

強震記録を利用した R. C. 建築物の劣化履歴復元力解析*

DETERIORATING FORCE-DEFLECTION RELATION OF A R.C.
BUILDING FROM STRONG-MOTION SEISMOGRAMS

家村 浩和**・Paul C. Jennings***

By Hirokazu Iemura and Paul C. Jennings

1. 結 言

構造物の耐震設計にあたっては、その耐用年間に何回か来襲すると予期される中小地震に対しては被害なく健全に抵抗し、耐用年間に一度程度と予期される強大地震に対しては少々の構造的被害を受けても人的被害を避けるため最終的な崩壊に至らぬよう配慮するのが合理的であると考えられる。前者の目的の設計には微小振幅での振動試験結果と従来よりの線形振動理論を併用することにより、ほぼ十分な成果を収めうるものと考えられるが、後者の目的の設計には降伏点を越えて破壊に至る構造物の動特性ならびにその地震応答特性を明らかにする必要がある。

この観点から最近特に構造物の非線形領域における実験的・理論的研究が盛んに実施されている。従来よりの解析法のほとんどは、構造部材や要素の静的あるいは動的載荷試験結果を参照して、構造物の復元力特性を比較的単純な bilinear や trilinear さらに色々の曲線でモデル化し、その地震応答を評価して来た^{2), 3), 4)}。ごく最近の実験結果からは強い繰返し荷重による履歴復元力特性の劣化などが報告される一方⁵⁾、損傷を考慮した理論的モデルも提案されている⁶⁾。

しかしながら、実構造物の降伏点を越えた大振幅領域における振動試験の実施が不可能に近いこと、地震により破壊された構造物の応答記録がほぼ皆無に近いことなどの理由から、強震時における実構造物の非線形領域における動特性の解析は非常に困難で、未だ確固たる検証はなされていないのが現状であると言える。

一方強震計の設置は不十分ながらも整備されてきつつ

* 本論文は第28回土木学会年次学術講演会(1973.10)において発表したものに、考察を加えてとりまとめたものである。

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

*** Ph. D. カリフォルニア工科大学教授

あり、地震時における地盤や構造物の振動記録もかなり集積されてきている⁷⁾。これらのデータは地震発生の機構や規模、地中を伝播する波動の特性、さらには構造物の大振幅領域での動特性を知る上で非常に貴重である。つまり合理的かつ十分な強震計網の完備は、地震の発生そのものを強大不規則振動試験とも見なすことができるのである⁸⁾。

1971年2月のサンフェルナンド地震は、Los Angeles 地域の約50の比較的高層の建築物に設置されていた強震計を通して地震応答記録を数多く残した点でも工学的に興味ある地震である⁹⁾。強震計を備えた建築物はいずれも甚大な被害を受けなかったが、そのいくつかは地震時の振動周期が微小振幅の振動試験結果より得られた固有周期よりもかなり長くなるという挙動を示した。この一例としてカリフォルニア工科大学構内のミリカン記念図書館の東西方向の1次振動周期が350galにおよぶ強振動で地震前の振動試験結果のそれより約50%も増加した現象をあげられる。

本研究では、この固有周期増大の原因として構造物の非線形性に注目し、復元力の履歴特性の詳細な検討をその目的とした。すなわち同図書館が1次モードの卓越した振動を示したこと、地下と屋上での強震記録より直接1次モードの劣化型の履歴復元力特性を検出する手法について解析するとともに、1自由度等価線形振動系あるいは履歴振動系としてのモデル化の妥当性を検討した¹⁰⁾。

2. 振動試験結果と強震記録

(1) ミリカン記念図書館の構造概要

1966年カリフォルニア工科大学構内に竣工したミリカン記念図書館は地下1階地上9階のR.C.構造で、その外観を写真-1に示した。南北方向に作用するせん断

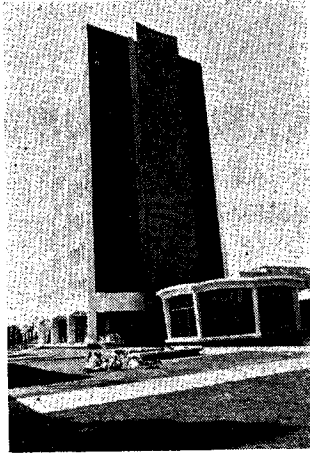


写真-1 ミリカン記念図書館の外観

力は東西両面に設けられた R.C. の壁によって、東西方向のそれは中央に設けられた同じく R.C. のエレベーター塔とそれに連結した階段とにより、おのおの抵抗しうる構造形式となっている。東西の壁面には窓が全くなく、一方南北面には1階当り3個のプレキャストの窓枠パネルがはめこまれ全面窓となっている。したがって東西方向にはややフレキシブル、南北方向にはかなり剛度の高い建築物であるが、その構造形式の詳細はすでに報告されている¹¹⁾。

(2) 地震前後の振動試験結果

J. Kuroiwa と著者の1人は同図書館の造築の最終段階で詳細な振動試験を実施し、基本的動特性を検討した¹²⁾。その結果東西方向の1次固有周期は0.66秒で、起振力の増加により約3%程度の増大を示す非線形性が認められた。1次モードの減衰定数も振幅とともに増大する傾向で、0.7~1.5%程度と R.C. 構造としては比較的小さい値であった。モード形状も1階おきに設置した換振器により測定している。さらに同図書館周辺地盤上での同時観測結果から、基礎のロックンと並進運動が屋上の水平変位応答におよぼす影響はそれぞれ1%と2%以下であることが知られた。このことから振動試験の範囲内では、同図書館がその基礎の部分でほぼ固定された振動をしていたと考えられる。

サンフェルナンド地震直後の比較的簡単な振動試験結果から1次固有周期が0.80秒にまで増加していることが見

出され、強震動による構造物の永久的損傷の存在を暗示した。その後の1972年12月の測定では0.73秒となつて、固有周期の回復現象が報告されている¹³⁾。

(3) 強震記録

同図書館の屋上と地下に設置した2台の強震計(RFT-250)はサンフェルナンド地震による東西・南北・上下の3成分同時加速度を記録した。図-1,2には地下と屋上における東西方向のみの加速度記録とそれぞれを積分して得られた変位記録を80秒間にわたって示した。変位の算出にあたっては、まず加速度記録の読み取りに基づく誤差の範囲内にある長周期成分(15秒以上)を除去してゼロ線の設定を行い、しかる後適正な初期速度・変位を繰返し計算により決定して2重積分を実施した¹⁴⁾。

