

[93] 鉄筋コンクリートシェルモデルの振動破壊実験

正会員 ○遠藤孝夫 (電力中央研究所構造部)
 加藤治 (電力中央研究所構造部)
 正会員 田辺忠頭 (名古屋大学工学部)

1. まえがき

原子力発電所の大型化に伴い、コンクリート製格納容器が採用されつつある。この種重要構造物は、想定される大地震時においても、安全性が確保できるように設計することになっている。このため、これまで種々の実験・研究がなされてきたが、その多くは静的な正負交番載荷実験に基づくものであり、地震時の挙動・安全性を知るためには、動的な荷重による破壊実験を実施し、静的正負交番載荷実験との対応を明らかにすることが望ましい。また、解析上からは、破壊時までの復元力特性と減衰特性を明らかとすることが大切である。

このような見地から、本研究では、鉄筋コンクリート(RC)円筒シェルの振動台を用いた動的破壊実験(以下動的実験と呼ぶ)とアクチュエーターによる静的正負交番載荷実験(以下静的実験と呼ぶ)とを実施し、両実験結果を比較検討し、RC円筒シェルの耐震安全性検討上の基礎的資料を求めるとともに、復元力と歪の解析的検討も行った。

2. 実験の概要

試験体の形状・寸法は図-1に示す通りである。円筒部には、縦、横方向にφ2mmの鉄線を25mmピッチで配置しており、鉄線の断面に対する比率は約1.26%である。円筒部に用いた鉄線とモルタルの力学的性質は表-1に示す通りである。また、上下スラブは、粗骨材の最大寸法10mmで28日間養生時の圧縮強度 $\sigma_{28} = 300 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートとした。

静的実験では、試験体上スラブに鋼製の付加質量を取り付けて、図-2に示すような装置により、定められた変位履歴(図-3)に基づいて正負交番載荷を行い、試験体各部の変位、歪および荷重を測定した。

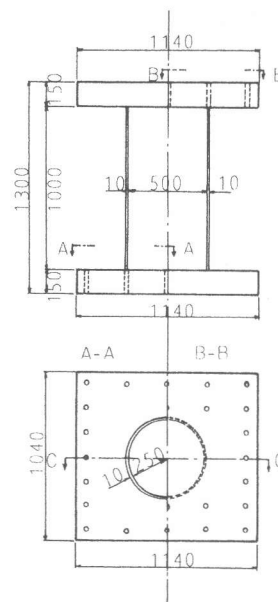


図-1 試験体の形状・寸法

表-1 使用材料の力学的性質

Mortar			Reinforcing Steel Bar		
E_c	σ_c	ν	E_s	σ_y	σ_m
(kg/cm^2)	(kg/cm^2)		(kg/cm^2)	(kg/cm^2)	(kg/cm^2)
2.42×10^5	334	0.21	1.9×10^6	6650	7580

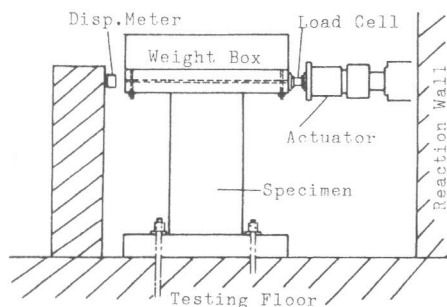


図-2 静的実験装置

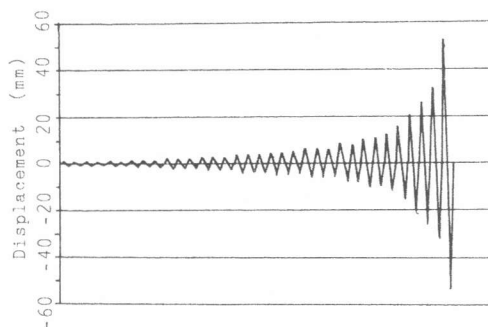


図-3 載荷履歴(静的実験)

