

### Ⅲ. PCR V支持構造物の振動実験

#### —Ⅲ-1 シリンダー型サポートモデル実験—

PCR V 研究グループ

### III. Experimental Study on PCR V Support Structures under Simulated Earthquake Motions

#### —Ⅲ-1 Cylinder Type Support—

PCR V Research Group

#### Abstract

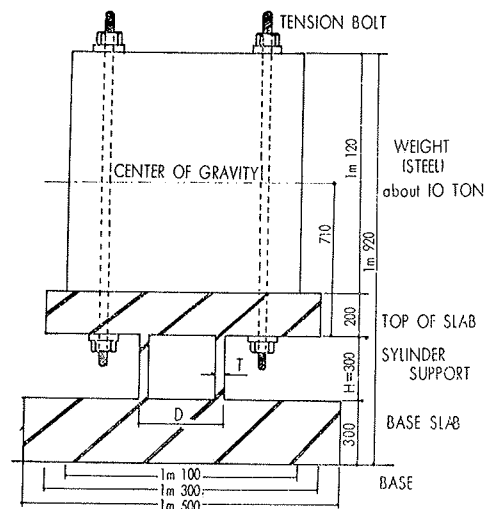
This study is concerned with one of the series of experiments for PCR V structures integral with reinforced concrete supports that appear to be feasible. Each model used in these tests consisted of a steel mass representing a PCR V and a hollow-cylinder type reinforced concrete support. The dimensions of the support were made about 1/50-scale of the prototype. The behaviors of the models under static and dynamic loads are compared with analytical results and discussed in this paper. From the test results, the load-deflection relationship changes in rigidity and energy absorption capacity after initiation of cracks and yielding of reinforcing bars are presented. Inelastic response is calculated based on the hysteresis of stiffness degradation type and the calculated results coincide well with measurements.

#### 概 要

強震時における PCR V 支持構造物の挙動を把握するため、R・C中空円筒型サポートで行ったモデル実験結果およびその応答解析結果について述べる。モデルは約1/50のスケールで形状効果を見捨てるため単純化し、初期応力、鉄筋比、モーメント—せん断力比の変化に伴う弾塑性挙動を捉えるため、径および高さを変え6体製作した。実験では弾性域における周期減衰性等について検討し計算値と比較するとともに、さらにコンクリートひびわれ、鉄筋降伏発生後の塑性域での荷重—変形関係、剛性低下による周期の伸び、および減衰性の変化等について検討した。又R・C構造物としては最も簡単な剛性低下型の履歴を仮定して弾塑性応答解析を行った結果について述べ、それが最大応答値、周期性など大局的には実験結果と良く一致することを示した。

#### 1. 試験体

PCR V 支持構造物をR・C中空円筒型サポートにモデル化したもので、その試験体形状を図—1に示した。試験体は約1/50のスケールであり、トップスラブ及びSteel Weight はPCR V 本体を表わすもので両者は4本のテンションボルトで一体化している。図—2はR・C部分の配筋方法を示したものであり、サポート部はD-6を等間隔に18本配筋しており、又中空部分の型枠除去のためa-a'部でコンクリートの打継ぎを行っている。試験体は軸方向応力度及びモーメント—せん断力比を変化させるため、サポート部の径と高さを変え計6体製作し、うち2体を静加力、4体を振動実験したもので、表—1に諸元を示した。コンクリート強度は各試験体ごと表—1に示したが粗骨材は、



図—1 試験体

6~10mm の豆砂利を使用し早強セメントを用いた。  
 なお主筋の降伏強度, ヤング係数はそれぞれ  $\sigma_y=3800$   
 $\text{kg/cm}^2$ ,  $E_s=1.9 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$  である。

試験体番号	12-1 12-2	13	21	22-1 22-2
高さ (cm)	30	15	60	30
壁厚 (cm)	4	4	4	4
外径 (cm)	40	40	60	60
初期軸方向応力 ( $\text{kg/cm}^2$ )	24.04	24.04	15.45	15.45
鉄筋比 (AS/AC) (%)	1.273	1.273	0.820	0.820
コンクリート強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	291 292	318	260	331 289
コンクリートヤング係数 ( $\times 10^6 \text{kg/cm}^2$ )	2.22 2.36	2.25	2.17	2.27 2.38

