-I-5)

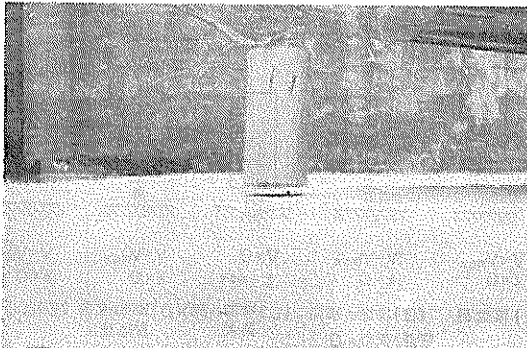


図-16 容器の落下状況(1) 落下姿勢: 垂直 (C-I-1)

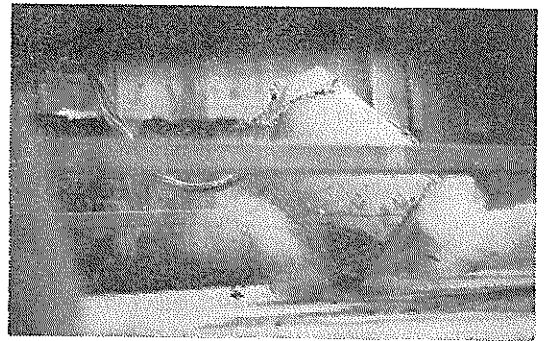


図-18 容器の落下状況(3) 落下姿勢: 傾斜 (C-II)

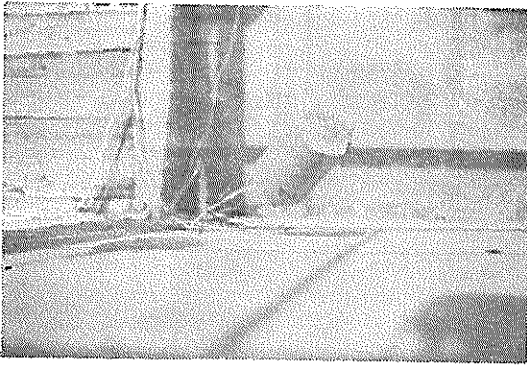


図-19 傾いて落下した容器例(1) 落下姿勢：水平(C-I-1)

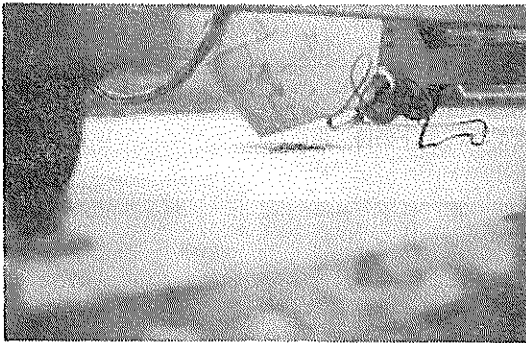


図-20 傾いて落下した容器例(2) 落下姿勢：垂直(S-3)

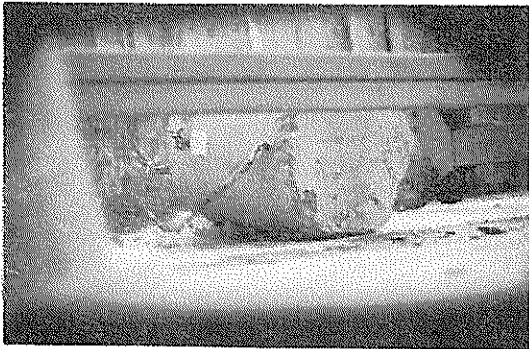


図-21 傾いて落下した容器例(3) 落下姿勢：水平(C-II)

り、これよりはね上がった高さは約10cmと推定される。このように落下開始前の条件を同一に保つても、接地時の姿勢変化や床版の破損などにより、落下時の運動エネルギーの吸収される程度も異なり、必ずしも同一の波形が生ずるとは限らない。図-13(a)では、 $100 \times 10^{-6}$ 程度の引張ひずみが残留しているが、内部に微少ひびわれが生じたと考えられる。

以上に述べたように、容器の落下条件は完全に

同一とはいえず、このため発生ひずみにもかなりの差異が見られる。

本実験では、衝撃波の周期は接地時の波形の始点より頂点が表われるまでの時間を、 $1/4$ 週期として計算した。この値を、衝撃波の測定記録より求めると、衝撃波の振動数は100~300%程度である。この値は、測定計器の能力範囲内にあり、測定記録はほぼ信頼し得る値と判断してよいであろう。

## 6. 衝撃力と衝撃ひずみ

### 6.1 衝撃力

床版への衝突前後の、容器の質量変化を無視すると落下容器に加わる衝撃力は、

$$M'(v' - v) = \int_0^t F dt$$

ただし  $M'$  : 容器の質量

$v, v'$  : 容器の衝突前後の速度

$F$  : 衝撃力

衝撃力が一定の場合には、速度変化の時間を  $\Delta t$  とすると、

$$F = \frac{M'(v' - v)}{\Delta t}$$

容器の設計においては、海底岩盤との衝突を想定し、 $\Delta t = 5 \times 1/1000$  sec.  $v' = 0$  として容器に加わる衝撃力を上式より求め、衝撃応力を計算しているが<sup>2)</sup>、これによると衝撃応力は、静水圧によって生ずる応力に較べて無視し得る程度に小さい。

衝撃波の測定記録によると衝撃ひずみは、 $1/1000 \sim 3/1000$  sec 程度で最大となる。鉄筋コンクリート容器を、仮に、バネを持つ剛体とおき変えて衝突前後の変形状態と速度変化を考えると、図-22のような過程により変化すると考えてよいであろう。

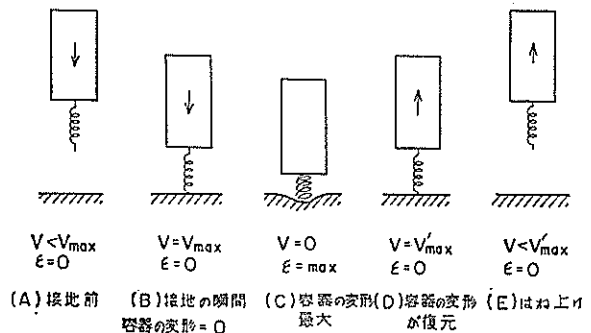


図-22 落下時における容器の変形

この状態を、動ひずみの測定記録と対照すると、図-22の(A), (B), (C), (D) および(E) は、図-23の(A), (B), (C), (D), および(E) に相

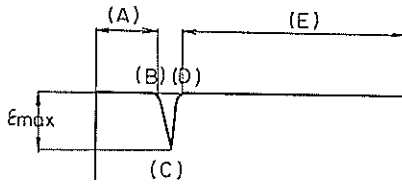


図-23 衝撃波形

当するものと思われる。波形が最大値に達する時間は、実際には、容器と床版の変形状態により変化するが、容器や床版が一定であれば、近似的にはほぼ一定と見なすことができ、本実験では、21回の落下試験の平均値からこれを求めると、 $1.1 \times 1/1000$  sec である。

衝撃力が時間の一次関数であると考え、図-23の(B)→(C)に至る時間を  $\Delta t_1$  とし最大衝撃力を求めると、

$$F_{1max} = \frac{2M'v}{\Delta t_1} \quad (6.1)$$

前述したように、 $\Delta t_1 = 1 \times 1/1000$  sec と考え衝撃力を計算すると、それぞれの容器について表-7の第1例に示す結果が得られる。落下した容器が床

表-7 陸上の落下試験における推定の最大衝撃力

容器形式	落下高さ (m)	最大衝撃力 (ton)	
		$F_{1max}$ ①	$F_{2max}$ ②
球形	1	154	110
	3	270	160
卵形	1	110	80
	3	190	110
円筒形 I型	1	24	17
	2	34	22
	3	41	25
円筒形 II型	1	370	260
	2	520	340
	3	640	380
弁式	2.8	660	470
粘性層式	2.8	700	490

