

プレストレストコンクリート原子炉圧力容器 (PCRJV) 構造物に関する研究

—III—2 1/70 6脚型サポートモデル実験とその解析—

PCRJV 研究グループ

Study on Prestressed Concrete Reactor Vessel (PCRJV) Structures

—III-2 1/70 Star-Type Support—

PCRJV Research Group

Abstract

This report describes test results of the star-type 1/70-scale PCRJV support model subjected to earthquake motions and static lateral loads and their methods of analysis.

Load-deflection relationships of this model are characterized as being almost spindle shape in the static tests even after initiation of cracks and yielding of reinforcement, and residual deflection is small. The changes of rigidity and energy absorption in each loop of the test are compared with the calculated amounts. Dynamic behavior is calculated based on two simplified assumptions reflecting static analysis: 1) tri-linear stiffness degrading envelope, and 2) variable viscous damping value governed by previously attained maximum response deflection. It can be said that the calculated results coincide well with measured ones.

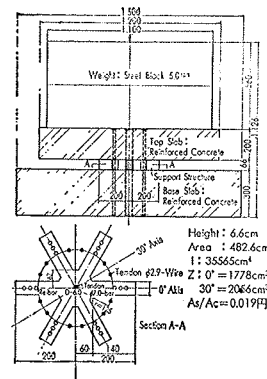
概要

本報告は PCRJV 支持構造物に関する一連の研究のうち、1/70 6脚型サポートモデルの弾塑性振動及び静的水平加力実験結果とそれらの解析法について述べたものである。

静加力実験で得られた履歴特性は、ひびわれ発生後も残留変形が小さく又履歴変形の増減にかかわらずループはほぼ紡錘型で、経験した最大変形に応じてエネルギー吸収性が増加する傾向にあり、これらの事は解析結果と良く一致していた。又応答最大変位に応じ剛性低下を考慮し、かつ減衰性増大を線型等価粘性として考慮した応答解析を行った結果、最大応答値や周期性など実験での応答性状を捉えることが出来た。

1. 試験体

図一1は試験体形状とサポート断面を示したもので当研究所大型振動台で破壊に至らせ得るようサポート断面の縮尺を約1/70にした。図一1でTop Slab及びSteel BlockはPCRJV本体を表わし、両者をTension Boltで一体化しこれを剛体とした。これにより試験体弾性周期は約0.05秒となる。さらにサポート部に緊張材を導入し軸方向応力度を実物とほぼ合せたもので、試験体の諸元及び使用材料の強度等は表一1に示した。尚R・C部分は一体打ちである。



試験体

図一1

MODEL NO.	No. 1	No. 2	No. 3
TEST	Static	Static	Dynamic
PRESTRESSING (kg/cm ²)	24.9	0	22.8
TOTAL AXIAL STRESS (kg/cm ²)	36.1	11.4	34.2
Fe (kg/cm ²)	201.1	214.3	187.2
Ec (kg/cm ²)	2.05×10 ⁵	2.12×10 ⁵	2.05×10 ⁵
STEEL (kg/cm ²)	Es=1.9×10 ⁵ σ _y =3800		

表一1 試験体諸元

2. 実験

2.1. 実験方法

弾塑性振動性状と静加力実験結果及び解析法との検討を目的として、最初に振動実験を数回行い各Runで得られたPCRJV部重心変位を基に静加力くり返し載

荷実験を行った。振動実験は入力レベルを漸増させ4回行った。表一2はその実験過程を示したもので“H・R”はEL Centro N-Sを実時間の1/4に縮尺して作用させた大入力時実験を表わし、“F・V”“S・S”はそれぞれ“H・R”実験後低応力レベルで行った自由振

動実験及び定常加振実験を示す。静加力実験は PCRV 部重心位置を加力点とし、加力方向のずれを防ぐ意味から上下左右変形自由な治具により引張力を与えたもので、重心の変形制御で加力した。