表一 試験体諸元

## 2. 静加力実験

### 2.1. 実験方法

弾性剛性, ひびわれ荷重, 降伏荷重と変形のチェックおよび復元力特性を求める目的で行った。試験床に4本のアンカーボルトで固定させ, オイルジャッキでPCR V 部の重心位置を正負くり返し加力した。変形の測定は 1/1000 ダイヤルゲージにより, Steel Mass およびトップスラブの水平, 回転量を計り, サポートの頂部と底部のコンクリート, 鉄筋の歪はワイヤーストレンゲージを用い測定した。

### 2.2. 実験結果

図一3は試験体12-1, 22-1の重心位置での荷重-変形曲線を示したが, いずれも降伏前のエネルギー吸収は小さく, ソフトスプリング的挙動を示している。図中の実線は(2・3)で述べる計算値である。図一4は試験体12-1のひびわれ発生状況を示したもので添数字はひびわれ発生時の水平荷重(TON)である。表一2はコンクリートひびわれ, 鉄筋降伏発生荷重を正負両方向について示したが, 軸心力度の違いによる破壊状況の差はほとんどたしかめられなかった。なお試験体12-1には最終破壊に至らしめなかったが12-1はコンクリートの圧壊により最大耐力が決まった。

### 2.3. 計算方法および実験値と解析値の比較

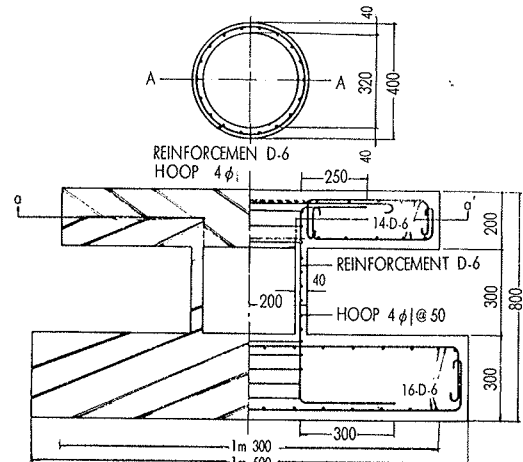
弾性剛性は  $F \cdot E \cdot M$  および上下スラブを半無限弾性体としてめりこみ変形を考慮した Beam-Theory の2方法で算出したもので, 2つの計算結果は良く一致していた。ひびわれ荷重  $Q_c$  は次式による。

$$Q_c = (2\sqrt{F_c + N/A})Z/L$$

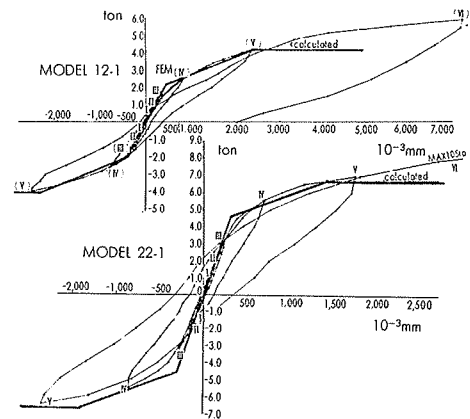
$F_c$  = コンクリート強度,  $N$  = 軸力

$A$  = 断面積  $Z$  = 断面係数

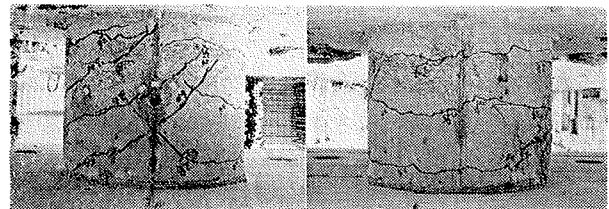
$L$  = PCR V 重心よりサポート底部までの距離



図一2 配筋方法



図一3 荷重-変形曲線



図一4 ひびわれ発生状況

試験体	荷重方向	曲げひびわれ荷重	せん断ひびわれ荷重	降伏荷重
12-1	正荷重	2.8 ton	3.6 ton	4.2 ton
	負荷重	2.2	3.4	4.0
22-1	正荷重	4.5	4.5	7.0
	負荷重	4.0	5.5	6.5

表一2 実験結果

試験体		弾性剛性	曲げひびわれ荷重	せん断ひびわれ荷重	降伏荷重	降伏変形
12-1	実験値	47.8 $\text{l/cm}$	2.50 ton	3.50 ton	4.10 ton	2.50 mm
	計算値	47.2	2.18		4.13	2.43
22-1	実験値	156.0	4.25	5.50	6.75	1.78
	計算値	177.0	4.04		6.65	1.39