図-1の地下での加速度記録からその周波数特性の非定常性を見ることができ、すなわち0~15秒の初期の部分では加速度レベルの大きい高周波数の波が卓越しているのに対し、15~40秒の間では加速度レベルの小さな低周波数の波の存在を指摘できる。図-2の屋上での加速度記録を見ると約17秒を境として同図書館の異なった振動性状を指摘できるが、これは入力と考えられる地下の振動が異なった周波数成分を有しているのに対応していると考えられる。すなわち初期の部分では実体波と考えられる周波数の高い入力波¹⁵⁾により同図書館が1次と2次モードの重合した振動をしているのに対し、後半の部分では主に表面波と考えられる低周波数の入力波によりほとんど1次モードのみの振動をしている。特

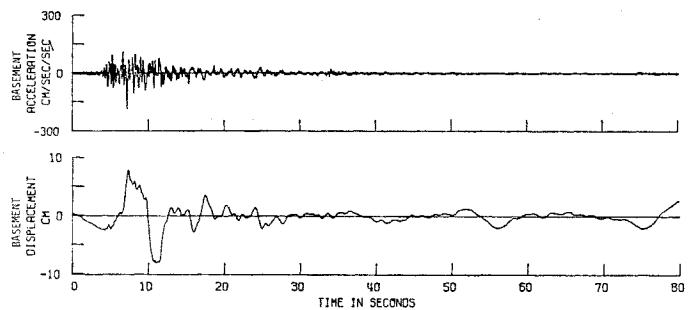


図-1 地下での加速度記録と積分変位

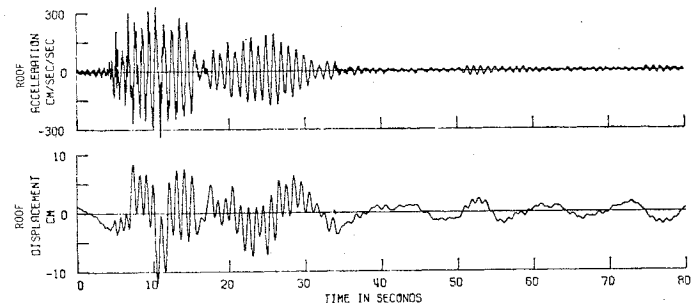


図-2 屋上での加速度記録と積分変位

に後半の部分での応答倍率が非常に大きいことから、1次モードの共振に近い状態が起っていたものと考えられる。図-3の屋上での変位は周期が約1.0秒程度の振動と、周期が比較的長い動きとで構成されている。これは屋上での強震計が振動系の絶対加速度を記録していると考えられることから、それを積分して得られた変位も周期の比較的長い地盤の動きと構造物の相対的な固有振動との重合を示している。

強震計に基づくこれらの記録から同図書館の強震による振動特性として次の2点を指摘できる。

(1) 地震時における東西方向の1次モードの振動周期は約1.0秒で、地震前の振動試験結果0.66秒より約50%も増加している。

(2) 振動の初期の部分において2次モードの振動成分も見られるが、それはさほど大きくなく、全体としては1次モードの卓越した振動を示している。

これらの観察から2次以上の高次モード成分を除去すれば、同図書館を軟化履歴復元力特性を有する1自由度振動系と見なしうることを指摘でき、さらに詳細な解析・検討の工学的意義すなわち本研究の目的を見出すことができると考えられる。

3. 強震記録解析

(1) 相対変位の算出

構造物の復元力は一般にその相対的な変形により引き起されるので、ミリカン記念図書館の履歴復元力特性を解析しようとするとき、まず同構造物の基礎に対する相対の変形量を評価する必要がある。屋上と地下での東西方向水平変位記録の時間的対応関係さえ明確になれば、同図書館の相対変位量は両者の単純な差として得られる。カリフォルニア工科大学では幸い早くより同時強震記録の重要性を認識し、電話線ケーブルを利用して同図書館の屋上と地下の他2か所に設置された計4台の強震計を同時に始動させさらにそれらに共通の時刻信号を刻む観測システムを地震前に完備していた¹⁹⁾。同システムは地震中完全に作動し、相対変位の算出が可能となった。

このようにして求めた相対変位記録を図-3に示した。同図より明らかなように、相対変位応答はほぼ1次モードのみの非常に滑らかな応答曲線となっており、振幅と振動周期がゆるやかに変動している傾向を認められ