注) ① 図-23の(B)→(C)において

$$F_{1max} = \frac{2M'v}{\Delta t_1}$$

$\Delta t_1 = 1 \times 1/1000$  (sec)として推定した最大衝撃力

② 図-23の(B)→(D)において

$$F_{2max} = \frac{M'v(1+e)}{\Delta t_1}$$

$\Delta t_1 = 1 \times 1/1000$  (sec),  $e$ : 反撥係数 0.2~0.4として推定した最大衝撃力

版と衝突後はね上つて再び落下するまでの時間の記録から、反撥係数を求めることができる。図-24はその推定値を示したものである。本実験では、

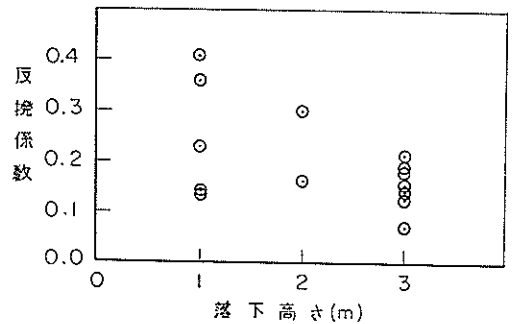


図-24 落下高さと反撥係数

容器の形状、寸法が一定ではなく、更に、落下姿勢や床版の変形の状態も同一とは限らないため、推定値は相当にバラついている。図-23の(B)→(C)と(C)→(D)の時間を仮に等しいとおいて、容器の速度が $v$ から $v'$ に変化する時間を $\Delta t = 2 \times 1/1000$  sec とすると、最大衝撃力  $F_{2max}$  は

$$F_{2max} = \frac{2M'v(1+e)}{\Delta t} = \frac{M'v(1+e)}{\Delta t_1} \quad (6.2)$$

衝撃力は、 $M'$ ,  $v$  と  $e$  によって決まり、大きな値の反撥係数を用いることは、衝撃力計算を安全側に導く。そこで、推定値の中の最大値を採用して、落下高さが1, 2 および3 mのときの反撥係数をそれぞれ、0.4, 0.3, 0.2として、式(6.2)により衝撃力を求めると、表-7の第2例に示した値となる。これによると、球形、卵形、円筒形I型、円筒形II型、弁式および粘性層式の容器に働いた衝撃力は、それぞれ 110~160t, 80~110t, 17~25t, 260~380t, 470t および490t程度と考えられる。

中央大学で実施した、中空の鉄筋コンクリート模型容器(外径 25.4cm, 内径 16.5cm, 高さ 40

cm の円筒形、 $\phi 2.6\text{mm}$  の鉄筋で補強した内容積比24%の密閉式容器)を用いた、静的な圧縮強度試験<sup>9)</sup>によると、軸方向に載荷した場合の破壊荷重は、65~95t、直径方向に載荷した場合の破壊荷重は、20~25t が得られている。これとほぼ同一形状、寸法の円筒形 I 型容器を用いた落下試験では、推定衝撃力は、17~25 t であり、この範囲

では著るしい破壊を生ずるに至っていない。従って、上述の計算法は、衝撃力について確からしい値を推定する方法の一つと思われる。

## 6.2 衝撃によって生じたひずみ

落下衝撃時における、鉄筋およびコンクリートのひずみの測定結果は、表一8~12に示した通りである。表一13, 14は、落下試験と平行して行な

表一8 密閉式円筒形 I 型 ひずみおよび応力

実験 内容	容 器 番 号	落 下 条 件			材 令 (日)	ゲ ー ジ 番 号	落 下 時					
		高さ (m)	姿勢	落下 回数			ひずみ $\times 10^{-6}$		鉄筋応力( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )		コンクリート応力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	
							引 張	圧 縮	引 張	圧 縮	引 張	圧 縮
(a) 落 下 姿 勢	C-I-3	3	垂直	2	162	O	0	170	0	360	0	50
						I	0	425	0	890	0	120
						H	0	60	0	130	0	20
	C-I-1	3	水平	2	162	O	0	145	0	305	0	40
						I	0	205	0	425	0	60
						H	0	45	0	100	0	10
(b) 落 下 高 さ	C-I-1	1	垂	1	162	O	145	125	300	260	40	35
						I	105	285	220	605	30	85
						H	190	190	400	395	55	55
	C-I-2	2	直	1	162	O	0	145	0	300	0	40
						I	0	215	0	450	0	60
						H	0	40	0	85	0	10
	C-I-3	3	直	2	162	O	0	170	0	360	0	50
						I	0	425	0	890	0	120
						H	0	60	0	130	0	20
	C-I-3	3	水	1	162	O	0	130	0	270	0	40
						I	0	100	0	210	0	25
						H	0	60	0	125	0	20
	C-I-2	2	水	2	162	O	810	110	1700	235	235	30
						I	230	85	480	180	65	25
						H	0	40	0	90	0	10
C-I-1	1	平	2	162	O	0	145	0	305	0	40	
					I	0	205	0	425	0	60	
					H	0	45	0	100	0	20	
C-I-5	1	水	1	147	O	155	0	330	0	40	0	
					I	0	105	0	215	0	25	
					H	0	75	0	155	0	20	
C-I-4	2	平	1	147	O	200	50	420	110	50	15	
					I	105	145	215	305	25	35	
					H	0	150	0	310	0	40	

表-9 密閉式容器（円筒形I型を除く）ひずみおよび応力  
 (a) 落下の姿勢を変えた場合

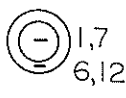
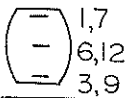
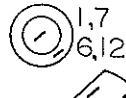
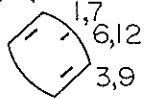



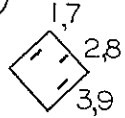


容器 型式	容器 番号	落下条件			材 令 (日)	ゲ ー ジ 番 号	落 下 時				ゲ ー ジ 位 置		
		高 さ (m)	姿 勢	落 下 回 数			ひずみ $\times 10^{-4}$		応 力 ( $kg/cm^2$ )				
							引 張	圧 縮	引 張	圧 縮			
卵          形	E-1	3	垂	1	49	1	0	90	0	25	 		
						7	0	75	0	20			
						6	135	75	35	20			
			12			45	20	10	5				
			直			3	0	65	0	20			
						9	110	65	30	20			
	E-2	傾		1	49	1	0	85	0	20		 	
			7			0	65	0	15				
			6			0	35	0	10				
		12	0			40	0	10					
		斜	3			0	50	0	10				
			9			0	20	0	5				
円          筒          形          II          型	C-II		3	垂	5	61	1	115	0	30	0		 
		7					195	0	50	0			
		2					205	0	55	0			
		8					190	0	50	0			
		3					95	0	25	0			
		9					80	0	20	0			
		直		傾	7	62	1	135	0	35	0	 	
							7	180	0	45	0		
							2	220	0	55	0		
				8			110	0	30	0			
				3			175	0	45	0			
				9			200	0	50	0			
斜	水	6	61	1	115	170	30	40	 				
				7	80	210	20	55					
				2	—	—	—	—					
	8			90	90	25	25						
	3			0	200	0	50						
	9			60	105	15	25						
平													