表一3 実験値と計算値の比較

又降伏荷重は平面保持，引張側最外端の鉄筋のみ降伏，コンクリートは引張側無視圧縮側弾性の3つの仮定をもうけ導いたもので，さらに降伏変形は次の3つの和より求めた。(i)ひびわれ断面を考慮した曲げ変形，(ii)鉄筋のすべりによる変形(単純にサポート上下端の曲率分布を10dだけ両スラブに延長して求めた。d=鉄筋直径)，(iii)せん断変形。1例として試験体12-1の降伏変形に占める割合はそれぞれ(i)68.7%，(ii)28.9% (iii)2.4%である。

以上の仮定に基づく計算結果は図-3に実線で示すと同時に表-3に実験値(正負両方向の平均値)とともに示した。試験体22-1の降伏変形を除くと両者は良く一致している。

### 3. 振動実験

#### 3.1. 実験方法

弾塑性域にわたる動特性の変化を調べる目的から，当研究所の大型振動台に固定し(図-5)，試験体，12-2，22-2，21の3体は正弦波，13はEL-Centro 1940-NSの時間軸を1/2に縮め，各試験体にそれぞれ数回入力し徐々に破壊させた。さらに大入力実験(H・R)の前後で自由振動実験および微入力定常波振動実験を行い，破壊進行に伴う剛性および減衰性の変化を調べた。なお大入力実験時の入力周期と加速度は前回の実験結果を基に応答変位が増大するよう選んだ。

#### 3.2. 実験結果

各試験体の弾性周期を表-4に示したがここでの計算周期は実験で得られた振動台の回転変形を考慮して加速度記録から回転バネ  $K_R=3.08 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{cm}$  を用いて導いたものである。弾性モードは12-2についてのみ図-6に示した。図-7は定常波試験における共振曲線を描いたもので，共振振動数の一番高いものが弾性，以後順に大入力試験が終わった後のものであり，曲線のピークに示した数値は加速度記録値である。図-8は，大入力試験，定常波試験，自由振動試験時の剛性と減衰性の変化を，降伏変形を基に経験した最大変形に応じてプロットしたもので，大力力時剛性は次式より求めた。 $K_{eq} = Q/D_{max}$ ，ここに  $D_{max} = PCR/V$  重心での最大変形， $Q = \text{測定最大加速度} \times \text{質量}$  を乗じて求めた水平力。又実線は Primary curve 上の点と原点を結んだ等価剛性の近似値である。図-8より各試験体とも剛性低下はひび割れ発生後顕著で降伏後は比較的ゆるやかであり，又大きく振動している時ほど剛性の低下がはげしい。減衰定数は各試験体とも弾性時で約2%でほぼ等しく，破壊が進行し応答変形がの