2.2. 静加力実験結果

図-2 は試験体 (No. 1, No. 2) の重心位置荷重・変位曲線、図-3, 4 は No. 1 の荷重・鉄筋歪曲線及び鉄筋歪分布を示したものである。No. 1 において緊張材は最終サイクルで降伏した。図-4 よりほぼ平面保持の条件が満足されている。図-2 にみられるように曲げひびわれ、主筋降伏後も履歴特性はほぼ紡錘型でなめらかであり残留変形が小さいのが特長で、その傾向は緊張材を導入した No. 1 がより顕著である。両試験体の剛性及びエネルギー吸収性の変化を各繰り返しサイクルでの最大変形を基にまとめ、それぞれ図-5, 6 に示した。図-5 は弾性剛性に対する各ループでの剛性低下の割合を示したもので、正負両ピークを結ぶ直線の傾きより換算した。なお図-5 には破壊にともなう周期の変化を自由振動実験より求め、その換算剛性をあわせて示した。図-6 は荷重・変形曲線から半サイクル毎に吸収エネルギーと弾性エネルギーの比を等価粘性減衰定数の形で示した。ひびわれ発生後において試験体 No. 2 は No. 1

Test No.	Remarks	Column
F.V.-0	after set over	
S.S.-0	after set over	
H.R.-1	Input: EL-CENTRO 1940 N-S Input Acceleration: 57 gal Response Acceleration: 110 gal	
F.V.-1	after Test H.R.-1	
S.S.-1	after Test H.R.-1	
H.R.-2 (Crack)	Input: EL-CENTRO 1940 N-S Input Acceleration: 850 gal Response Acceleration: 905 gal Response Displacement: 0.73 mm Strain of Bar: 1300×10^{-6}	
F.V.-2	after Test H.R.-2	
S.S.-2	after Test H.R.-2	
H.R.-3 (Yield)	Input: EL-CENTRO 1940 N-S Input Acceleration: 1100 gal Response Acceleration: 1200 gal Response Displacement: 1.95 mm Strain of Bar: 2900×10^{-6}	
F.V.-3	after Test H.R.-3	
S.S.-3	after Test H.R.-3	
H.R.-4	Input: EL-CENTRO 1940 N-S Input Acceleration: 1200 gal Response Acceleration: 1350 gal Response Displacement: 2.5 mm	
F.V.-4	after Test H.R.-4	
S.S.-4	after Test H.R.-4	