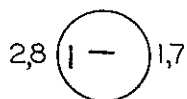
表-10 密閉式容器（円筒形 I 型を除く）ひずみおよび応力

(b) 容器による相違

容器 型式	容器 番号	落下条件			材令 (日)	ゲージ 番号	落 下 時				ゲージ位置
		高さ (m)	姿勢	落下 回数			ひずみ×10 <sup>-6</sup>		応力 (kg/cm <sup>2</sup> )		
							引張	圧縮	引張	圧縮	
卵 形	E-1	3	垂	1	49	1	0	90	0	25	
						7	0	75	0	20	
						6	135	75	35	20	
						12	45	20	10	5	
						3	0	65	0	20	
						9	110	65	30	20	
円筒形 II型	C-II	3	直	5	61	1	115	0	30	0	
						7	195	0	50	0	
						2	205	0	55	0	
						8	190	0	50	0	
						3	95	0	25	0	
						9	80	0	20	0	
球 形	S-3	3	傾	1	42	1	0	85	0	25	
						7	0	60	0	15	
						6	0	90	0	25	
						12	—	—	—	—	
						3	0	215	0	60	
						9	0	230	0	60	
卵 形	E-2	3	傾	1	46	1	0	85	0	20	
						7	0	65	0	15	
						6	0	35	0	10	
						12	0	40	0	10	
						3	0	50	0	10	
						9	0	20	0	5	
円筒形 II型	C-II	3	斜	7	62	1	135	0	35	0	
						7	180	0	45	0	
						2	220	0	55	0	
						8	110	0	30	0	
						3	175	0	45	0	
						9	200	0	50	0	

表—11 密閉式容器（円筒形I型を除く）ひずみおよび応力

(c) 落下高さを変えた場合

容器 型式	容器 番号	落下条件			材令 (日)	ゲージ 番号	落下時				ゲージ位置
		高さ (m)	姿勢	落下 回数			ひずみ×10 <sup>-4</sup>		応力 (kg/cm <sup>2</sup> )		
							引張	圧縮	引張	圧縮	
円 筒 形 II 型	C—II	1	垂	1	61	1	65	0	15	0	
						7	95	0	25	0	
						2	90	0	25	0	
						8	75	0	20	0	
						3	75	0	20	0	
						9	70	0	20	0	
		3	直	5	61	1	115	0	30	0	
						7	195	0	50	0	
						2	205	0	55	0	
						8	190	0	50	0	
						3	95	0	25	0	
						9	80	0	20	0	
	1	水	5	61	1	110	140	30	35		
					7	305	0	80	0		
					2	150	0	40	0		
					8	90	0	25	0		
					3	130	140	35	35		
					9	110	110	30	30		
3	平	6	61	1	115	170	30	45			
				7	80	210	20	55			
				2	—	—	—	—			
				8	90	90	25	25			
				3	0	200	0	50			
				9	60	105	15	25			



表—12 密閉式容器（円筒形I型を除く）ひずみおよび応力

(d) 測定箇所を変えた場合

容器 型式	容器 番号	落下条件			材令 (日)	ゲージ 番号	落 下 時				ゲージ位置
		高さ (m)	姿勢	落下 回数			ひずみ×10 <sup>-6</sup>		応力 (kg/cm <sup>2</sup> )		
							引張	圧縮	引張	圧縮	
卵          形	E-2	1	水	2	58	1	75	0	20	0	
						7	105	0	30	0	
						6	45	35	10	10	
						12	55	0	15	0	
						3	75	0	20	0	
						9	115	0	30	0	
		3	58	2	0	50	0	15			
				8	0	50	0	15			
				4	0	60	0	15			
				10	0	260	0	65			
				6	0	45	0	10			
				12	0	0	0	0			
円          筒          形          II          型	C-II	1	垂	1	61	1	65	0	15	0	
						7	95	0	25	0	
						2	90	0	25	0	
						8	75	0	20	0	
						3	75	0	20	0	
						9	70	0	20	0	
		2	61	2	190	0	50	0			
				8	150	0	40	0			
				5	75	0	20	0			
				11	40	0	10	0			
				6	55	0	15	0			
				12	60	0	15	30			
1	水	4	61	1	110	0	35	0			
				7	305	0	80	0			
				2	150	0	50	0			
				8	90	0	20	0			
				3	130	0	40	0			
				9	110	0	30	0			
	3	平	3	61	2	140	0	35		0	
					8	325	0	85		0	
					5	195	0	50		0	
					11	75	0	20		0	
					6	150	0	40		0	
					12	125	0	30		0	

った圧縮強度試験結果を示したものである。また、表—8～12に示した応力は、静弾性係数とひずみの測定値とを用いて求めた概略値である。

表—13 円筒形 I 型容器 圧縮強度および静弾性係数

材 令 (日)	圧 縮 強 度 ( $kg/cm^2$ )	静 弾 性 係 数 ( $\times 10^5 kg/cm^2$ )
3	220 *	—
7	257 **	—
28	425 **	—
162	482 ***	2.9

注) \* 供試体 2 ケの平均値

\*\* 供試体 3 ケの平均値

養生は恒温室 (21°C) での被覆養生

両面硫黄キャッピング

表—14 落下試験容器 (円筒形 I 型容器を除く)  
圧縮強度および静弾性係数

容器型式	容 器 号	材 令 (日)	圧縮強度 ( $kg/cm^2$ )	静弾性係数 ( $\times 10^5 kg/cm^2$ )
球 形	S—1	42	338	2.7
	S—2	41	391	2.5
	S—3	42	378	2.7
卵 形	E—1	49	356	2.8
	E—2	46	335	2.6
円筒形 II 型	C—II	61	429	2.6
弁 式	V—I	44	349	2.6
粘性層式	V—II	45	344	2.6

注) \* 供試体 3 ケの平均値

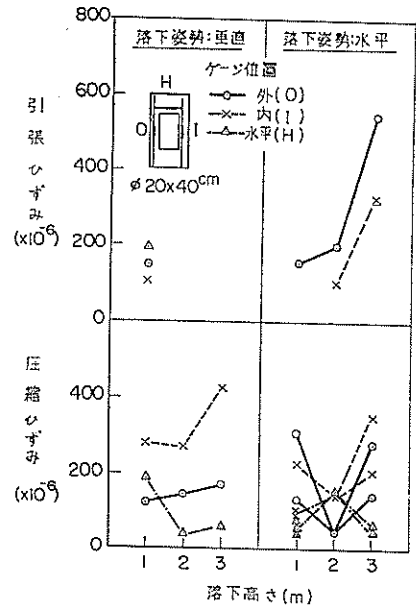
養生は屋内養生

両面硫黄キャッピング

### 6.2.1 円筒形 I 型容器の場合

円筒形 I 容器は予備実験用として製作したもので、2,000mの海洋投棄を考慮して設計した円筒形 II 型容器と比較して容積率も大きく肉厚も薄い、発生したひずみは一般に小さく、1回目の落下では表面にひびわれの発生は認められなかった。

図—25は、動ひずみの測定点と落下高さ、落下時の容器の姿勢、得られたひずみ等を例示したも



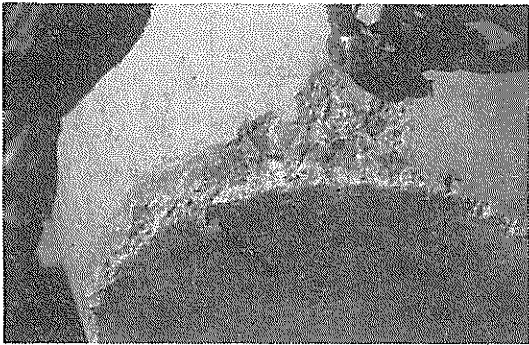
図—25 落下高さを変えた場合の衝撃によるひずみ  
ので、容器の姿勢を垂直にして落下した場合には、落下高さがかかなり大きい場合でも、発生する引張ひずみは小さいが、容器の姿勢を水平にして落下した場合には、容器の内壁に沿って、相当の引張ひずみが発生することが観察される。容器の落下高さを変えた場合、衝撃荷重はほぼ高さの平方根に比例して増大するが、たとえば、図—25に示したように、衝撃ひずみの実測値は落下高さに応じて増加するとは限らず、逆に減少している例すら認められる。これは、主として、落下容器の接地時における姿勢が必ずしも同一でなく、この結果、衝撃ひずみの分布に差異が生じたためと思われる。円筒形 I 型容器を用いた予備実験では、落下姿勢を垂直にした場合には、引張ひずみ  $190 \times 10^{-6}$  (引張応力 約  $60 kg/cm^2$ )、圧縮ひずみ  $420 \times 10^{-6}$  (圧縮応力 約  $120 kg/cm^2$ )、また落下姿勢が水平の場合には、引張ひずみ  $810 \times 10^{-6}$  (引張応力 約  $240 kg/cm^2$  相当) が、最大の衝撃ひずみとして記録された。