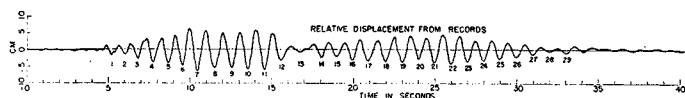


図-3 加速度記録より算出した相対変位

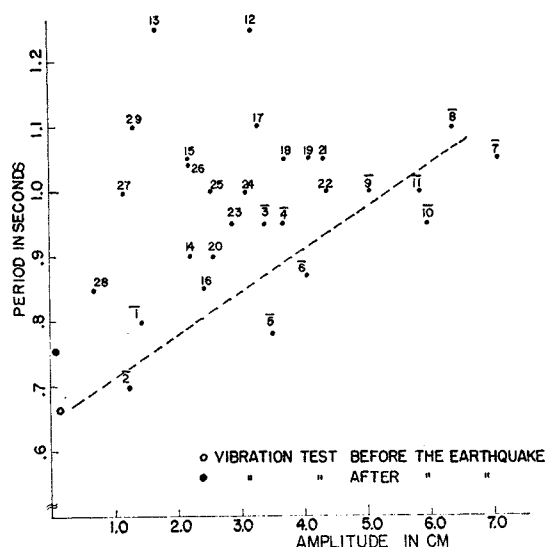


図-4 応答振幅と振動周期

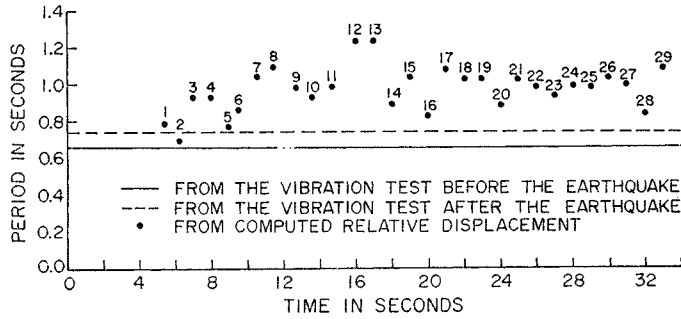
る。なお40秒以後の応答は非常に小さいので省略してある。

(2) 応答振幅・継続時間と振動周期

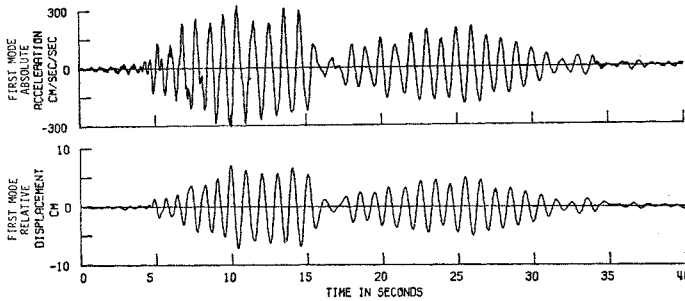
本項では1次モードの振動周期が応答振幅あるいは継続時間の影響をどの程度受けるかを、比較的簡単な手法で調べる。

まず図-3中に番号を付した各振動サイクルの周期と振幅を読み取り、対応する番号とともに図-4にプロットした。同時に地震前後の振動試験結果をも示した。各点は異常なほどのちらばりを見せ、明瞭な関係を見出すのは困難である。しかし上にバーを付した1~11番の各点と地震前の試験結果とには、振幅と周期との間にほぼ直線的関係が見られる。この直線関係は、構造物の剛度が一般的にその固有振動数の2乗と比例の関係にあることを考慮すれば、同図書館の剛度が振幅の2乗に反比例して減少したことを示している。番号12~29の各点は振幅の大小にかかわらず約1.0秒前後にちらばっているが、すべての点は番号1~11の各点よりも周期の長い方に存在する。この結果は同図書館が最大応答を示した約15秒前後までである軟化形の履歴系として振動し、その後さらに剛度の低い振動系に劣化して行ったことを暗示している。この現象は同図書館の固有周期が地震後長くなり剛度の劣化を示していることともよく一致する。

振動周期の非定常性をさらに詳しく調べるために、継続時間軸上でプロットしたのが図-5である。ここでも各点は大きなちらばりを見せているが、振動周期は約15秒まで漸増の傾向である。番号



図—5 継続時間と振動周期



図—6 地震応答記録より算出した基本モード成分

12・13の両点は応答振幅が比較的小さいにもかかわらず異常に大きな値を示しているが、この原因として、同時刻で同図書館が入力地震動の影響を強く受け必ずしも固有周期で振動しなかったことなどが考えられる。その後ほとんどの点は1.0秒前後にちらばりやや漸減の傾向にある。これらの傾向は M.D. Trifunac・F.E. Udvardia が屋上と地下の加速度記録の局所フーリエスペクトルの比のピークを用いて求めた¹⁷⁾ 1次モードの振動周期の非正常性とよく一致している。

(3) 変位-復元力の履歴関係の再現

本項では前項で指摘した同図書館の非正常な劣化履歴復元力特性を詳細に検討するため、相対変位と絶対加速度の履歴曲線の利用を提案する。周知の1自由度系の運動方程式は次式のように書き改められる。

$$F(x, \dot{x}) = -M(\ddot{x} + \dot{x}) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $F(x, \dot{x})$ は相対変位 x および相対速度 \dot{x} の関数として得られる全復元力、 M は振動質量、 \ddot{x} は入力加速度である。上式より明らかなように、全復元力は絶対加速度の逆符号に比例している。つまり同図書館の履歴復元力特性は、図—2の絶対加速度と図—3の相対変位との同一時刻における値を2つの直交軸上にプロットした履歴曲線を図示することにより再現できることがわかる。

このようにして描かせた履歴曲線の初期の部分(10秒前後)は、1次モードの履歴復元力特性に周期の短い振

動が付加した複雑なようすを示した¹⁾。これは、図—2の加速度記録に短周期成分が含まれていることによるものであり、その原因としては2次以上の高次モードの影響などが考えられる。本研究では強震計が地下と屋上の2か所だけに設置されていたという制約などから、1次モードのみに限って履歴復元力特性の時間的劣化過程を詳細に検討することを目的としているため、2次以上の高次振動モードの影響を除去した履歴曲線を求めるのが好ましい。このため G.W. Housner・N.C. Tsai および著者の1人により提案された low-pass フィルター¹⁸⁾を用いて、図—2の絶対加速度記録から2次振動以上の高振動数成分を除去し、しかる後相対変位を再計算した結果を図—6に示した。高振動数成分はほとんど消去されているが、特に2次モードの影響の大きい5~8秒の区間においては、必ずしも完全ではない。これは用いたフィル

ターの濾波性能が周波数領域で step-function 的に変化しないためである。

図—6の1次モードの絶対加速度と相対変位の履歴曲線を2秒間隔ごとに図—7に描かせた。同図書館が振動し始めた0~4秒の区間では、応答振幅も小さく明確な履歴ループは認められない。式(1)の関係より履歴曲線の勾配は復元力の剛度であり、建造物の固有振動数の2乗にほぼ等しい。2~4秒の履歴曲線の勾配は約90/sec²で、地震前の固有周期0.66秒にほぼ等しい。このことは同図書館が地震前の固有周期で振動し始めたことを示している。

