

[113] 鉄筋コンクリート片持梁の地震時応答への入力波形の影響

正会員 ○本 橋 卓 典（大豊建設北陸支店）

尾 崎 浩 明（横河技術情報）

正会員 山 崎 淳（東京都立大学工学部）

1. 問題点、対象構造物および挙動

鉄筋コンクリート部材が地震等の不規則で継続的外力を受けた場合の応答予測のため、履歴を含めた構造要因の影響を見出そうとする。非弾性でかつ塑性変形を含む構造を、微小時間内で線形剛性と粘性減衰をもつ構造に置換できるとした場合、同一に作製した供試体に対し、標準として選んだ地動加速度実測記録の時間軸を任意に数種に変えることにより選定構造物の固有周期と入力波の関係を変化させた時の、線形剛性と粘性減衰が、構造物の非弾性域での変形に伴って変化する場合の規則性を見出そうとする。片持梁で、その先端の変位が、部材の鉄筋が降伏していない領域の変形、鉄筋が降伏している領域の変形および固定端で定着された鉄筋の付着破壊による固定端の回転による成分とからなる一質点一自由度系で、横方向荷重のみを受け軸力のない場合を本報告での取扱いの対象とする。支点が運動する構造物の挙動を支点が固定され、自由度に強制力 $-m\ddot{z}$ を加える場合とみなす考えにより、質点の動的釣合は次式で表わされる。

$$m\ddot{x} + R = -m\ddot{z} \quad \dots \quad (1)$$

ここに、 x は支点からの質点の変位、 \ddot{z} は想定した支点の運動の加速度、 m は質点の質量、 R は構造物の復元力で履歴と着目時刻における状態に依存する。(1)式で運動があらわされる構造物の挙動を次の式で挙動があらわされる構造物に置き換えられると仮定する。

$$m\ddot{x} + 2m\omega h\dot{x} + kx = -m\ddot{z} \quad \dots \quad (2)$$

ここに、 h 、 k 、 ω は、それぞれ、着目時刻での減衰定数、剛性ならびに、その時点での減衰がないとした場合の自由振動における円振動数である。

2. 既往の解析手法と本研究の方法

コンクリート構造物の載荷実験において計測される量は、(1)式における加速度および復元力 R であって、それをもとに、(2)式における減衰定数 h を定める方法の概念が、武藤¹⁾、Jacobsen²⁾およびJennings³⁾らによって詳述されている。それらの理論は、一定振幅で定常的に振動し、復元力—変位座標での軌跡が閉合する完全なループ上の1回の周回においての平均的挙動を対象としていると考えられる。一方、GulkanとSozen⁴⁾は、振動台実験における応答記録に対し、任意時間内におけるエネルギーの逸散が地動によるエネルギーに等しいという前提で、次式による substitute damping, β_s なるものを定義した。

$$\int_{t_1}^{t_2} (2m\omega \beta_s \dot{x}) (\dot{x} dt) = \int_{t_1}^{t_2} (-m\ddot{z}) (\dot{x} dt) \quad \dots \quad (3)$$

上記諸理論はいずれも、減衰定数を振動中の最大振幅（またはダクティリティーとして無次元化した量）で表現できる。多質点系への応用例はKappos⁵⁾に見られる。

本研究の方法は次のようにある。先ず6節の方法の載荷実験により地震時応答とみなせる復元力—変位履歴曲線を得る。その履歴曲線を既往の方法^{4), 6)}を参考に4節の方法で模式化する。次いでその模式化したループの任意の位置で動的釣合が(2)式で表されると仮定し、剛性 k と減衰定数 h を既往の方法^{1), 2), 3), 11)}を参考にしつつも4節に述べる新しい方法で推定する。最後に、その k と h を用いた応答解析結果を実験と対照、吟味する。

3. 研究目的

ある一種の構造物に、最大振幅が一定、波形が相似で、時間軸が数種に変化する地盤加速度が与えられた場合の実験による応答を得ること、その応答の要因たるべき剛性 k と減衰定数 h の変化の特徴を洗出し、鉄筋コンク