### 6.2.2 密閉式容器 (円筒形 I 型を除く) の場合

円筒形 I 型を除く、密閉式の容器および内外圧平衡式容器の落下試験における、ひびわれおよび破損の状況を、付図—1～10に示す。ただし、これらの図に示したひびわれや破損の状態は最初の落下によって発生したものと限らず、それぞれ

の図に示した試験条件と落下回数を繰り返した場合に観察した結果を示したものである点に留意する必要がある。表一六に示した試験条件の中で、付図一1～10に収録されていないものは、ひびわれが全く生じなかつた場合ないし、新たにひびわれが生じなかつた場合である。

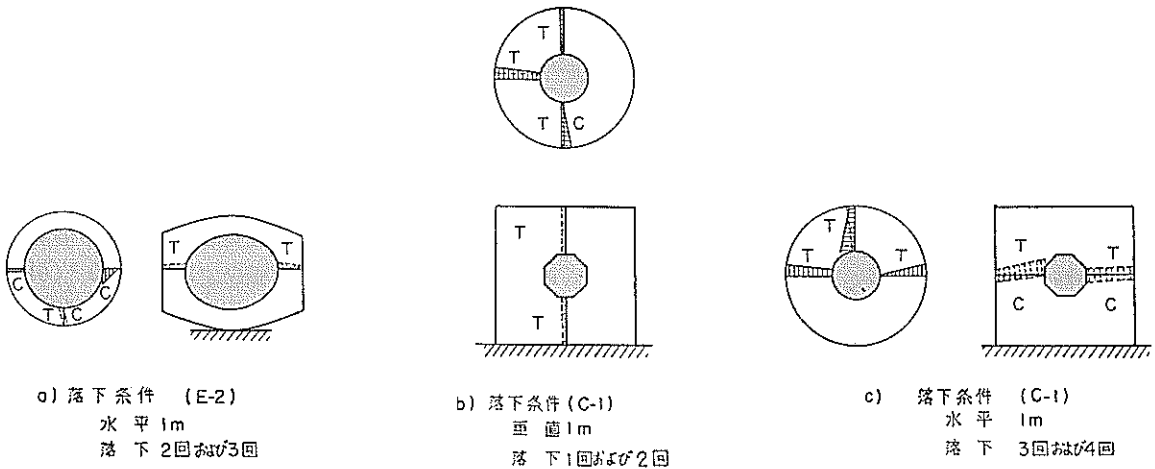
密閉式の容器では、落下時の姿勢が垂直および傾斜の場合には、付図一1～10に示したような縦ひびわれあるいは、図一26に示したような容器隅



図一26 容器のかどに生じた破損 (E-3)

角部の局部的破損が生ずるが、決定的な破壊を生じた例は皆無で、衝撃ひずみも小さい。表一12のひずみ実測値を基にしてひずみ分布を推定すると、図一27のようになり、衝撃によるひずみが、容器の上、下両端面において小さく、側壁部において大なる傾向がわかる。

落下時の姿勢を水平とする場合には、球形および卵形容器では側壁の突出した部分が最初に接地し、ここに集中的に衝撃荷重を受けるため、図一28のような放射状ひびわれが生ずる。このように、球形および卵形容器を水平に落下する場合には、図一29に示すように容器軸に垂直な断面では、円形断面がつぶれて楕円形断面となるような変形を生ずると共に、容器軸を含む断面では接地した突出部を支点として両端が曲げ下げられるような変形を生じ、この結果、容器の内外で圧縮ひずみと引張ひずみが鋭く対立して発生するものと思われる。特に容器内壁面に発生する引張ひずみが著るしく大きくなる。たとえば、卵形容器を3 mの高さから落下したときには、落下時の姿勢が垂直と傾斜



図一27 ひずみ分布図の1例

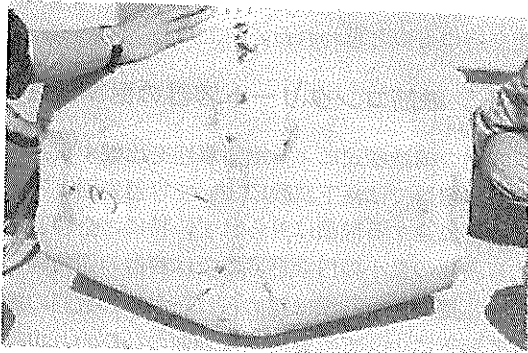


図-28 水平落下地点に生じた放射状ひびわれ (E-3)

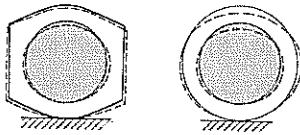


図-29 水平落下による容器の変形状況

の場合には、最大のひずみは前者では、引張ひずみ  $110 \times 10^{-6}$  (引張応力 約  $30 \text{ kg/cm}^2$ )、圧縮ひずみ  $90 \times 10^{-6}$  (圧縮応力 約  $25 \text{ kg/cm}^2$ )、後者で、圧縮ひずみ  $85 \times 10^{-6}$  (圧縮応力  $20 \text{ kg/cm}^2$ ) に過ぎない。しかし、落下時の姿勢が水平の場合には、引張ひずみが  $1000 \times 10^{-6}$  以上で明らかに弾性領域を越えたひずみあるいはひびわれが発生したと考えられ、容器の耐衝撃性に関しては落下姿勢が水平の場合が最も不利なことを示している。

### 6.2.3 内外圧平衡式 (弁式および粘性層式の場合)

6.2.2 で述べたように密閉式容器の落下試験を通じて、容器の耐衝撃性を試験するには落下姿勢を水平とした場合がもっともきびしい条件であることが判明したので、内外圧平衡式の容器、すな

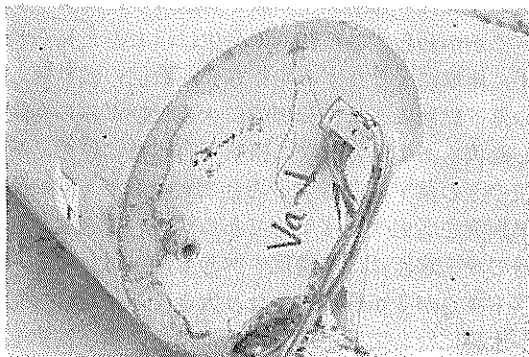


図-30 弁式 (V-I) 上端付近の破損

わち弁式および粘性層式については水平落下の場合のみを実施した。

これらの容器の落下後の状況は、図-30, 31に示した通りでいずれもただ1回の落下のみで付図-19, 20に示したようにならかなり大きなひびわれが無数に発生したばかりでなく、容器の端部が著しく破壊した。