表-2 振動実験の過程

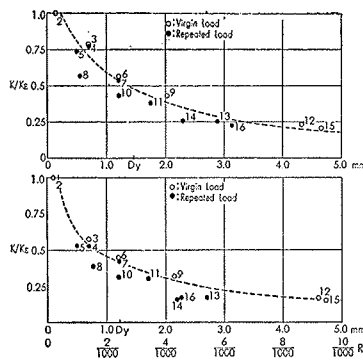


図-5 剛性低下

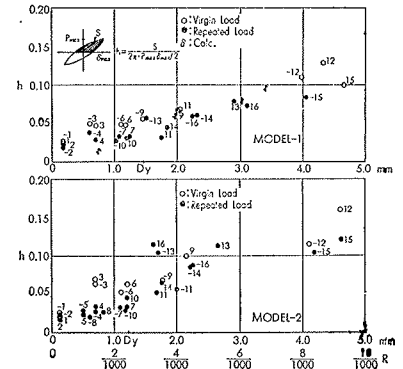


図-6 等価減衰定数

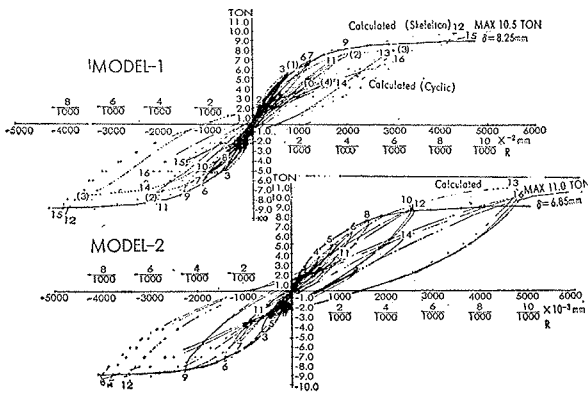


図-2 荷重-変形曲線

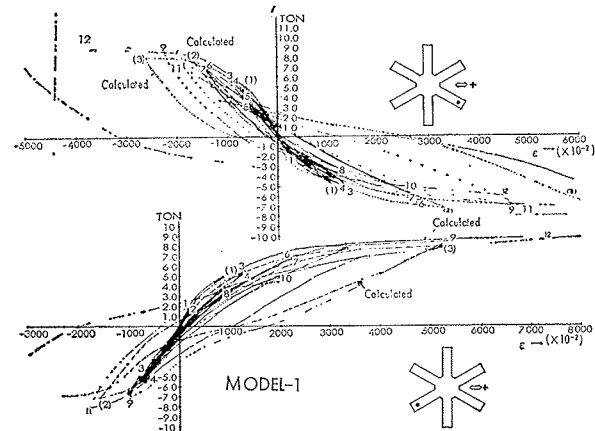


図-3 荷重・鉄筋歪曲線

Test	No.	K_s		Crack		Yield	
		1/m	1/cm	1/m	1/cm	1/m	1/cm
Calc.	107	2.20	0.255	1.30	0.124	2.35	1.22

表-3 実験結果と計算値

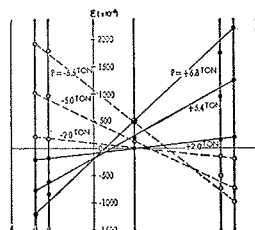


図-4 鉄筋歪分布

に比べ剛性低下はげしく、残留変形が大きいため等価粘性減衰定数も大きい。この事よりプレストレスが履歴特性に及ぼす影響がわかる。表-3 はひびわれ、鉄筋降伏発生等の荷重と変形を示す。

2.3. 振動実験結果

定常加振実験より得られる共振曲線を図-7 に示した。各“H・R”実験における入力波、応答波を図-8 に又それらのフーリエスペクトルを図-9 にそれぞれ示した。図-10 は各 Run において入力加速度と応答加速度のスペクトル比 (伝達関数) を示した。図-11

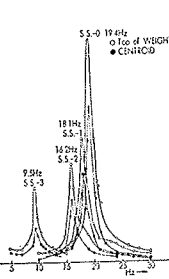
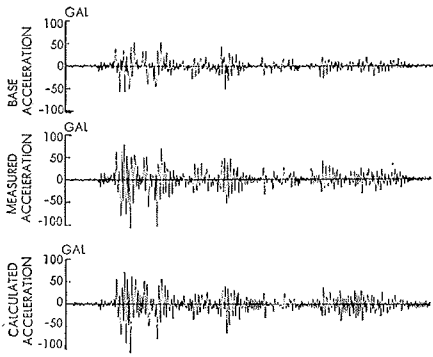


図-7 共振曲線

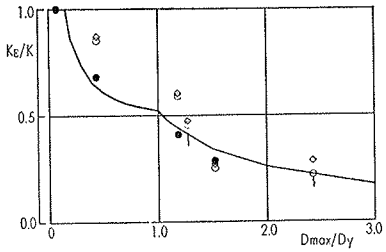


図-11 剛性の変化

- : stiffness result from free vibration (low stress level)
- : stiffness result from resonance curve
- : stiffness result from transfer function
- | : stiffness result from free vibration (high stress level)