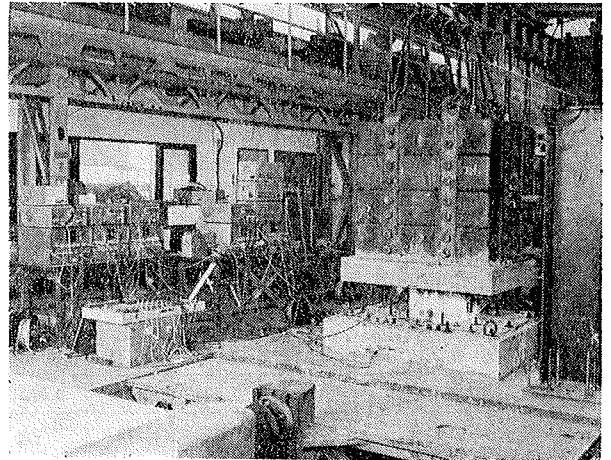


図-5 振動実験

試験体	実験値	計算値
12-2	8.9Hz	8.9Hz
22-2	13.5	13.4
21	8.6	9.3
13	11.2	12.0

表-4 1次振動数

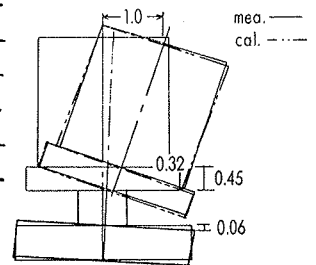


図-6 1次モード

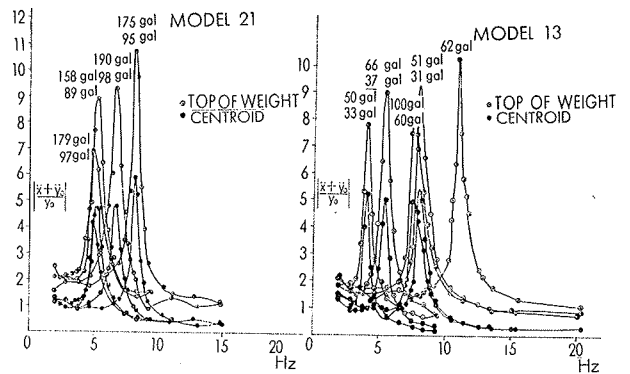


図-7 共振曲線

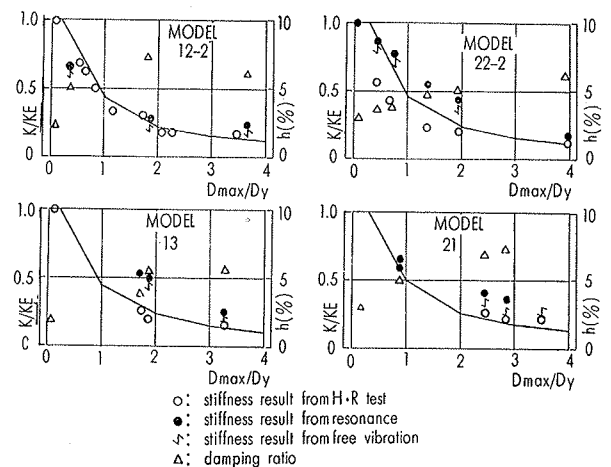


図-8 剛性と減衰性の変化

びるに従い増大し、降伏変形の4倍位を経験するとほぼ6%位になる。又振動実験におけるひびわれ発生状況は静加力実験結果とほぼ等しく、さらにサポート断面の変化に伴う破壊状況の差はみとめられなかった。

#### 4. 振動実験解析

##### 4.1. 解析方法

図-9に解析のモデル化を示したが、mass 回転角  $\theta$  と水平変形  $y$  の2自由度をもった1質点系として計算した。図-9より重心の水平変形は次式となる。

$$z = x + y + e\theta \quad \dots\dots(1)$$

一方サポート頂部での荷重-変形関係は次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} y &= \alpha_{11} \cdot P + \alpha_{12} \cdot M \\ \theta &= \alpha_{21} \cdot P + \alpha_{22} \cdot M \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2)$$

ここに  $P$  = 水平力

$M$  = 曲げモーメント

$\alpha$  = 影響係数

式(2)を動的釣合式で表すと (サポート部の質量無視)

$$\begin{aligned} -y &= \alpha_{11}m(\ddot{x} + \ddot{y} + e\ddot{\theta}) + \alpha_{12}\{me(\ddot{x} + \ddot{y} + e\ddot{\theta}) + J\ddot{\theta}\} \\ -\theta &= \alpha_{21}m(\ddot{x} + \ddot{y} + e\ddot{\theta}) + \alpha_{22}\{me(\ddot{x} + \ddot{y} + e\ddot{\theta}) + J\ddot{\theta}\} \end{aligned}$$

ここに  $\dots\dots(3)$

$m$  = steel mass と Top slab の質量

$J$  = 重心まわりの回転慣性

式(3)で減衰項を考慮し、ストリックス表示すると

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m & me \\ me & me^2 + J \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ \theta \end{Bmatrix} &= - \begin{bmatrix} m \\ me \end{bmatrix} \ddot{x} \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

ここに

$[K]$  = 剛性マトリックス

$[C]$  =  $\beta[K]$  減衰マトリックス

さらに弾塑性解析では、次の仮定を設けて計算した。

- (i) (4)式での剛性マトリックスは重心位置における応答水平変位のレベルによっておこる剛性低下を基に変化させる。
- (ii) 復元力曲線として、単調増加時は2・3で述べた primary curve を用い、ひびわれや降伏発生後除荷が起った時は図-10に示したごとく原点指向型とする。
- (iii) 減衰マトリックス  $[C] = \beta[K]$  において、 $[K]$  は弾性マトリックスを与え一定とし、 $\beta$  のみを変化させ減衰定数が下記の値をとるようにした。