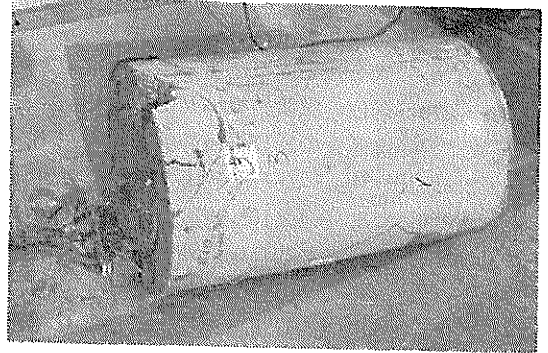


図-31 粘性層式 (V-II) ひびわれ破損状況

### 6.2.4 衝撃ひずみの計算法について

本実験に用いた密閉式の容器の設計では、主たる荷重として外水圧を考え、球形容器は厚肉球殻として、卵形容器は球殻の一部と扇形回転体とから成るものとして応力解析を行ない、また円筒形 II 型は厚肉円筒および閉合ラーメンとして解析しており、衝撃力に対してはいずれの場合も衝撃力を載荷方向に対して直角の断面積で除して衝撃応力を推定している。このような衝撃応力の推定は簡単であるが、結果の精度ないし安全性については何等の保証もなく、一方、理論的な動的解析も困難である。そこで、上述の如く衝撃力を容器両端面に作用する等分布荷重と考えて推定したひずみ (落下姿勢が垂直の場合の側壁部のひずみ) を、実測値と比較してこの簡便方法の適否を検討した。

表-15は、計算値と測定値を対比したものである。ただし、本実験では、円筒形 I 型容器以外の密閉式容器については容器軸方向のひずみは測定していないので、容器軸に直角な断面の接線方向のひずみの測定値から推定した。すなわち、変形が容器軸のまわりに対称であり、軸に沿って一様であるとすると、

$$\epsilon_z = -\frac{1}{E} \frac{F}{S} \quad (6.3)$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{mE} \frac{F}{S} \quad (6.4)$$

ここで  $\epsilon_z$  : 容器軸方向のひずみ

$\epsilon_t$  : 容器軸に直角な断面の接線方向のひずみ

$E$  : 弾性係数

$m$  : ポアソン定数

$F$  : 衝撃力, (6.2) 式より求める。

$S$  : 容器軸に直角な断面積

(6.3), (6.4)式を適用するに当って, 本実験とはほぼ同一条件の既往の試験結果<sup>3), 5)</sup>に基いて, 動弾性係数は静弾性係数の1.17倍(静弾性係数 2.6, 2.8,  $2.9 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  のそれぞれに対し, 動弾性係数は 3.0, 3.3,  $3.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ , またポアソン定数は動的な場合は静的な場合の20%増(静的な場合 5.5 に対し動的な場合 7.0)の値を用いた。表一15によると円筒形II型と卵形容器の場合のよ

表一15 ひずみの測定値および計算値

容器型式		落下高さ (m)	ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	
			計算値	測定値
円筒形 I型	C-I-1	1	-210	-205
	C-I-2	2	-270	-180
	C-I-3	3	-310	-300
円筒形 II型	C-II	1	+50	+80
		1	+50	+95
		3	+70	+200
卵形	E-1	1	+25	+90
		3	+45	+90

注) 落下姿勢: 垂直

+ : tens., - : comp.

うに, 軸方向荷重から接線方向ひずみを推定した計算値と測定値との間には相当の差が認められるが, 軸方向ひずみを直接に測定した円筒形I型容器の場合には, 計算値と測定値はかなり良く一致している。

先にも述べたように, 実際の落下条件は厳密には垂直落下は言い難い場合も多い点を考慮すると, 前述の如き簡便方法は本実験に用いたような理論的解析の困難な, 鉄筋コンクリート容器の衝撃応

力ないし衝撃ひずみを求める計算方法として実用性を持つものと思われる。

## 7. 鉄筋コンクリート容器の耐衝撃性

容器の構造様式による耐衝撃性を比較すると, 密閉式容器では落下試験によって容器表面より内部空間に達する破損は見られず, 特に, 全容器中, 内容積比の最小の円筒形容器では容器の隅角部における局部的な破損は認められたが, 10数回の繰返し落下によっても最終的な表面のひびわれ巾は, 最大で 0.4mm程度であり, 耐衝撃性は最も秀れている。

一方, 図一30, 31に示したように, 弁式および粘性層式の容器では, 1回落下させただけで最大 3.0mm に達するようなひびわれが縦横に入り, 特に容器端部付近の破損が著しい。また, 粘性層式では蓋のはずれる可能性もあり, これら内外圧平衡式の容器は運搬, 荷役などにおける不測の落下等の衝撃に対する耐衝撃性は十分でなく, 現在提案されている構造様式のままでは, 放射性廃棄物を確実にコンクリート容器内に保持することはむずかしいと思われる。従って, これら内外圧平衡式の容器を実用化するためには, 容器の構造を強化すると共に, 容器内壁を可撓性の大きい合成樹脂材等で内張りするなどして, 放射性廃棄物が外部に滲出しないような工夫をすることが必要であろう。

密閉式の球形および卵形容器については, 落下姿勢によって耐衝撃性はかなり異なるが, 海洋投棄の場合に海底岩盤との衝突に際して生ずる衝撃力に相当する衝撃力が生ずるように, 落下高さを定めて行なった空気中の落下試験では, 姿勢の如何にかかわらずひびわれの発生はほとんど見られず, 衝撃によるひずみも小さい。数回の繰返し落下試験によって局部的に大きなひずみの発生した例もあるが, 実際の投棄用容器では運搬, 荷役の際の落下を考慮する場合でも, ただ1回の落下衝突を考慮すれば十分であるから, この種の容器の耐衝撃性はほぼ満足すべきものと思われる。落下高さが 3 m程度とかなり大きく, また容器軸が水平になって落下する場合には, 肉眼で観察し得るひびわれがかなり発生し局部的にかなり大き

な応力も発生するが、容器の破損には至らない。従って、この種の容器については、前述したように撓性の大きい材料で内張りし不透層を設ける場合には、陸上における運搬、荷役等における耐衝撃性もほぼ完全なものになると考えてよいであろう。

## 8. 結 論

放射性廃棄物を海洋投棄するための鉄筋コンクリート容器の、海底岩盤との衝突に対する耐衝撃性、ならびに陸上の運搬、荷役における不測の落下等の衝撃に対する耐衝撃性を確かめるために、構造様式や形状の異なる数種の大型模型容器を用いて落下試験を実施した。落下試験の条件はかなり限定されたものであり、また、実際に起り得る条件とは相当に異なる点もあるが、本実験の範囲では次のことが言い得るものと思われる。

- 1 中空の鉄筋コンクリート容器を容器重量に比較してかなりマツシブなコンクリート床版上に落下させた場合、その衝撃によって容器には、 $1/1000 \sim 3/1000$  sec 程度で最大ひずみを生ずる応答波形が表われる。
- 2 実用化が提案されている密閉式の模型容器を深さ2,000mの海洋に投棄した時に、海底岩盤との衝突によって生ずる衝撃力とほぼ同一の衝撃力が発生するように、陸上で落下した時に発生する衝撃ひずみは比較的小さく、最大のひずみは引張で  $180 \times 10^{-6}$  (引張応力約  $50^{kg/cm^2}$ )、圧縮で  $180 \times 10^{-6}$  (圧縮応力約  $50^{kg/cm^2}$ ) 程度であり、これらの容器は海底との衝突に対してほぼ満足すべき耐撃性をもつと判断してよいであろう。
- 3 実験に用いた内外圧平衡式構造の弁式および粘性層式容器については、運搬、荷役における不測の落下を想定して行なった落下試験において、容器の内部に達する著しいひびわれが発生するばかりでなく、容器の上、下端部が相当程度破壊した。従って、これらの容器を実用化するためには耐衝撃性を増すための補強と共に、内容物の放射性廃棄物の飛散を防ぐために、たとえば撓性の大きい材料を用いて適当な内張りをするなどの工夫が必要で