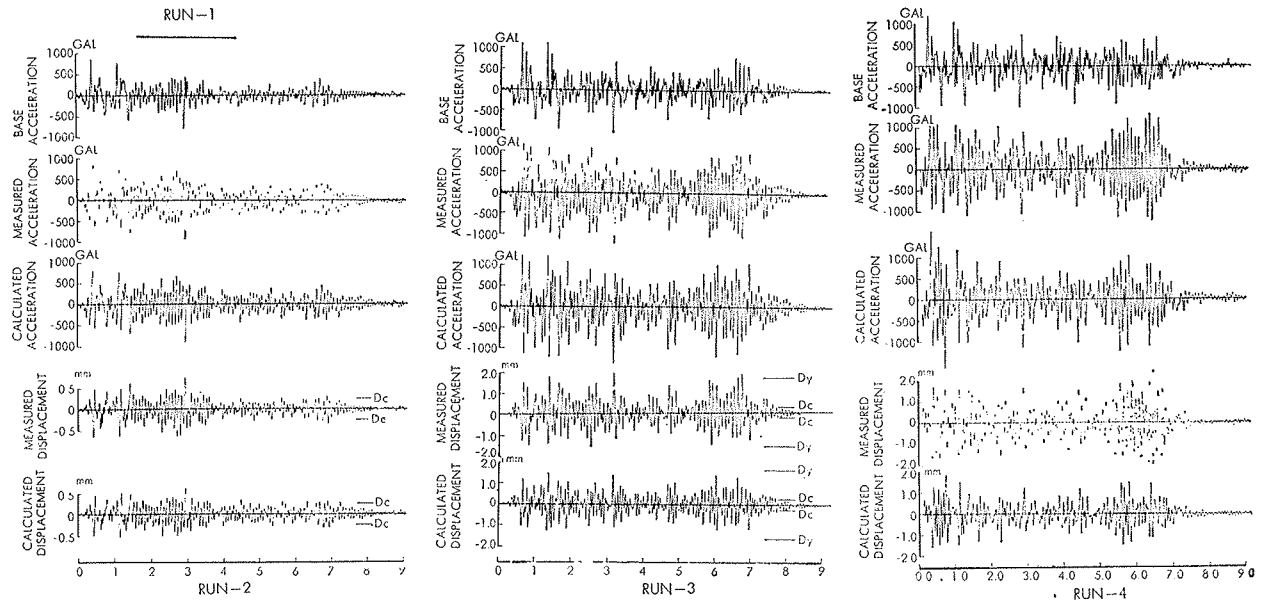


図-8 入力波と応答波

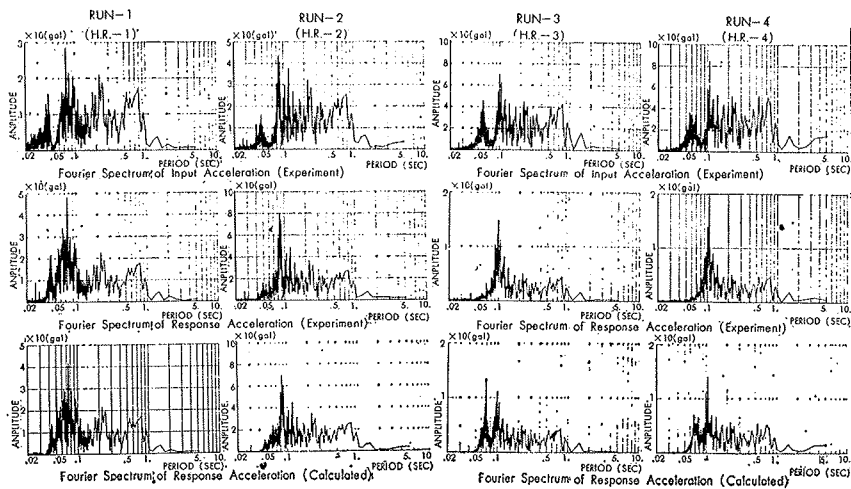


図-9 フーリエスペクトル

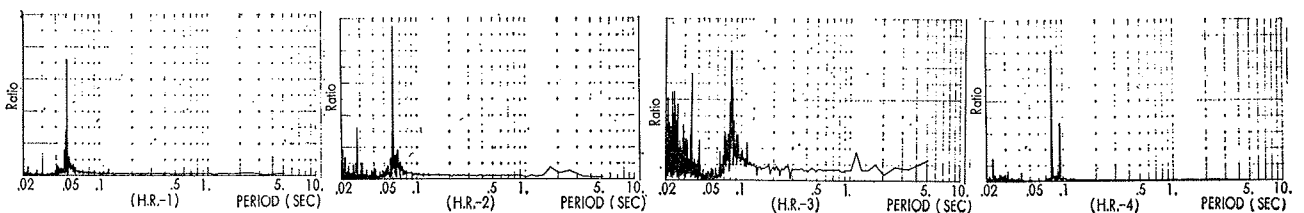


図-10 伝達関数

は最大応答変位を基に各種実験時の剛性変化を示したもので、周期変化から換算したものである。図-9で入力加速度は試験体固有周期の所で谷を生じており、これは試験体と振動台の連成効果が顕著に現われたものと思われる。図-10でみられる伝達関数は各 Runともそのピークがシャープで単純な形をしている事より、破壊進行により剛性低下が起り周期はのびるが、以後そののびた周期で比較的弾性的な応答性状を示していると考えられる。又図-11より高応力レベルでの振動時ほど試験体周期が長く(剛性小)、くり返し回数が多い程剛性の低下が激しいことがわかる。

2.4. 静加力実験と振動実験結果との比較

図-12は静加力と振動実験結果を比較したもので、最大変形を基に剛性低下の変化を示した。

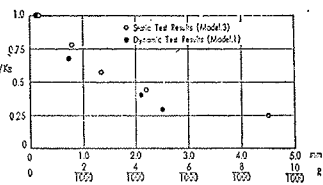


図-12 剛性低下の比較

3. 解析

3.1. 静加力解析

サポート部は後述する2軸曲げ解析法を適用したもので、試験体のモデル化に際しては以下の仮定をもうけた。

- (1) PCRV 部は剛体変形をする
- (2) サポート部は平面保持とし材のせん断変形無視
- (3) サポート両端部回転を弾性域ではスラブを半無限弾性体としてめり込みを考慮し、ひびわれ発生後は鉄筋のぬけだし等を考え近似的に端部の歪分布を基に算出する
- (4) 緊張材は弾性として扱う。

以下部材の2軸曲げ解析法¹⁾の概要を示す。

(a) 断面の釣合、部材を図-14に示すごとく分割すると任意断面での filament 軸方向歪増分は(図-15)

$$\Delta \epsilon_1 = \Delta \epsilon_0 - z_i \Delta k_1 + y_i \Delta k_2 \dots \dots \dots (1)$$

ここに $\Delta \epsilon_0, \Delta K_1, \Delta K_2$: 重心での軸方向歪と曲率
 z_i, y_i : 重心からの距離

また図-13より各 filament の応力-歪関係は

$$\sigma_i = \sigma_{i0} + E_i \Delta \epsilon_1 \dots \dots \dots (2)$$

従って断面内の増分時釣合式は次式となる

$$\begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M_1 \\ \Delta M_2 \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n E_i \begin{pmatrix} A_i & -Z_i & Y_i \\ I_{ZZi} & I_{ZYi} \\ \text{sym} & I_{YYi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \epsilon_0 \\ \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \end{pmatrix} = [D_+] \begin{pmatrix} \Delta \epsilon_0 \\ \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここに A_i : 断面積
 Z_i, Y_i : 断面係数
 $I_{ZZi}, I_{YYi}, I_{ZYi}$: 断面2次モーメント及び相乗モーメント