4~6秒にわたる履歴曲線の勾配は2~4秒のそれとほとんど変わらないが、100 gal を越える振動のため変位の負側にかなり大きな履歴ループの発生が見られる。その後絶対加速度は増加の途中で急激な低下を示しており、これはおそらく強振動による構造要素の突発的な変化、たとえば窓枠パネル間のモルタルのひび割れなどに基づくものと推定される。6~8秒に至ると応答は200 gal を越え、複雑な振動とともに非常に大きな履歴ループが発生している。4~6秒のそれと比較するとループ全体が剛度の低い方へとやや回転しさらにその面積が増大していることがわかる。周期の短い振動が1次モードの履歴復元力ループにそって見られるが、これは前述の高振動数成分の不完全な濾波に基づくものである。

8~10秒においても周期の短い異常な振動が見られるが、履歴ループの剛度の減少が明確となり、その面積は

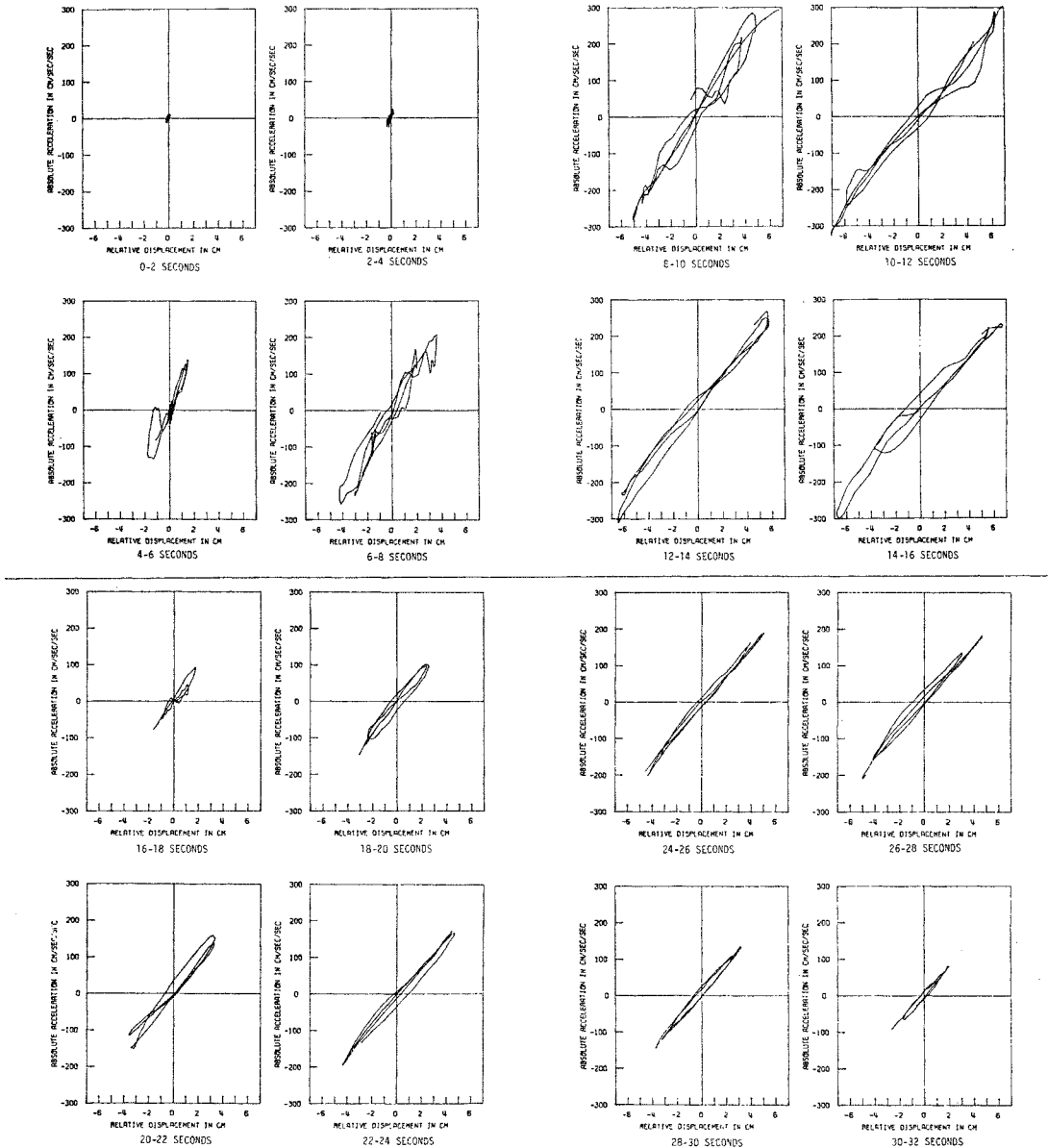


図-7 基本モード記録の絶対加速度と相対変位の履歴曲線

依然として大きい。10~12 秒に至ると 300 gal 以上の激振動となり、ループの傾きは約 40gal/sec^2 とほぼ固有周期 1.0 秒に対応する剛度にまで軟化してきている。ループの面積はやや減少傾向にある。最大応答 (350 gal) を経験した直後の 12~14 秒では、履歴面積の顕著な減少を見い出せ、同図書館のエネルギー吸収能力が激震のためかなり破壊されたものと考えられる。またループそのものは非常に滑らかになっているが、1 次モードの卓越した振動性状となってきたためである。

14~32 秒区間の各履歴ループは、応答レベルの低下にもかかわらず、以前と比較して低剛度・小面積の一定

した動特性を示しており、強振動により同図書館の剛度や減衰性能に永久的な損傷の発生したことを指摘している。

応答レベルが約 130 gal 程度の 4~6 秒の履歴ループと 28~30 秒のそれとを比較すると、剛度の低下がループ全体の時計回りの回転となって現われている。また約 200 gal の応答レベルである 6~8 秒のループと 24~26 秒のそれとを比較すると、減衰性能の低下が履歴面積の減少となって現われていることが明瞭である。