ある。

- 4 容器の運搬、荷役における衝突や落下等の不測の事態として、1~2mの高さからの落下を考慮した場合、容器軸が水平となつて落下するときには密閉式構造の容器でも、これが球形ないし卵形容器では突き出した部分が接地点となってその内壁部にかなり大きな引張ひずみが発生する。このような場合でも、容器自体の破壊には相当の余裕があるが、容器表面には肉眼で認め得る程度のひびわれがかなり発生する。従って、この種の容器の耐衝撃性はほぼ満足すべきものと判断されるが、内容物の放射性廃棄物の滲出を完全に防止するために、たとえば、撓性の大きい材料を用いて適当な内張りを施して置くことが、運搬、荷役の安全性を確保する上で適切な処置と思われる。
- 5 本実験に用いた模型容器の設計において、衝撃応力は、衝撃力に相当する荷重が容器両端部に静的に等分布するものとした簡便法によって求めているが、衝撃ひずみの測定値は、この簡便法によるひずみの計算値と比較的よく一致し、本簡便法が理論的な解析の困難な鉄筋コンクリート容器の衝撃応力の計算方法として、実用性をもつことを示唆している。

## 参 考 文 献

- 1) 赤塚雄三, 森口拓, "ガラス破片を粗骨材としたプレパックド・コンクリートについて" 港湾技研資料, No.7, pp. 1~9, 1964.3
- 2) 土木学会, "放射性廃棄物の海洋投棄用容器に関する試験研究", pp.62 1965.7
- 3) 土木学会, "放射性廃棄物の海洋投棄用容器に関する試験研究", pp.68 1964.3
- 4) 竹田仁一, 立川博之, "高速圧縮荷重を受けるコンクリートの力学的諸性質", セメント, コンクリート, No.162, pp.10~16, 1960.8
- 5) Watstein, D., "Effect of Straining Rate on the Compressive Strength and Elastic Properties of Concrete", Proc. ACI, Vol. 49, pp. 729~744, 1953. 4

附図 ひびわれ および 破損状況

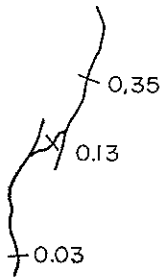
(凡例)



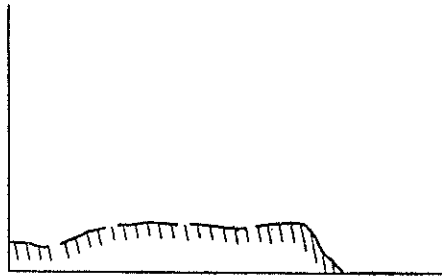
落 下 方 向



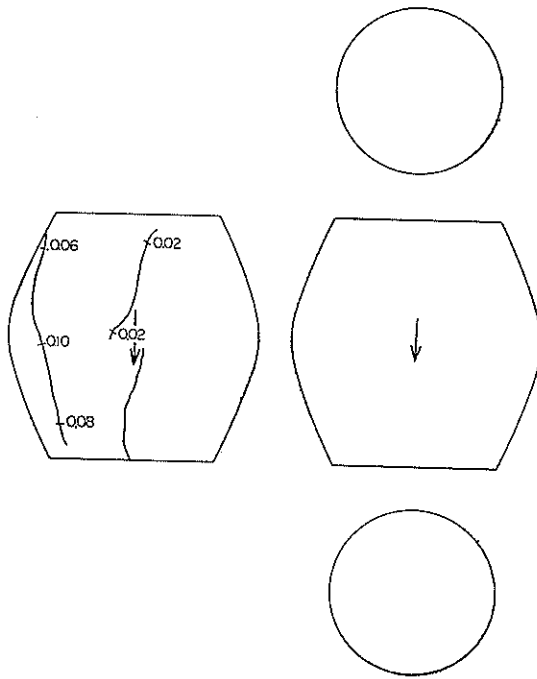
落 下 地 点



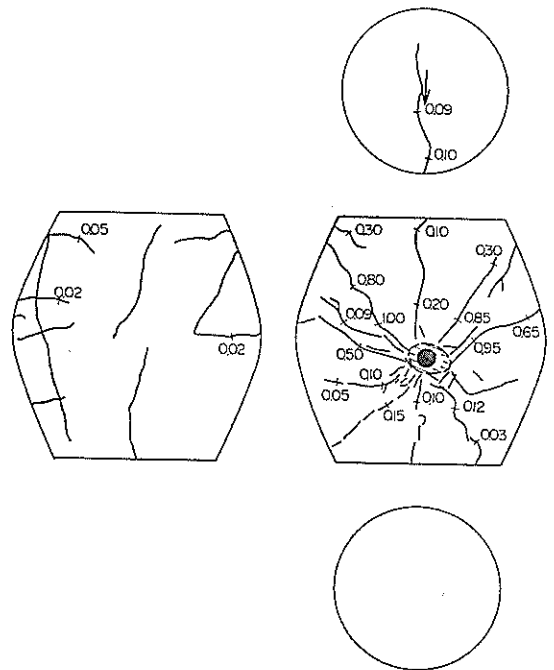
ひびわれ および  
ひびわれ 幅 (mm)