リート構造物の履歴特性の要因、あるいは損傷の評価の手がかりを得ようとするものである。

4. 復元力 — 変位履歴曲線のモデル化

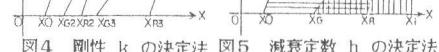
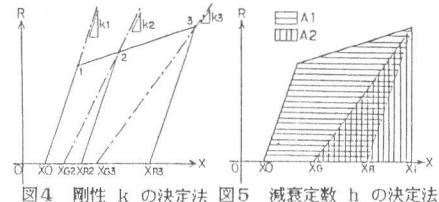
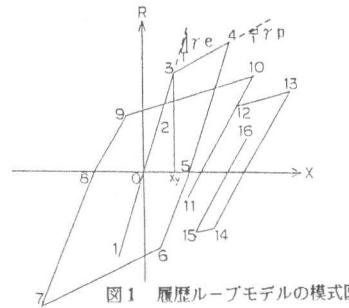
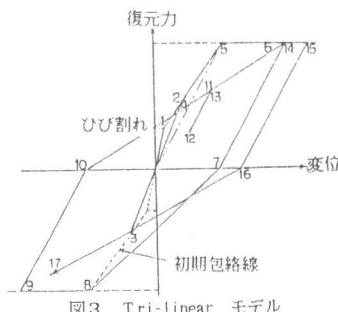
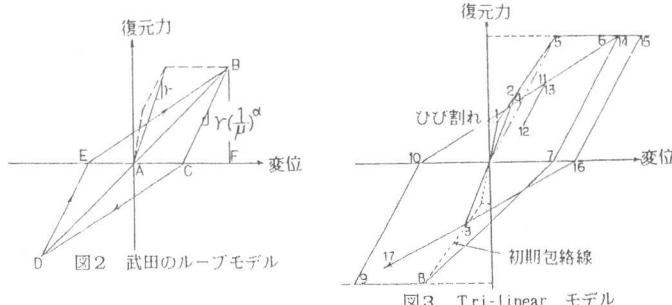
復元力特性の定式化のため、いくつかの支配条件を設定し折線からなる履歴ループのモデル化を行った。この模式図を図1に、またGulkan-Sozen⁴⁾の使用した武田式ループモデル⁷⁾およびDegrading tri-linear⁶⁾方式のループモデルをそれぞれ図2、図3に同時掲載する。本報告のループは、 x 軸上のある点から出発し、 x 軸上の他の点（同一点の場合も有り得る）に到達するまでの半サイクル毎に考える。またあらかじめ交番載荷試験により、初期剛性(r_e)、降伏変位(x_y)、塑性化直後の傾き(r_p)は既知であるものとする。次にループを書かせる為の条件を図1を参照しつつ以下に示す。点0～2までの点ではまだ一度も降伏変位に達しておらず弾性的挙動を示すと思われる範囲であり、その直線の傾きは r_e に等しくする。点3は始発点からの降伏変位に達した点であり、これ以後の傾きを r_p とする。点4はそのループでの最大変位であり応答速度の符号の反転により見つけ出し、以後 x 軸上に戻る点（点5）までを除荷区間とする。その傾きは、点0～3を結ぶ載荷直線と平行(r_e)であるとする。この x 軸上の点（点5）を始発点と置き換え、つぎの半ループに進む。次のこの逆方向のループで用いる傾き r'_e 及び r'_p は、それまでの原点からの最大変位の絶対値と降伏変位の比 μ と r_e 及び r_p との関数で表すことにする。

$$r'_e = r_e / \sqrt{\mu} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

$$r'_p = r_p / \sqrt{\mu} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$\mu = |x_{\max}| / x_y \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