(4) 等価固有円振動数と等価減衰定数

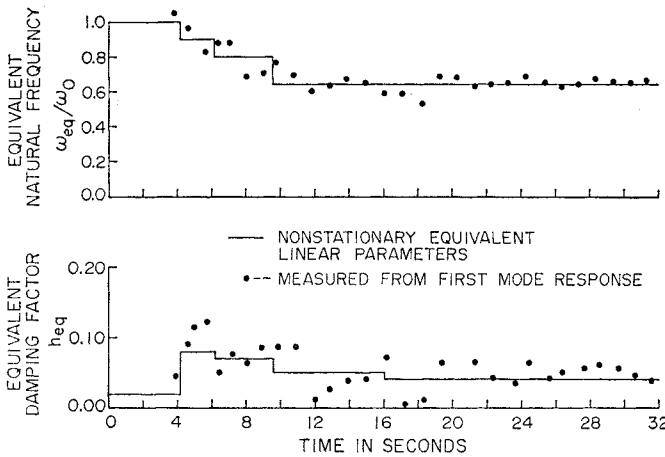


図-8 等価固有円振動数と等価減衰定数

本項では同図書館の非定常な動特性を数値的に検討するため、1次モードの各サイクルの等価固有円振動数 ω_{eq} と等価減衰定数 h_{eq} の両者を時間軸上で評価する。前項での解析より、復元力の剛度すなわち履歴ループの勾配はその時点での振動周期にほぼ対応しているので、剛度の劣化の非定常性は図-5 に示した時間軸上の振動周期の変動でもって推定できる。初期固有円振動数 ω_0 との比を再プロットしたのが図-8 である。ただし本研究では、次に定義する等価減衰定数が高々 13% 程度であったことから、振動周期と等価固有周期はほぼ等しいものと見なしている。

エネルギー吸収能力についても同様の数値的解析を行うため、等価減衰定数 h_{eq} を次の定義により算出した。すなわち履歴面積による 1 サイクル当りの減衰エネルギーと等価減衰定数によるそれとが等しくなるようにおく¹⁹⁾

$$\oint F(x, \dot{x}) dx = \oint 2 h_{eq} \omega_{eq} \dot{x} dx \dots\dots\dots (2)$$

上式右辺の評価には、振幅 $X_0(t)$ と位相角 $\phi(t)$ の時間的变化が比較的ゆるやかであるとの次式の仮定を用いた (slowly varying parameter method)。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= -\omega_{eq} X_0(t) \sin[\omega_{eq} t + \phi(t)] \\ \frac{dX_0(t)}{dt} &\cong 0, \quad \frac{d\phi(t)}{dt} \cong 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

式 (2)、(3) から等価減衰定数 h_{eq} は結局次式となる。

$$h_{eq} = \frac{1}{2\pi\omega_{eq}^2 X_0^2} \oint F(x, \dot{x}) dx \dots\dots\dots (4)$$

各サイクルについて求めた h_{eq} を図-8 にプロットしたが、相対変位と絶対加速度とのごくわずかの位相誤差 (0.02 秒程度) が履歴面積にかなり大きく影響し、数値的に精度の高いものとは言えない。しかし地震応答が最大値に至る 4~10 秒の過程では h_{eq} が 8~13% にまで増大し、応答振幅が減少するその後の区間では漸減の傾

向にあることを指摘できる。

図-8 に示した ω_{eq} と h_{eq} の変動傾向を、後藤と著者の 1 人が逐次等価線形化解法を用いて評価した bilinear 履歴系の非定常地震応答のそれ¹⁹⁾と比較すると、 ω_{eq} が地震動の終了後も地震前の値 ω_0 に戻らない点を除いて、全体的傾向はよく一致している。このことは同図書館を、その剛度と減衰性能が劣化して行く履歴振動系と見なしうることを示しており、詳細なモデル化が望まれる⁹⁾。

同図書館の地震による損傷としては、プレキャストコンクリート窓枠パネルおよびそれらの間のモルタルにひびわれが見られた。建築中の簡易な振動試験から、窓枠の設置が構造物全体にかなりの剛度を付加したことが知られているので¹²⁾、そのひび割れの影響が地震時に大きく出ているものと考えられる。

志賀らは R.C. せん断壁の動特性を実験的に調べたが、その主な結果として、1) 壁のひびわれと最大復元力はせん断角 (水平変位/壁高) がそれぞれ約 0.5×10^{-3} と 5×10^{-3} の付近で起こった、2) 復元力の剛度の低下は最大で約 50~70% であった、3) 履歴消費エネルギーと弾性ひずみエネルギーとの比で求めた減衰定数は 2~3 サイクルの強載荷重で 15% から 4% に減少した、ことなどを報告している⁵⁾。一方これらに対応する同図書館の地震時の動特性として、1) 最大せん断角は約 2×10^{-3} 、2) 剛度の低下は約 50~60%、3) 減衰定数は約 10% から 4% 程度にまで減少したことなどをあげられる。これらの比較より、同図書館の窓枠パネルは損傷こそ軽微であったが、強い水平外力下のせん断壁とほぼ同様の挙動をしたものと考えられる。

4. 基礎モードのモデル化

(1) 基礎モードの等価 1 自由度化

地震前の振動試験より得られた固有周期と減衰定数を用いて予備的な線形応答計算を実施したところ、位相・振幅の両面で記録との近似的な一致は見られなかった。したがって本節では前節で述べた地震応答記録の解析法の妥当性のみならず、構造物の弾性限を越えた非定常な動特性が応答におよぼす影響について検討するため、各種振動モデルを提案しそれらの地震応答記録の再現性を数値応答計算により比較・検討する。

本研究では 1 次モードの非定常な動特性についてのみに検討していることから、モデルとしては 1 自由度振動系を採用する。そのためまず 10 自由度せん断振動系と考

えられる同図書館の1次モードに対する入力地震動の影響係数 a_1 をモード解析から求めると、

$$a_1 = \frac{\{\phi_1\}^T M \{1\}}{\{\phi_1\}^T M \{\phi_1\}} \dots \dots \dots (5)$$

ここに $\{\phi_1\}$ は振動試験よりの1次モードベクトル、 M は質量マトリックスで、本例では次式で表わされる¹²⁾。

$$\left. \begin{aligned} \{\phi_1\}^T &= \{1.00, 0.87, 0.74, 0.62, 0.51, 0.40, 0.28, 0.20, 0.11, 0.04\} \\ \{1\}^T &= \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\} \\ M &= \begin{bmatrix} 1.0 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.94 & 0.88 \\ & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.94 & 0.88 \\ & & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.94 & 0.88 \\ & & & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.94 & 0.88 \\ & & & & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.94 & 0.88 \\ & & & & & 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.94 & 0.88 \\ & & & & & & 0.75 & 0.75 & 0.94 & 0.88 \\ & & & & & & & 0.75 & 0.94 & 0.88 \\ & & & & & & & & 0.94 & 0.88 \\ & & & & & & & & & 0.88 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (6) \end{aligned} \right\}$$