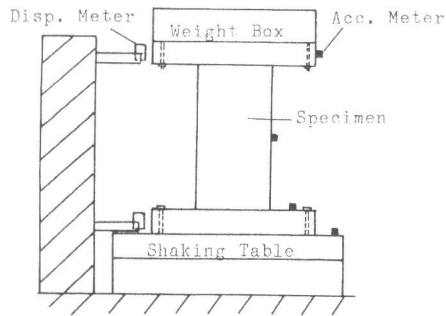


図-4 動の実験装置

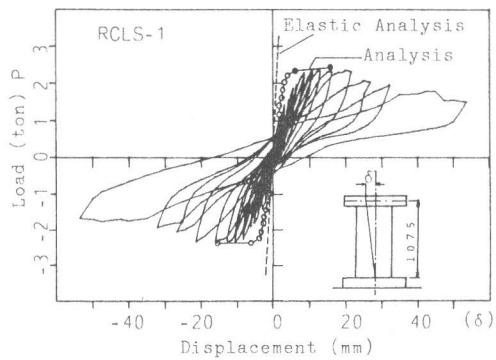
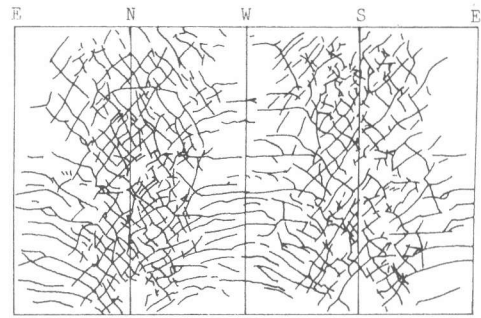
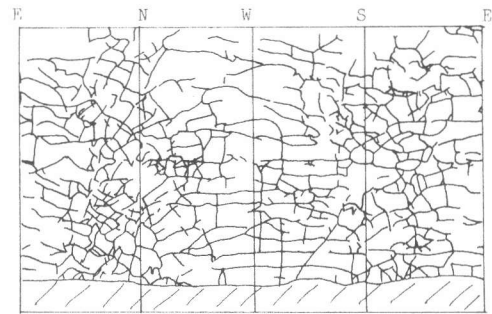


図-6 復元力特性(静的実験)



(a) 静的実験



(b) 動の実験

図-5 ひびわれパターン

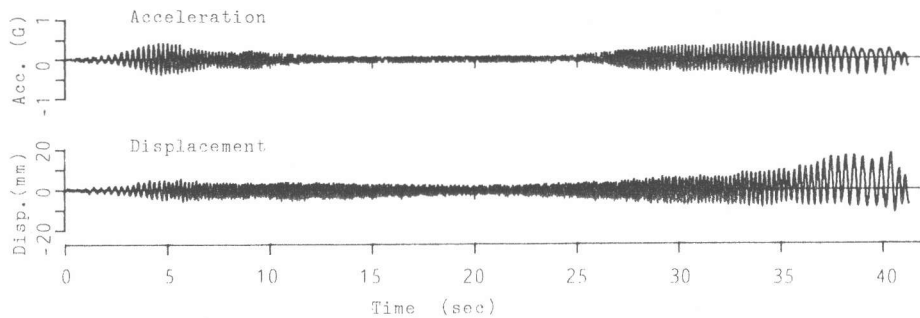


図-7 絶対加速度と相対変位の時刻歴(動の実験)

また、動の実験では、静的実験と同様に、試験体に付加質量を取り付けて、振動台上に固定し、試験体の固有振動数を含む正弦波を振動台の入力として加振させた(図-4)。この時、応答水平加速度、水平変位、歪等を測定した。なお、実験に供した試験体は、静的実験と動の実験で各々一体系である。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊性状

静的実験と動の実験での試験体の破壊時までの性状を比較すると、かなりの相違が認められた。すなわち、静的実験では、フランジ部での曲げ引張りによるひびわれとウェブ部の斜め引張りひびわれが広く分散して発生したが、動の実験では、同じ部分に同様のひびわれが生じたが、その本数は少なく、ひびわれ幅が広くなり、ひびわれ部に集中して損傷が生じて破壊に至った。このように、両者ではひびわれパターンが大きく異なった(図-5)。

このことは、静的な場合には、広い領域でエネルギーを吸収し、動的な場合は、少ない数本のひびわれ部でエネルギーを吸収しているものと考えられる。

3.2 復元力特性, 最大荷重, 最大変位について

静的実験より得られた復元力特性は図-6に示される。一方, 動的実験での上スラブの絶対加速度と相対変位の時刻歴は図-7であり, 系を一自由度系と考え, 上スラブで測定された加速度と, 上スラブと付加質量との合計の質量の積を外力として求めた復元力特性は図-8である。静的実験と動的実験における復元力特性を比較すると, 両者の剛性は, 破壊のかなり前の段階では類似しているが, 破壊に近い段階では相違が生じた。この理由としては, 動的実験の場合には試験体の一部に損傷が集中したこと, また, 両者の加力方法が異なることなどが考えられる。