このループでの降伏を示す点6は点5からの変位が降伏変位(x_y)になった点である。以下同様である。



5. 剛性と減衰定数への置き換え

次に剛性 k をそのループ内でどのように定義するかを図4を用いながら述べる。着目するループの始発点を x_0 と置き、弾性的範囲ではループの載荷部分では r_e を剛性 k とする。塑性化域に入った時（点2）では、その点から r_e と平行に降ろした線の x 軸との交点を x_R 、 x_0 と x_R の中点を x_G とした時、点2と x_G とを結んだ直線（図中—・—・—）の傾きを点2での剛性 k_2 とする。除荷時では、そのループの最大変位時の剛性(k_3)と等しい剛性であるという仮説を立てた。一度低下した剛性が復元することはないと仮定し、各ステップで計算された k_i が一つ前のステップでの剛性 k_{i-1} より小さくなったら時だけ k_i を新しい k として採用する。減衰定数 h については、変位 x_i が x_0 からの降伏変位 x_y を越えてない場合には、経験的判断により $h = 0.05$ とし、また塑性化域、除荷時に於てもこの値を下まわらないとする。塑性化域に入った場合、その時の変位を x_i とすれば、 x_0 から x_R に戻る半ループの面積を A_1 とし、 x_G 、頂点、 x_i の3点を結んだ三角形の面積を A_2 として（図5）既報⁸⁾の検討にもとづき、次のようなJacobsen²⁾の表現式を用いることにした。

$$h = 1 / (2\pi) \times A_1 / A_2 \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

除荷時の h は、そのループ内での最大変位時の h と等しいとする。

以上述べてきた取り決めにより定めた k 、 x_G 、 x_i 、 h を用いれば(2)式の代わりに次式を得る。

$$m\ddot{x}_i + 2m\omega h\dot{x}_i + k(x_i - x_G) = -m\ddot{z} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