式(5),(6)より $a_1=1.44$ をうる。つまり地下での加速度記録を1.44倍したものを1自由度せん断振動モデルへの入力として用いれば、同図書館の1次モードの屋上での応答を等価的に評価できることになる。ただし本研究では、非線形領域においても1次モードの形状は変化しないと仮定し、 a_1 を一定値と見なして解析を進めた。

(2) 定常等価線形モデル

本項で用いた定常等価線形モデルの固有周期としては、図-5に示した振動周期の平均値として1.0秒を選び、減衰定数は図-8より5%を用いた。地震前の振動試験結果(0.66秒, 1.5%)と比較すると、周期で50%減衰定数で230%の増加となっている。このモデルが修正された地下加速度記録を入力として受けた場合の絶対加速度応答計算結果を図-9に示した。また計算結果に対応する地震記録の1次モード成分(図-6)をも同時に破線で示した。両者を比較すると振動の前半(0~15秒)での位相と振幅の差が大きい。約10秒前後で、応答記録は増大しつつ最大値を示しているが、計算結果は減少している。この差の原因として、同図書館の振動周期が最大応答時以前においては1.0秒よりも短く短周期成分の卓越した入力とより共振しやすかったことが考えられる。両者の差は振動の後半でかなり小さくなり、特に位相は優れた一致を示している。この部分での等価線形のモデル化はほぼ妥当であろうと考えられるが、これは図-7の履歴ループが非常に滑らかであったこと、さらに図-5の振動周期、図-8の減衰定数がそれぞれほぼ一定した値を示したこととよく対応している。

本項での計算結果から、定常等価線形モデルは構造物の動特性が大きく変化しない部分、すなわち同図書館について言えば最大応答を経験した後、振幅が減少して

行く過程においてのみ有力であることがわかる。最大応答に至る過程では、動特性の時間的変化ならびにそれらが応答におよぼす影響は著しく、さらに詳細なモデルの検討を要する。ただ構造物の地震応答の概略、たとえば最大応答の大体の推定値を知りたいとする立場からは、このモデルも簡易であるがゆえに意義あるものと考えられる。

(3) 定常 bilinear モデル

本項では履歴応答解析に従来よりよく用いられている、形状パラメーターが時間的に変化しない bilinear 履歴振動系による同図書館のモデル化について検討する。

図-7に示した履歴曲線の形状を参照し、さらに図-8に示した減少度の大きい ω_{eq} に対して比較的増加度の小さい h_{eq} の変動傾向を、後藤と著者の1人が求めた bilinear 履歴系の調和波応答解¹⁹⁾と比較すると、モデルとしては降伏変位が大きくてしかも降伏後の剛度の非線形性も大きい完全弾塑性系に近い履歴形状よりはむしろ、降伏変位が小さく非線形性も比較的小さな履歴形状が適していると考えられる。両履歴形状の比較は予備的な履歴応答計算の段階でも実施し、後者の妥当性を確かめた。ただしここで用いている降伏変位とは、同図書館全体の非線形挙動を説明するためのモデルに対しての用語であり、構造要素たとえば柱などの直接的な降伏点を意味していないことを付け加えておく。

本項で用いた bilinear モデルを図-10に示したが、そのパラメーターの選定にあたっては、まず初期の剛度が地震前の振動周期に一致するよう $90/sec^2$ とし、降伏後の剛度は地震時の卓越周期1.0秒に対応する $39/sec^2$ とした。じん性率が大きくなれば bilinear 系全体の振

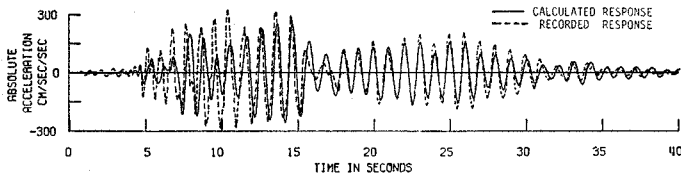


図-9 定常等価線形モデルの絶対加速度応答

動周期は降伏後の剛度のみで決定される固有周期の値に近づくからである²⁰⁾。降伏変位の選定にあたっては、系のじん性率が大きくなり、しかも比較的小さな履歴減衰を与えるよう、振動試験中の最大変位よりわずかに大きな程度の0.25 cmとした。このほか振動試験結果から得ら

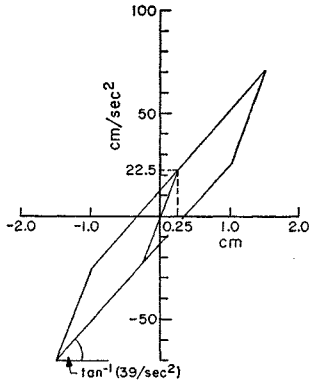


図-10 定常 bilinear モデル

れた2%の粘性減衰を付加した。

修正された地下加速度記録入力に対するこのモデルの応答計算結果と、対応する記録(図-6)を同時に図-11に示した。10~15秒間の位相を除いては両者の一致が非常に悪い。図-12に示した4~6秒の定常モデルの全復元力の履歴応答曲線と、対応する図-7のそれとを比較すると、モデルの復元力剛度が低過ぎ、位相誤差の原因となっていることがわかる。12~14秒間の復元力曲線を比較すると、モデルの剛度(図-12)は観測値(図-7)とほぼ等しいが、履歴面積が大き過ぎ、したがって応答レベルが低くなっていることを把握できる。22~24秒間の応答が非常に小さい原因として、モデル