軸方向力一定であれば $\Delta N = 0$ であるので式(3)は次式で表わせる。

$$\begin{pmatrix} \Delta M_1 \\ \Delta M_2 \end{pmatrix} = [\Delta m] = [D_{tKK} - D_{tK\epsilon} D_{t\epsilon\epsilon}^{-1} D_{t\epsilon K}] \begin{pmatrix} \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \end{pmatrix} = [D_t^*] [\Delta K] \dots \dots (4)$$

(b) 変位変換式 Segment 内部変位と材端変位は3式次として次のごとくなる。(図-16)

$$[U] = \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 & 0 & 0 & f_2 f_3 & 0 & 0 & f_4 \\ 0 & f_1 & f_2 & 0 & 0 & f_3 & f_4 & 0 \end{pmatrix} [U] = [P][U] \dots \dots (5)$$

ここに $[U] = \{V_A, W_A, \theta_{1A}, \theta_{2A}, V_B, W_B, \theta_{1B}, \theta_{2B}\}^T$

$$f_1 = 1 - 3(X/L)^2 + 2(X/L)^3$$

$$f_2 = \{X/L - 2(X/L)^2 + (X/L)^3\}L$$

$$f_3 = 3(X/L)^2 - 2(X/L)^3$$

$$f_4 = \{-(X/L)^2 + (X/L)^3\}L$$

$$[K] = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -w, xx \\ v, xx \end{pmatrix} = [B][U] \dots \dots \dots (6)$$

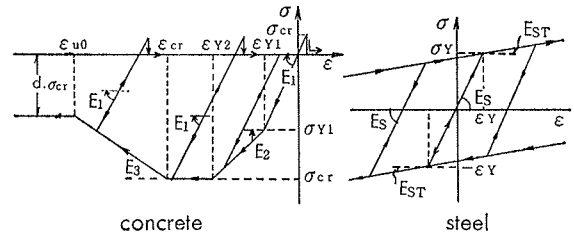


図-13 応力-歪関係

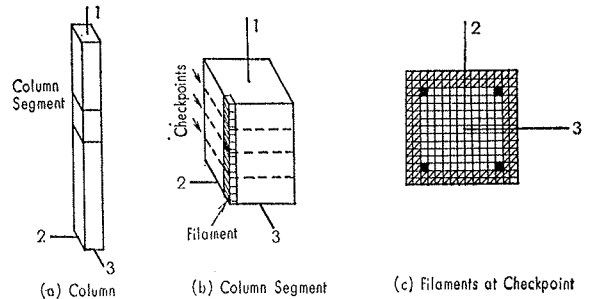


図-14 部材の分割法

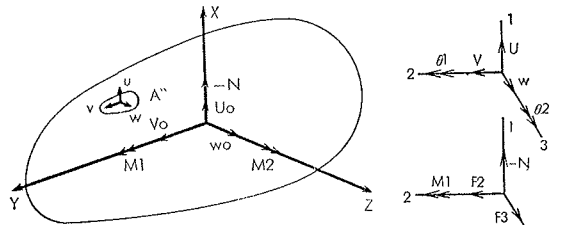
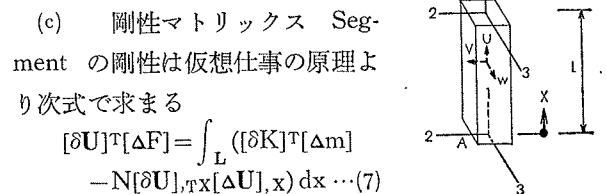