弾性時	2%
ひびわれ発生より降伏前まで	4%
鉄筋降伏以後	6%

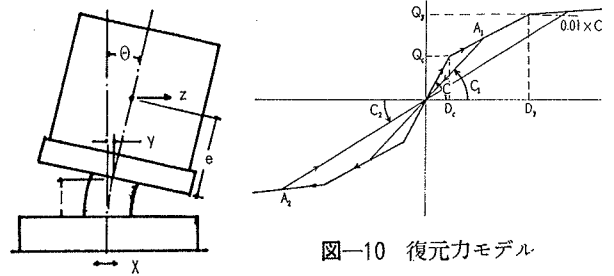


図-9 解析モデル

図-10 復元力モデル

##### 4.2. 実験結果と解析結果との比較

実験結果と前述した仮定に基づく解析結果の比較を試験体21と13の2体についてのみ以下に示す。なおそれぞれひびわれが発生し、かつ降伏前の実験を RUN-1 とし、その次の実験を RUN-2 としたもので応答値は重心位置のものである。

###### 試験体21

入力波は正弦波であり、実験波形および解析波形を図-11に示し、同時に各 RUN の入力振動数、応答最大加速度および変形を右側の表に一括して示した。降伏変形に対し RUN-1, RUN-2 での最大応答変形はそれぞれ約0.84倍, 2.5倍であった。実験波形は振動開始直後の比較の入力の小さいところで最大応答値を示し、以後小さくなる傾向にある。これは入力周期を試験体の固有周期に近づけたため、試験体が共振を起こした後、ひびわれ又は降伏がおこり剛性が急激に変化したためである。この現象は解析波形でもみとめられるが生起時刻に若干の差がある。実験波と解析波の周期性および最大応答値は良く一致している。

###### 試験体13

入力波は EL-Centro 40 NS である。実験波形と解析波形は図-12に示し、同時に各 RUN における入力加速度、応答最大加速度および変形を右側の表に示した。降伏変形に対し RUN-1, RUN-2 での最大応答変形はそれぞれ約0.33倍, 1.3倍である。両波形は良く一致している。

#### 5. まとめ

- (i) 静加力実験で得られたひびわれおよび降伏発生時の荷重と変形は計算値とよく一致している。
- (ii) 弾性周期は実験値と解析値がよく合致しており、弾性での減衰定数は約2%であった。ひびわれ発生後は剛性低下が顕著で、周期の伸びは経験した最大変形を基に Primary curve を用いてほぼ予想しうる。
- (iii) R・C 構造物としては最も簡単な原点指向型の復元力モデルを Primary curve を基に仮定し、減衰を