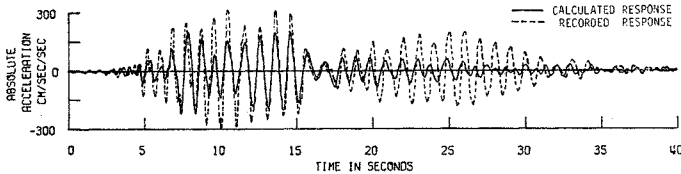


図-11 定常 bilinear モデルの絶対加速度応答

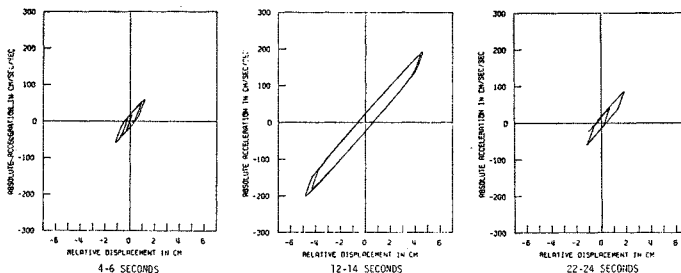


図-12 定常 bilinear モデルの履歴応答

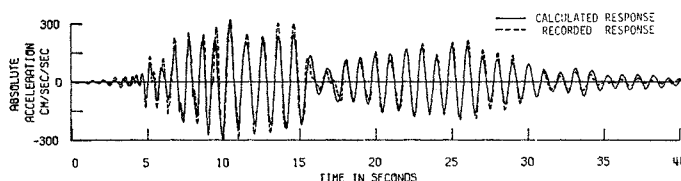


図-13 非定常等価線形モデルの絶対加速度応答

の剛度・履歴面積がともに大き過ぎることを指摘できる。

本項での検討から、従来よりの定常 bilinear モデルによる同図書館の地震応答記録の再現は困難であり、強振による損傷過程すなわち剛度と履歴減衰能力の劣化を反映する非定常モデルの解析が必要となる。

(4) 非定常等価線形モデル

本項では地震動の継続時間中の数箇所の時刻でそのパラメーター (ω_{eq} , h_{eq}) を変える非定常等価形モデル¹⁹⁾を採用し、地震応答記録との一致がどの程度改良されるかを検討する。このモデルの採用は図-8に求めた等価線形パラメーターの解析精度を検討するとともに、それらの時間的変動が応答に及ぼす程度を測定する上で意義あるものと考えられる。

地震前の振動試験と図-8の解析結果とより、モデルの等価固有円振動数 ω_{eq} と等価減衰定数 h_{eq} を図-8の実線で示すように階段状に4回にわたって変化させた。応答計算途中の ω_{eq} の変更、すなわち復元力の剛度の変更にあたっては、塑性変形が生じないように相対変位が0となる時刻を選んで実施した⁴⁾。

このモデルの応答計算結果と地震記録の1次モード成分を図-13に示したが、両者の値は前述の2定常モデルとは比較にならないほどよく一致している。継続時間の全領域において位相と振幅の一致が見られることは、

地震応答記録より直接解析・算出した $\omega_{eq} \cdot h_{eq}$ の本研究での評価法の妥当性をも立証している。このことより同図書館の損傷の結果と考えられる剛度の劣化ならびに減衰能力の変化が地震応答におよぼす影響は著しく、降伏点を越えると予期される今後の地震応答解析全般にわたって、十分配慮されねばならないものと考えられる。同図書館について言えば、等価減衰定数は応答が最大値を示す時刻付近までは増加しその後は減少して行き、等価固有円振動数はある一定値に単調減少して行く傾向をそれぞれ示した。

(5) 非定常劣化 bilinear モデル

本項では前項で示した等価固有円振動数、等価減衰定数の継続時間依存性を考慮して、その形状が時間とともに軟化する非定常劣化 bilinear モデルを提案する。応答計算にあたっては、図-14に示した4種のモデルを継続時間帯によって使いわけた。剛度と減衰能力の劣化

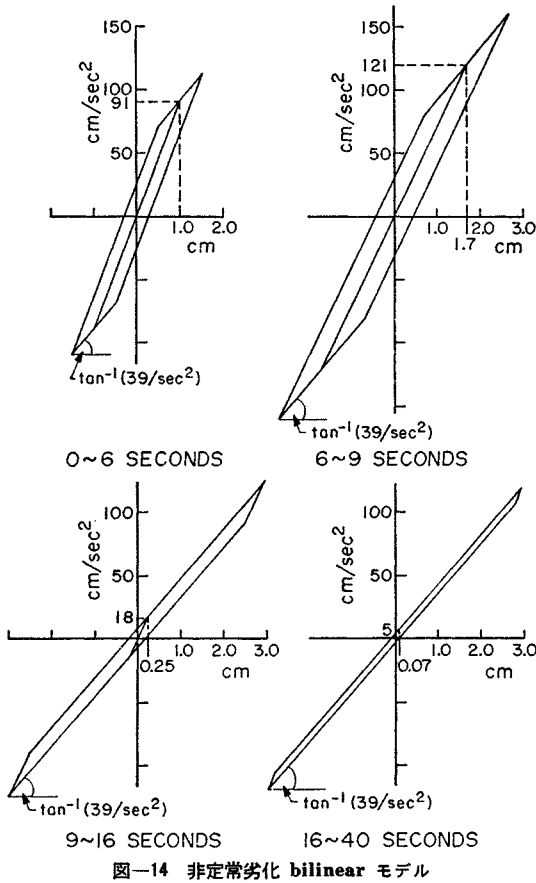


図-14 非正常劣化 bilinear モデル

は、降伏前の初期剛度の減少と降伏変位の低下により表現されるようにした。塑性域の剛度は同図書館の振動周期が1.0秒に漸近する傾向を示したため $39/\text{sec}^2$ なる一定値とした。同図より明らかなように、履歴全体は剛度の低い方へと回転しさらにその面積も減少するという劣化 bilinear モデルで、同図書館の損傷過程を表示している。

応答計算途中での履歴モデル間の遷移にあたっては、変位-復元力関係が連続的かつ比較的滑らかに行くよう、剛度の変更は相対変位が0の時刻で、降伏変位の変更は遷移前後の両履歴モデルの交点でそれぞれ実施した。このモデルの応答計算結果と記録の1次モード成分を図-15に同時に示した。同図より両者の値は8秒前後の二、三のピークを除いて、位相・振幅ともよく一致している