図-15 断面の力と変形



(c) 剛性マトリックス Segment の剛性は仮想仕事の原理より次式で求める
 $[\delta U]^T [\delta F] = \int_L ([\delta K]^T [\delta m] - N [\delta U]_{,T} x [\delta U]_{,x}) dx \dots (7)$
 式(4)および $[\Delta U]_{,x} = [P]_{,x} [\Delta U]$, 図-16 節点変位, $[\Delta K] = [B][\Delta U]$ を考慮することより 節点力

$$[\Delta F] = \int_L \{ [B]^T [D_t] [B] - N [P], T_x [P], x \} dx \cdot [\Delta U] \quad (8)$$

$$\therefore [\Delta F] = [K_t] [\Delta U]$$

部材全体の釣合は $[K_t]$ の重ね合わせにより求まり、外力が部材端力のみの際はマトリックスを縮小する事より解析出来る。

(d) 弾塑性の扱い及び数値計算 増分時においてコンクリート又は鉄筋の応力・歪曲線が変化するとその時点の軸力 (N') は定軸力 (N) と、 $\Delta N = N' - N$ の差が生じる。ここでは各断面毎に式(8)を用い $[D_t]$ 一定にして反復計算により $\Delta N \approx 0$ を導いた。又式(8)の $[K_t]$ は次式より求められる。

$$[K_t] = \sum_{j=1}^q H_j [B_j]^T [D_{t,j}]^* [B_j] - N \int_L [P], T_x [P], x dx \quad (9)$$

- ここに j : ガウス積分点
- H_j : j 点におけるガウス積分重み係数
- $[B_j], [D_{t,j}]^*$: 変位(曲率)と応力マトリックス
- q : ガウス積分点の数

3.2. 静加力解析結果

サポートを軸方向に6分割し、図-17に示す filament 構成で解析した。その結果を図-2, 3及び表-3に実験結果とともに示した。鉄筋の歪は解析値と実験値は良く一致している。

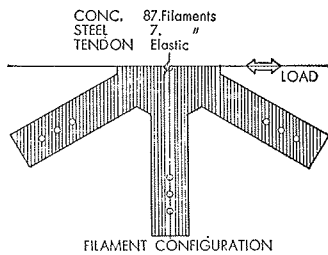


図-17 解析モデル

またひびわれ発生後の変形算出は近似的に扱ったが、ほぼ実状を捉えていると思われる。Skeleton Curve 上の各点と原点を結ぶ傾きをその変位での等価剛性と定義し弾性剛性に対する低下を図-5に破線で示し、図-6には試験体 No. 1 についてのみ解析で得られた等価粘性減衰定数を示した。

3.3. 振動解析

ひびわれ発生後 R・C 構造物の振動性状は非常に複雑であり、履歴特性を厳密に定義した解析法²⁾がある。ここでは R・C 構造物に特長的で応答に大きく影響すると思われる剛性低下とエネルギー吸収性の増大³⁾ のみに着目し、これを線型等価粘性減衰振動系^{4), 5), 6)} にモデル化して解析を行ったもので以下にその仮定を示す。

(1) 振動方程式は前報⁷⁾ で示した1質点2自由度系とし、重心での応答変位レベルによっておこる剛性低下を基に剛性マトリックスを変化させる。

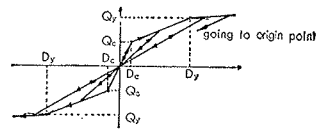


図-18 履歴特性

(2) 重心での履歴として、単調増加時は静加力解析結果を tri-linear にモデル化し、ひびわれや降伏後除荷が起った時は原点指向型として扱う。

(図-18)

(3) 応答変位が過去最大変位を上回る時は履歴減衰を考えるが以後剛性低下が起った後は線型粘性減衰振動とし、その減衰係数を図-19に示すごとく

応答変位レベルに応じ段階的に増加させる(*注)。

(4) 弾性時での粘性減衰定数を2%とする。

(*注) 図-19に示した丸印は $\phi=1$ (図-20参照) として導いたものである。粘性減衰力による吸収エネルギーは応答速度に依存し、地震時の応答速度は各ループで変化する。しかしここでは大変形、応答時のループはほぼその時刻の周期であり、それは共振状態 ($\phi=1$) である事を仮定し、応答変位レベルにおける履歴減衰から等価な粘性減衰定数 (h_{eq}) を求め、そこでの減衰係数 (c_{eq}) としたものである。又 ϕ が1からずれるに従い応答は激減し、減衰の影響が小さいと考えられる。