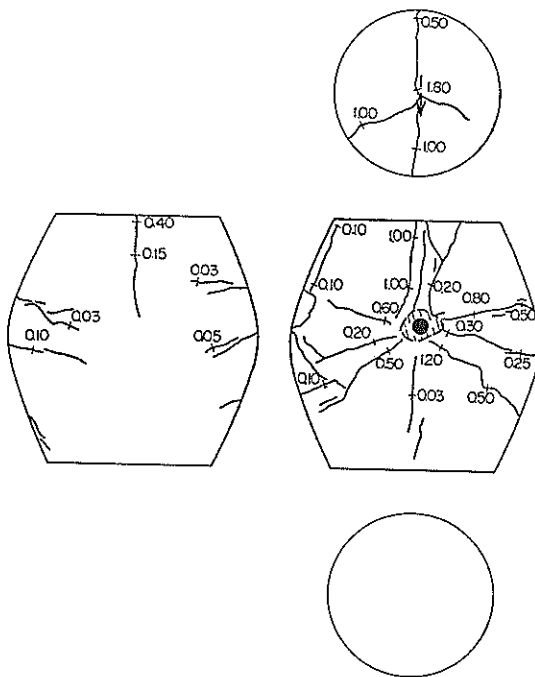
欠 損 箇 所



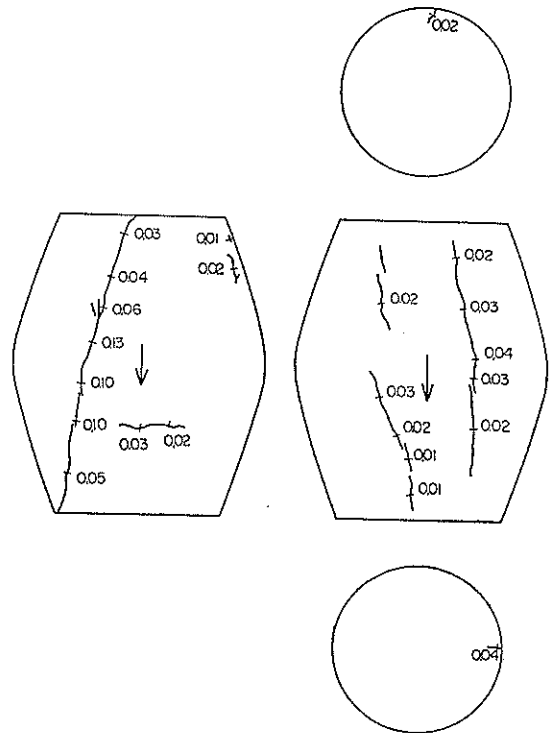
附図一 球形 S-1 落下回数：1回  
落下高さ：3m 落下姿勢：垂直



附図二 球形 S-1 落下回数：2回  
落下姿勢：水平 落下高さ：3m



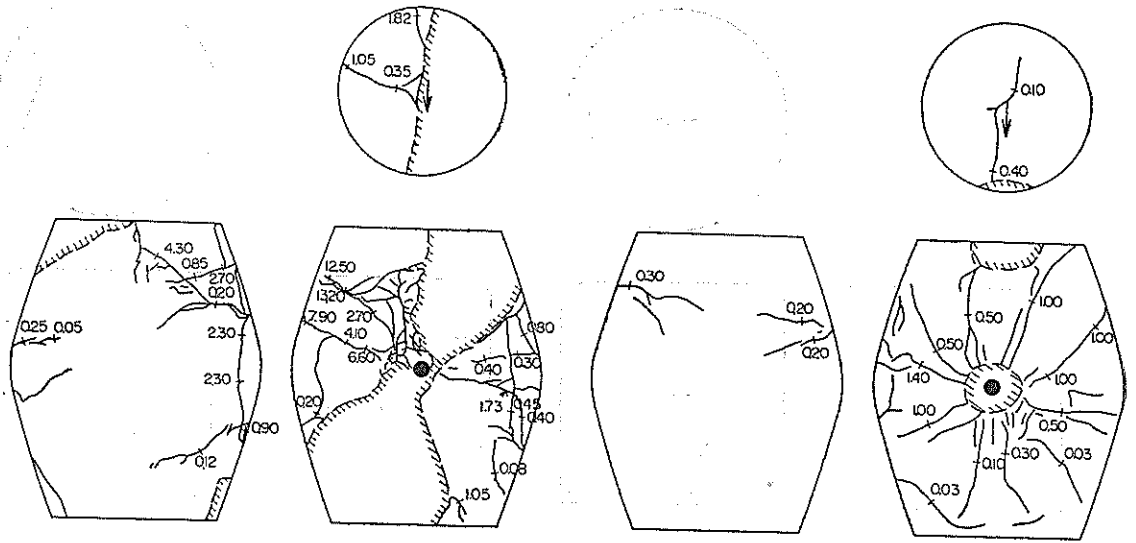
附図三 球形 S-2 落下回数：1回  
落下高さ：3m 落下姿勢：水平



附図四 卵形 E-1 落下回数：3回  
落下高さ：1m 落下姿勢：垂直

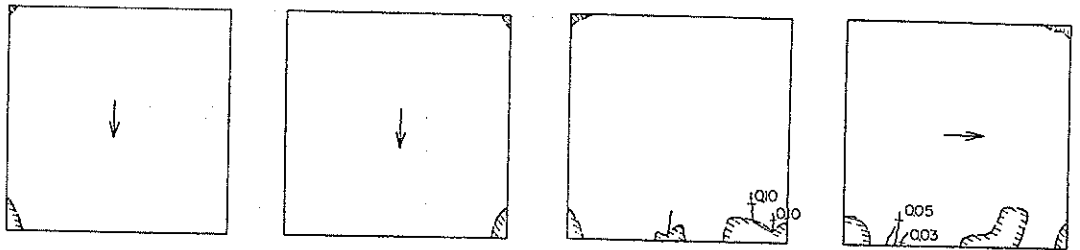
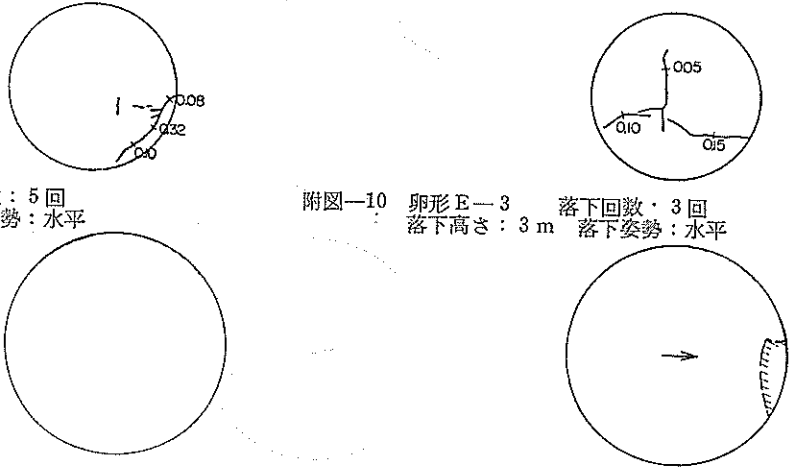