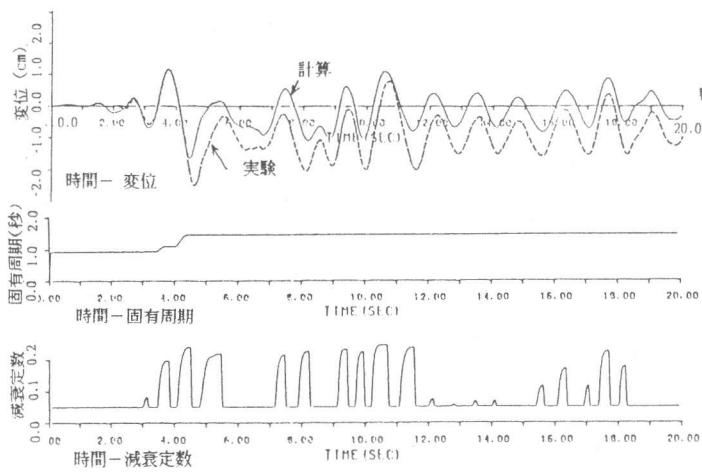


図6.a 最大振幅区間1.0秒

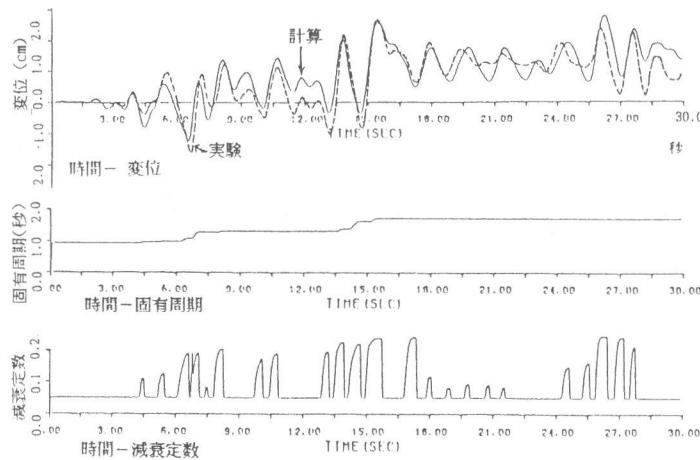


図7.a 最大振幅区間1.5秒

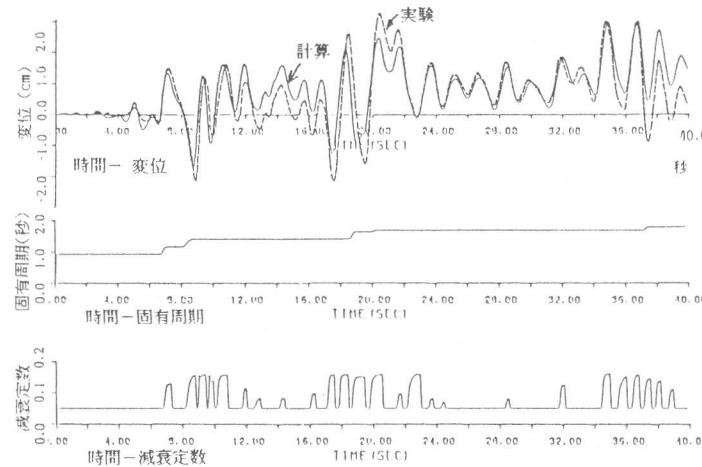


図8.a 最大振幅区間2.0秒

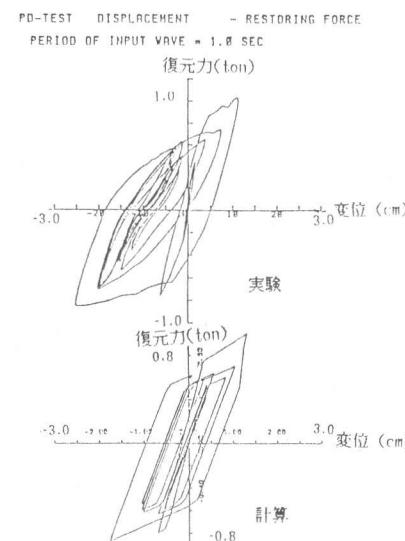


図6.b 最大振幅区間1.0秒

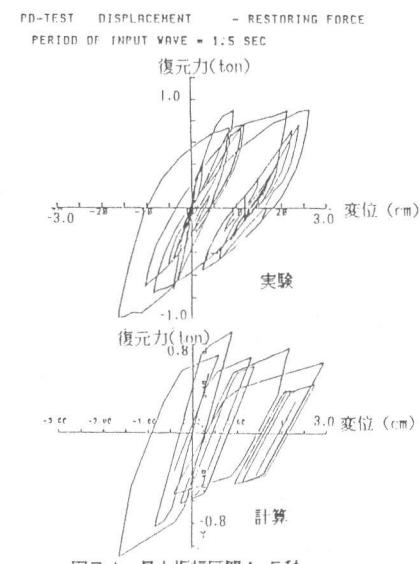


図7.b 最大振幅区間1.5秒

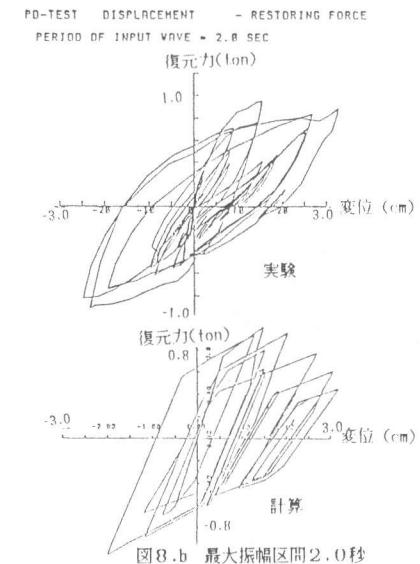


図8.b 最大振幅区間2.0秒

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

(8)式より、 x_i を算出し、次式によりつぎの変位 x_{i+1} を得る。

$$x_{i+1} = 2x_i - x_{i-1} + \ddot{x}_i \cdot dt \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

6. 試験方法

実構造物の約1/10を想定した図9の形状寸法の試験供試体の断面 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ に軸方向鉄筋を四隅に配し(引張鉄筋比1.8%)、横方向鉄筋は $\phi 2\text{ mm}$ の鋼線で、配筋はACI Code 318-77⁹⁾付録耐震補強A.5.11節(A-1)式によった。最大組骨材寸法 10 mm 、コンクリートの材齢7日の圧縮強度は410~440%であった。重量 $1/10 \times 291.7\text{ ton}$ の上部構造物重量が高さ 50 cm に位置し、横方向定加速度 $1/10 \times 0.2\text{ g}$ により固定端が降伏する想定である。実測降伏横荷重 0.8 ton 、降伏時変位 0.6 mm を用い、剛性は 1.33 t/cm 、固有周期は0.94秒となる。