変化させて弾塑性解析を行った結果、最大応答値、周期性など大局的には実験結果を説明することは可能と考えられる。しかし最大応答値を示す生起時刻の違い、

低応力レベルでの正確な剛性評価、およびくり返しの影響など多くの問題点が残っており、より詳細な解析法の検討が必要と思われる。

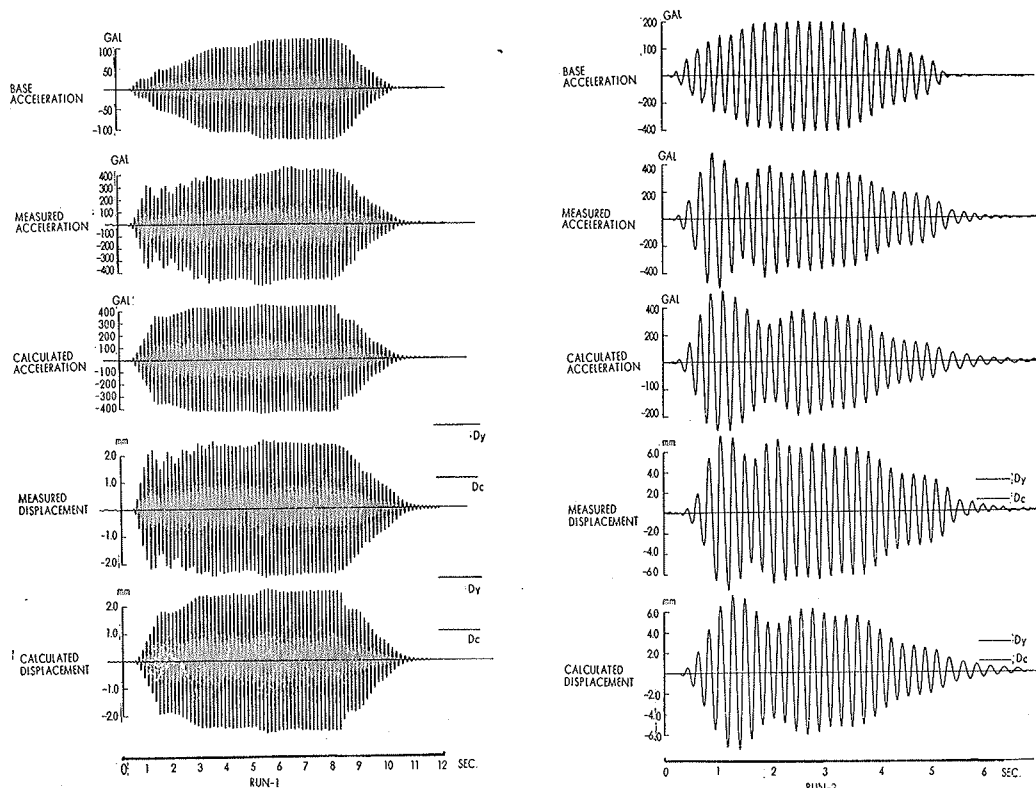


図-11 試験体21の実験波および解析波

入力加速度 (振動数)	応答加速度		応答変位	
	実験値	計算値	実験値	計算値
RUN-1 112 gal (7.0Hz)	480 gal	462 gal	2.55 mm	2.60 mm
RUN-2 205 gal (4.7Hz)	505 gal	520 gal	7.60 mm	7.73 mm

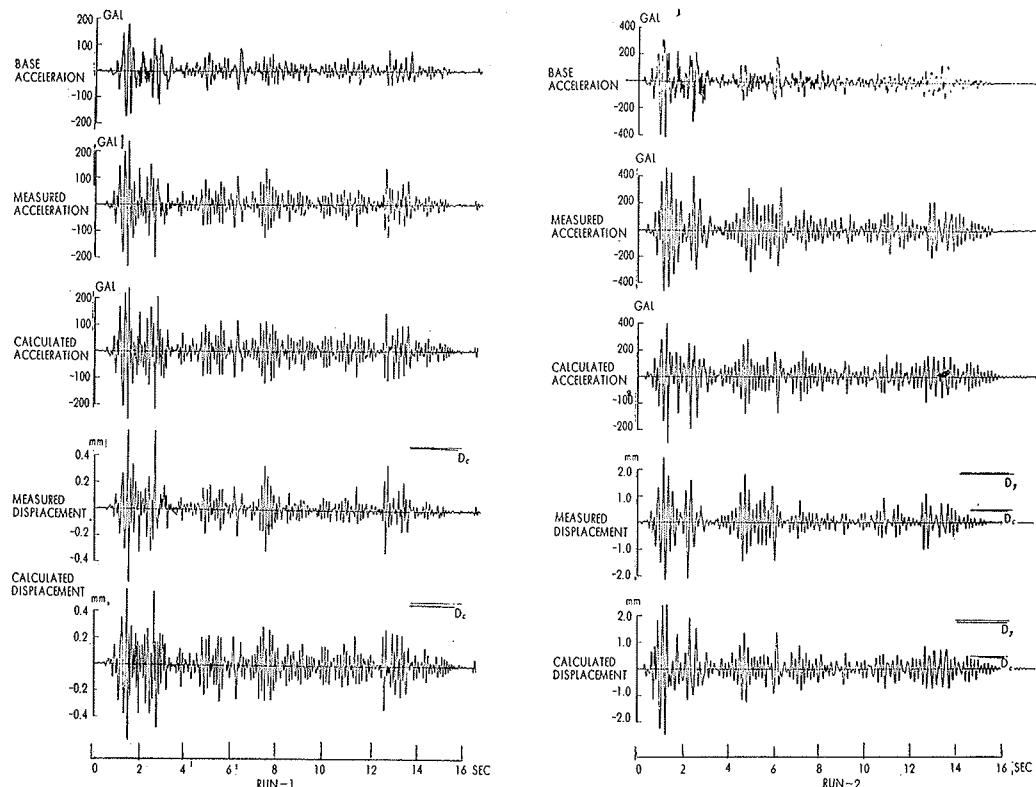


図-12 試験体13の実験波および解析波

入力加速度	応答加速度		応答変位	
	実験値	計算値	実験値	計算値
RUN-1 180gal	240gal	235gal	0.59mm	0.58mm
RUN-2 410gal	470gal	500gal	2.40mm	2.50mm