次に, 最大荷重および最大変位について比較すると, 表-2に示すように, これらの値は, とともに静的実験の場合が動的実験の場合を上廻った。このことは, 試験体の誤差, 加力方法の相違, あるいは繰返し回数の相違によるものとも考えられるが, 荷重速度に起因するものとするれば, 極めて重要なことであり, さらに詳細な検討が必要である。

3.3 累積塑性変形倍率と消費エネルギー

静的実験と動的実験の試験体上スラブでの変位とその頻度の関係を示したのが図-9である。ここで, 変形の級間は0.1mmとした。同図より, 動的実験では, 静的実験に比べて小さい変形の回数が多いことがわかる。また, 静的実験と動的実験で試験体の降伏変位が同じものとして求めた累積塑性変形倍率と降伏変位より大きい変位での消費エネルギーの比較が表-2に示してある。同表より, 累積塑性変形倍率と消費エネルギーの両者とも静的実験が大きくなっている。すなわち, 動的な外力を受けた場合には, 静的な外力を受けた場合に比べて, 試験体のねばりが小さいという結果となった。試験体数が少ないため, 軽々しく結論づけることはできないことであり, さらに検討する必要がある。

4. 解析的検討

静的実験で得られた復元力特性と荷重-歪関係を有限要素法により解析した。解析には, 著者らが先に提案した非軸対称荷重を受ける非軸対称剛性を有する軸対称リング要素を用い, コンクリートとモルタル部のひびわれ発生に伴って生じる剛性低下は, RC円筒供試体に使用した材料の力学的性質より, 図-10のように仮定した。この図より, ひびわれ発生は, 最大主応力が $\sigma=25\text{kg/cm}^2$

表-2 最大変位・最大荷重・累積塑性変形倍率・消費エネルギー

CASE	δ_{\max} (mm)	Pmax (ton)				
			$\delta y=6.45$	$\delta y=8.60$	$\delta y=6.45$ (ton.mm)	$\delta y=8.60$ (ton.mm)
Dynamic	17.20	1.165	29.30	8.99	158.66	42.32
Static	53.75	2.361	42.66	27.02	284.35	274.15

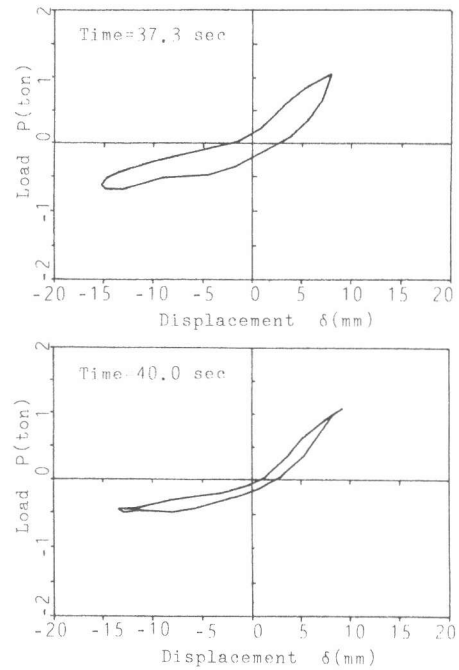


図-8 復元力特性(動的実験)