想定地盤加速度はEl-Centro NS成分を相似律により振幅を1/10に、また構造物固有周期0.94秒を考慮して時間軸を二倍した波形を基本とし(最大振幅時ゼロクロッシング区間約1.0秒)、更にその1.5倍および2倍のもの計三種を用いた。

載荷方法は、伯野¹⁰⁾の方法の原理より、復元力実測値Rを(1)式に代入して得られる加速度値(10)式に代入して定められる次の時刻の位置へ、既報⁸⁾の手動載荷型変位制御装置により静的に強制変位を与える方法によった。1ステップの時間区分は、El-Centro地震10秒間の1/500を用いた。

7. 結果および今後の課題

実験による結果と応答計算による予測結果を時刻歴による構造物固有周期の変化と粘性減衰定数の変化の図を合わせて図6.a~8.aに示す。なお、入力波の継続時間が違うにもかかわらず、図では時間軸の長さを同じにとっている。また実験による時刻歴ループと計算によるそれとを図6.b~8.bに、それぞれの入力波別に示す。変位の位相は非常に近い形をしているが、最大変位がやや少なめに出ている。ループモデルが不十分なことがその原因の一つと思われ、今後の課題である。

8. 結論

既往理論による線形剛性と粘性減衰が、構造物の非弾性での変形に伴い変化する様子の規則性を本報告での対象構造物の挙動に合うように定義し、これにより一種類の構造物の三種類の地震入力波に対する固有周期と減衰定数の変化を示し、また応答変位が三種類の入力波に対して同程度の精度により予測できることを示した。

謝辞： 本研究の一部は文部省科学研究費No.59550317によった。この研究は第一著者の昭和59年度都立大学卒業特別研究をもとにしたものである。実験に協力下さった、大学院一年の和田、広中、中村、関、織戸各氏に御礼申し上げる。

参考文献：

1. 武藤(1966)：耐震設計シリーズ4、構造物の動的設計、丸善、昭41初版、昭46第5版、p.185。
2. Jacobsen, L.S., (1960)：“Damping in Composite Structures”, Proc. 2nd WCEE, Tokyo and Kyoto, Japan, July 1960, Vol. II, pp.1029-1044.
3. Jennings, P.C., (1968)：“Equivalent Viscous Damping for Yielding Structures”, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 94, No. EM1, Feb. 1968, pp.103-115.
4. Gulkan, Sozen (1974)：“Inelastic Responses of Reinforced Concrete Structures to Earthquake Motions”, Proc. ACI, V. 71, No.12, pp.604-610.
5. Kappos, A.J., (1984)：“Damping Parameters in Computer-Aided Seismic Analysis of R/C Building”, Proceedings of the International Conference, Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Split, Yugoslavia, 1984.
6. 武藤(1977)：耐震設計シリーズ応用編、構造物の動的設計、丸善、昭52版、p.173。
7. Takeda, Sozen, Nielsen (1970)：“Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes”, Proc. ASCE, V. 96, ST12, pp.2557-2573.
8. 金子、山本、川田、山崎(1984)：鉄筋コンクリート梁の等価剛性と減衰定数の一つの算定方法、第6回コンクリート工学会年次講演会、論文集、pp.697-700。
9. ACI 318-77(1977)：“Building Code Requirements for Reinforced Concrete”。
10. 伯野、四俵、原(1969)：計算機により制御された梁の動的破壊実験、土木学会論文集、No.171, 11月, pp.1-9。
11. 野中、後藤、山崎(1984)：鉄筋コンクリート部材の地震時応答の再現と予測、第39回土木学会年次学術講演会講演概要集、pp.339-340。

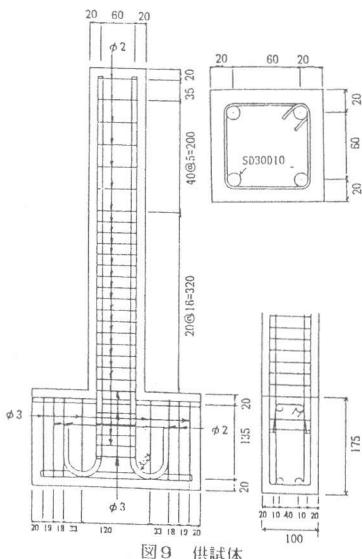


図9 供試体