3.4. 振動解析結果

図-8に応答加速度・変位、図-9に加重量フーリエスペクトルをそれぞれ実験値とともに示した。図-8より降伏前の Run-1, 2は変位、加速度とも解析結果は実験値と良く一致するが、破壊が進むにつれ解析値の方が加速度で大きく変形が小さくなり、両者のスペクトル(図-9)でも周期性に若干の異いが認められる。

4. まとめ

以上 $1/70$ PCR/V サポートモデルの実験及び解析結果から

(1) 静加力くり返し実験で得られた履歴特性は降伏後もほぼ紡錘型で残留変形が小さく、この傾向は緊張材導入により強調される。履歴を等価剛性及びエネルギー吸収性の2点から見た結果、それらは履歴最大変形を基にほぼ規則正しく低下、増大しており、さらに

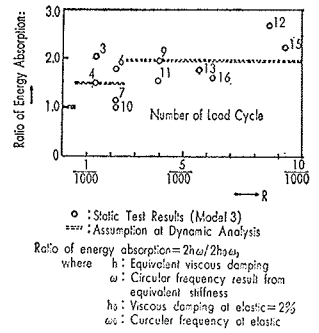


図-19 減衰係数の変化

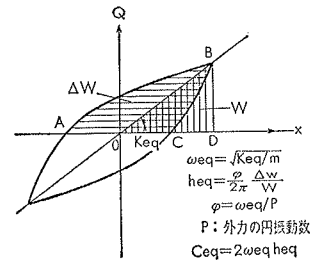


図-20

小振幅時でも履歴最大変形時の剛性と減衰性を保っている。

(2) 静加力解析で得られた Skeleton Curve は実験結果と良く一致しており、前述の解析法でひびわれ以後の挙動をほぼ把握出来たと思われる。履歴変位増大にもなう剛性低下及び減衰性変化の傾向は解析値と実験値は等しい。

(3) 振動実験の各 Run で得られた伝達関数は単純な形を示しており、破壊進行にともない周期がのびた以後はそれまでの応答変形を上回らない限り線型応答に近い性状を示していると思われ、これは静加力実験結果と同様である。また剛性低下（周期ののび）は静加力の結果より激しい。

(4) Tri-linear の Skeleton Curve 及び剛性低下を考えた線型等価粘性系として振動解析した結果、大振幅時を除けば実験結果と良く一致する。しかし片揺れ、地震外乱時の履歴減衰の評価等の問題に関し、ここで示した振動解析法の検討がさらに必要である。

参考文献

- 1) A. E. Akton, D. A. W. Pecknold and M. A. Sozen "Effects of Two-Dimensional Earthquake Motion on a Reinforced Concrete Column"
Univ. of Illinois 1973. 5
- 2) T. Takeda, M. A. Sozen and N. N. Nielsen "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake"
A. S. C. E. 1970, 12. pp2557~2573
- 3) P. Gulkan and M. A. Sozen
"Design-Oriented Interpretation of Inelastic Response of Reinforced Concrete Structures to Earthquake Motions"
Univ. of Illinois
- 4) L. S. Jacobsen
"Damping in Composite Structures"
Proc., Second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, 1960 pp. 1029~1044
- 5) P. C. Jennings
"Equivalent Viscous Damping for Yield Structure"
Proc., A.S.C.E. V. 94, No EM 1, 1968 pp.103~116
- 6) G. W. Housner
"Behavior of Structures During Earthquake"
Proc., A. S. C. E. V. 85, No.4 M4 1959 pp.109~129
- 7) PCRVR 研究グループ：“同題目（Ⅲ—1）大林組技術研究所報 No. 8 (1974)
- 8) H. Yamahara
"Practical Solutions for Soil-Structure Interaction System"
Shimizu Technical Report No. 1 Dec. 1971
- 9) “地震工学” 彰国社