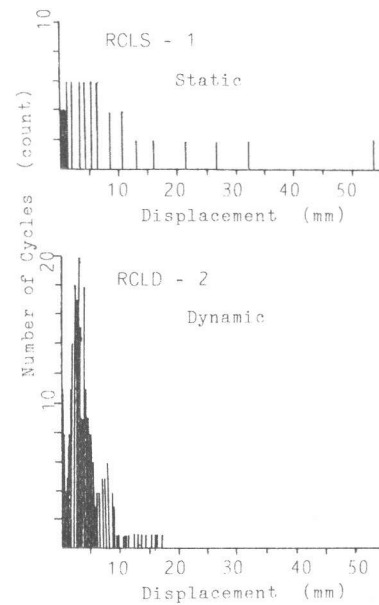


図-9 変位頻度分布図

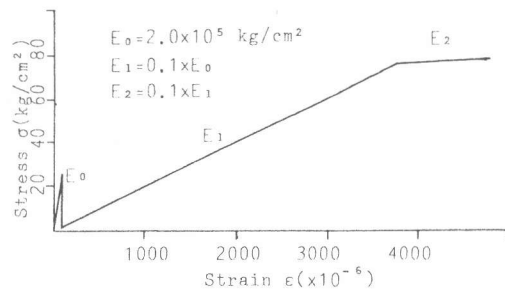


図-10 解析に用いた剛性

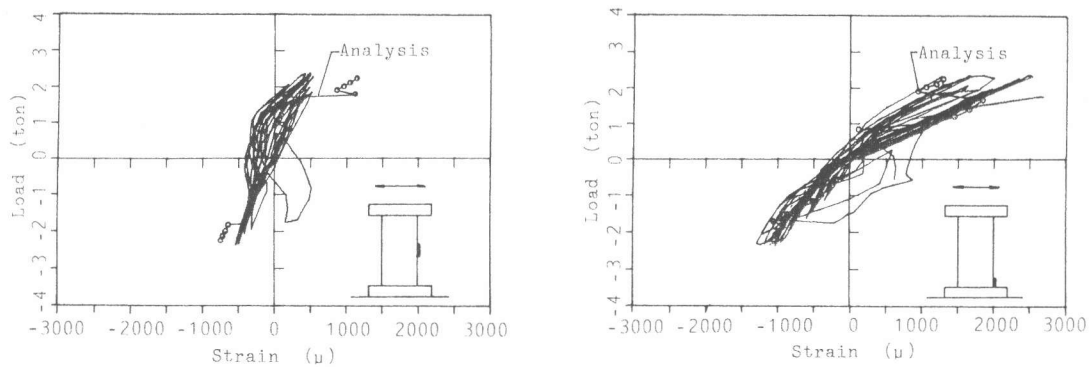


図-11 荷重 - 歪関係

を越えた時とし、以降、鉄線だけが外力に抵抗するものと考えている。また、鉄線は、歪 3750μ で降伏するものとした。解析で得られた上スラブ部の荷重 - 水平変位関係を図-6に、また、荷重 - 歪の関係を図-11に実測値と比較して示す。

解析の結果では、上スラブへの水平力 P が $P=0.50\text{ ton}$ までは弾性域にあるが、これ以降、フランジ部の下部で鉛直方向の引張応力により、ひびわれが発生し、周方向とフランジ上部方向へ進展した。これは、静的実験結果と良く一致していた。その後、周方向、フランジ上部方向へひびわれが進展しつづけ、フランジ部下部で $P=1.80\text{ ton}$ で鉄線が塑性化している。その後、 $P=2.20\text{ ton}$ まで塑性化領域は広がらず、 $P=2.30\text{ ton}$ で急激に塑性化領域が拡大している。 $P=2.35\text{ ton}$ では、円筒部引張フランジ部の下半分で周方向へ 80° の部分まで塑性化している。

この結果、上スラブの水平変位も急激に増大している。ひびわれや塑性化が生じた要素では、歪が急激に増大する傾向がみられるが、次に荷重が増大すると、近接する部分にひびわれや塑性化が生じて、前の部分の応力が緩和されることより、歪が一旦戻って小さくなる現象がみられた。これらのことに基づき、図-6、図-11をみると、復元力特性では、実測値の変位が大きい、荷重が増えて変位が急激に増大する傾向は、解析でも良く捕えられているといえる。また、歪についても、かなり解析値が良く実体を説明しているといえよう。ただし、解析では考えていない円筒部フランジの鉄線の下スラブからの引抜きが、上スラブ水平変位の解析値と実験値の差に大きく影響していると考えられる。これらを加味し、さらに、精度の良い解析法の開発が望まれる。

5 結論

RC円筒シェルの静的正負交番荷実験と動的破壊実験とを実施し、両者の対応を明らかとすることを試みるのと同時に、静的正負交番荷実験で得られた荷重 - 変位関係、荷重 - 歪関係を解析的に検討した結果、本研究範囲で次のことが言える。

- (1) 静的実験と動的実験では、試験体のひびわれパターンが異なり、破壊性状に相違がある。また、動的実験では、静的実験に比較して、最大荷重、最大変位、累積塑性変形倍率、消費エネルギーの各項とも小さい。これらの結果は、次に行なった内径と高さが同等のシェルの場合でも同様であり、動的実験時の加力の中心点の違い、鉛直加速度等も考え合せて、さらに多くの試験体について実験・検討する必要がある。
- (2) 本研究で用いた解析では、静的実験で得られた荷重 - 変位関係と比べて、降伏点近傍までの変位は小さかった。しかし、最大荷重近傍では良く一致した。また、荷重 - 歪関係も良く一致していた。今後、さらに精度の良い解析手法の検討が望まれる。

参考文献

- 1) 遠藤孝夫他；鉄筋コンクリート円筒シェルの振動極限耐力に関する一考察；土木学会第36回年次学術講演会概要集 昭和56年10月，V-19
- 2) 遠藤孝夫他；非軸対称剛性を有するコンクリートドーム壁の応力解析，第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集，P425~P428，1980