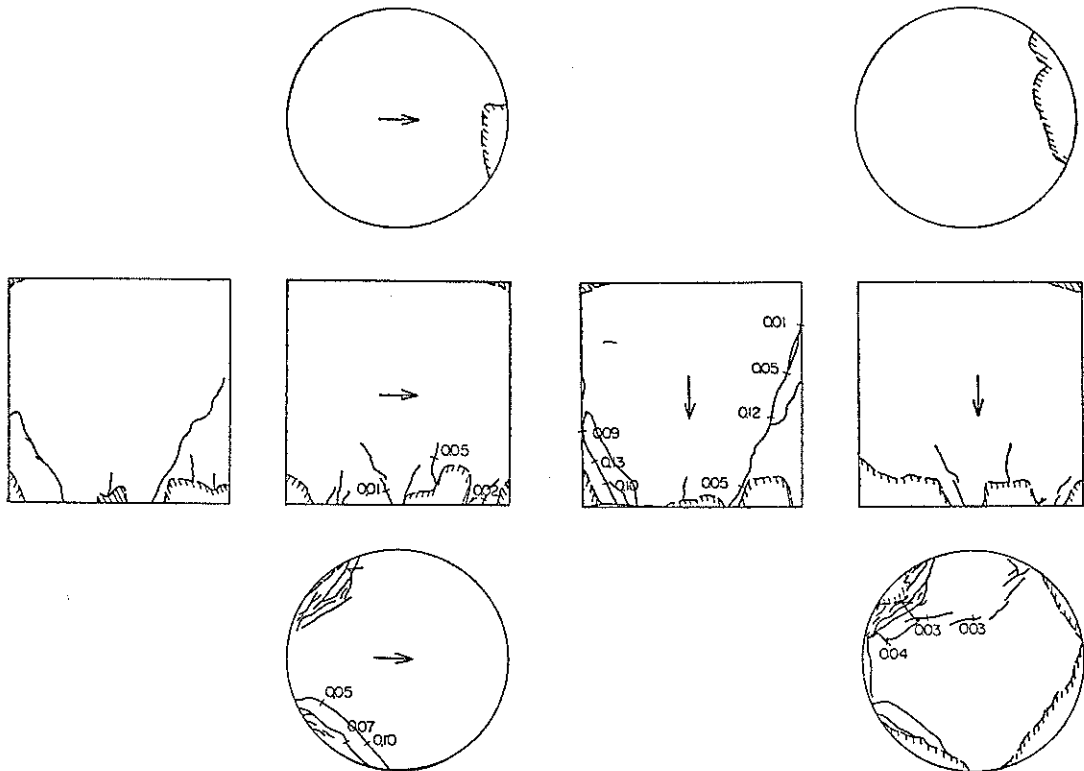
附圖—9 卵形E—2 落下回数：5回  
落下高さ：3m 落下姿勢：水平

附圖—10 卵形E—3 落下回数：3回  
落下高さ：3m 落下姿勢：水平



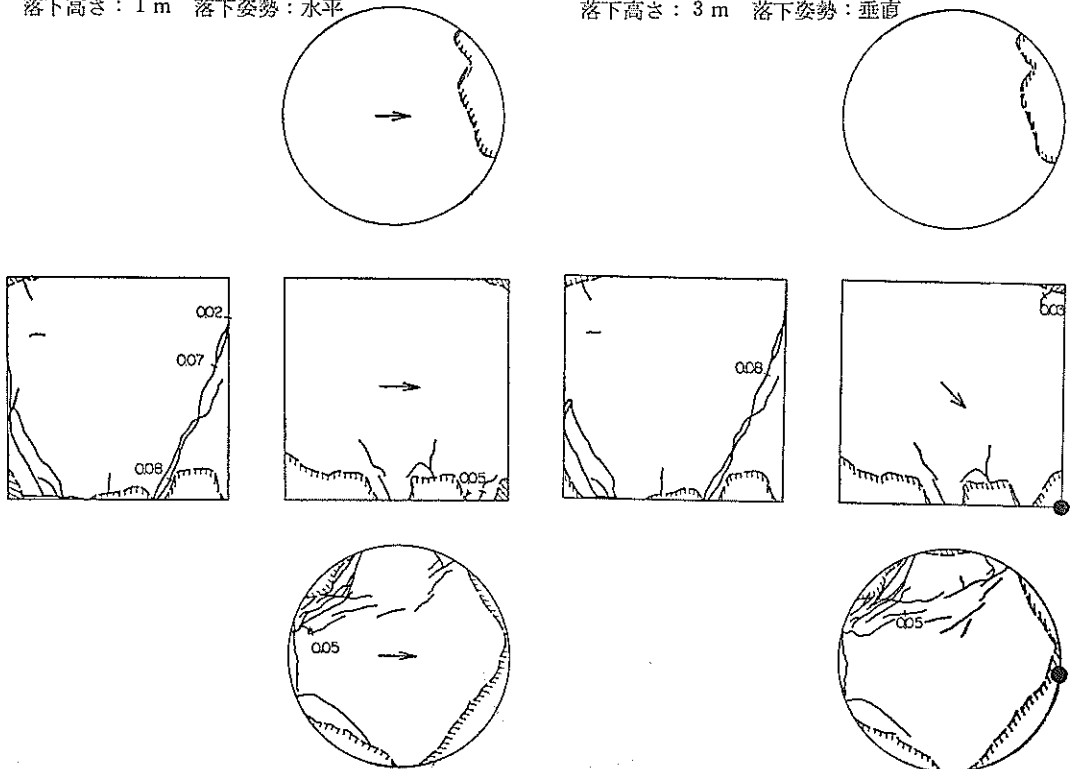
附圖—11 円筒形II型C—II 落下回数：2回  
落下高さ：1m 落下姿勢：垂直

附圖—12 円筒形II型C—II 落下回数：3回  
落下高さ：1m 落下姿勢：水平



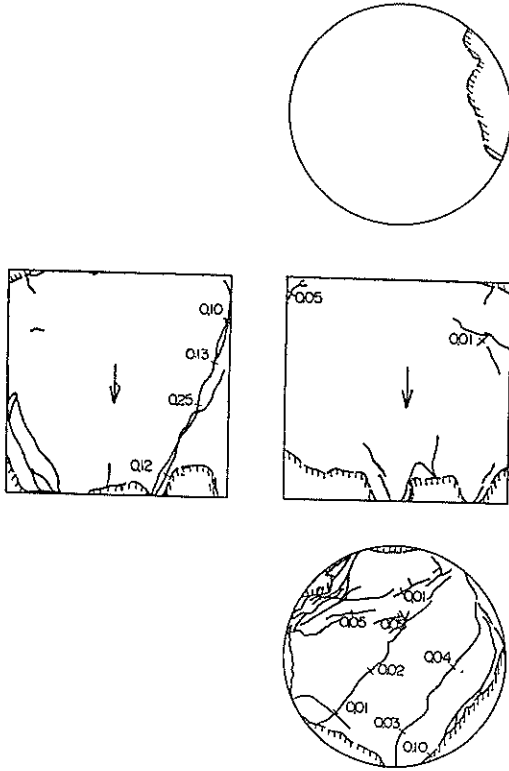
附圖—13 凹筒形Ⅱ型C—Ⅱ 落下回数：4回  
落下高さ：1m 落下姿勢：水平

附圖—14 凹筒形Ⅱ型C—Ⅱ 落下回数：5回  
落下高さ：3m 落下姿勢：垂直

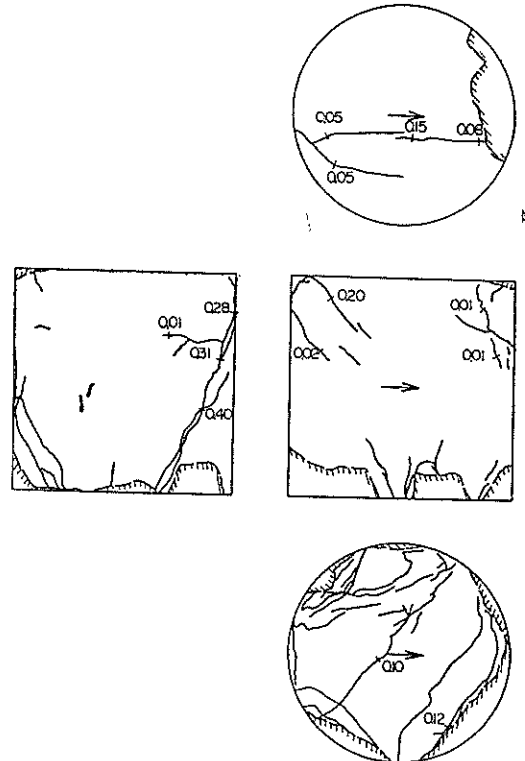


附圖—15 凹筒形Ⅱ型C—Ⅱ 落下回数：6回  
落下高さ：3m 落下姿勢：水平

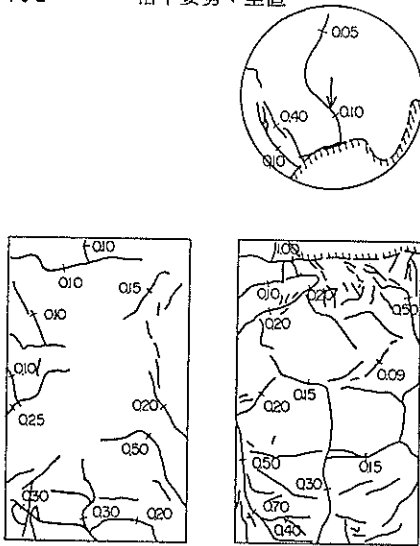
附圖—16 凹筒形Ⅱ型C—Ⅱ 落下回数：7回  
落下高さ：3m 落下姿勢：傾斜



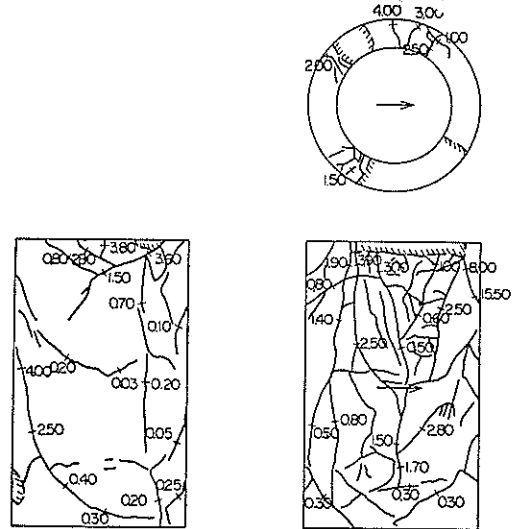
附圖—17 円筒形Ⅱ型C—Ⅱ 落下回数：8回  
落下高さ：2m 落下姿勢：垂直



附圖—18 円筒形Ⅱ型C—Ⅱ 落下回数：9回  
落下高さ：2m 落下姿勢：水平



附圖—19 弁式V—I 落下回数：1回  
落下高さ：2.8m 落下姿勢：水平



附圖—20 粘性層式V—Ⅱ 落下回数：1回  
落下高さ：2.8m 落下姿勢：水平

港 灣 技 研 資 料 No. 28

1967年4月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 株式会社 白 泉 社  
東京都港区西麻布1丁目4