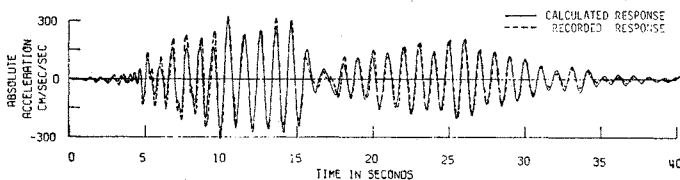


図-15 非正常劣化 bilinear モデルの絶対加速度応答

ことがわかる。この結果は同図書館の復元力特性が、図-14に示した劣化履歴モデルとほぼ同様の傾向であったことを指摘している。図-16には本項で用いた非正常劣化 bilinear モデルの履歴応答計算結果を示した。対応する地震記録からの履歴曲線(図-7)と比較すると、両者の値も6~8秒の区間を除いて比較的良好一致している。この結果から、構造物の非正常な復元力特性は相対変位と絶対加速度との履歴曲線よりかなり正確に推定できることが知られた。なお8秒前後の記録と計算結果との差は、さらに詳細な非正常モデルを導入することにより消去できるものと考えられるが、同図書館の履歴復元力特性の劣化過程の概略は本解析により十分把握できたものと考えられる。

5. 結 論

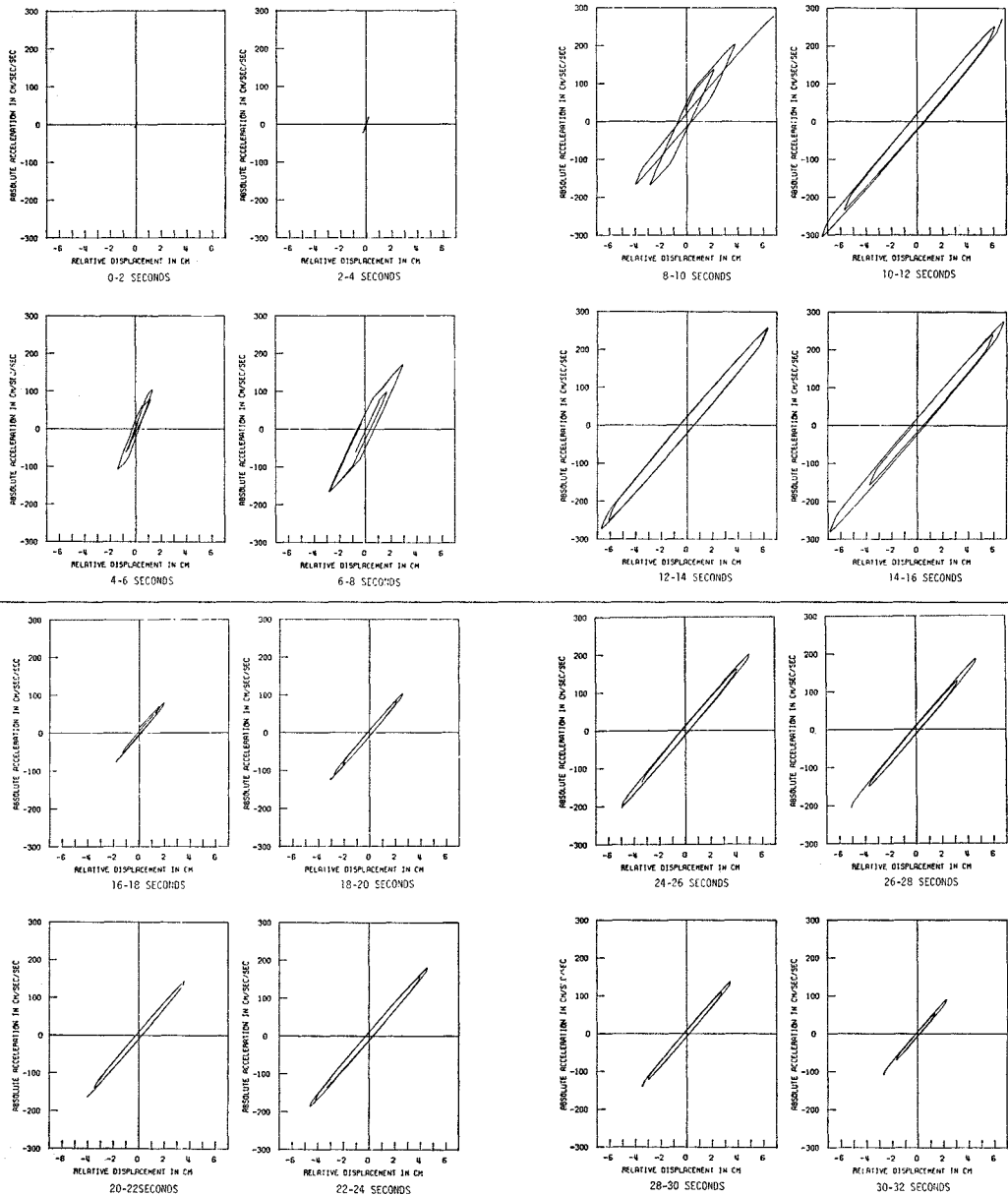
本研究ではカリフォルニア工科大学構内のミリカン記念図書館のサンフェルナンド地震応答記録と地震前後の振動試験結果とから、地震による R.C. 構造物の動特性の時間的劣化過程を解析する手法について述べるとともに、各種振動モデルを設定しそれらの妥当性について比較する一方、記録解析法の精度についても検討したが、主に得られた結論は次のとおりである。

(1) 同図書館の地下と屋上にあらかじめ連結して設置されていた2台の強震計の同時記録から、相対変位の算出が可能となった。この相対変位と絶対加速度との履歴曲線を描いたところ、変位-復元力の履歴と等価な関係にあることが知られ、R.C. 構造物の非正常な動特性を解析する上で有力な手法となりうることがわかった。

(2) 地震前後の振動試験と地震記録の解析結果から、強震による同図書館の動特性の劣化が指摘された。地震前には1次固有周期0.66秒、減衰定数1.5%であったが、地震動による最大応答の時刻付近ではそれぞれ1.0秒、10%にまで増加し、その後前者は継続時間中ほぼ一定であったが、後者は約4%にまで漸減した。地震直後の振動試験では0.80秒、2%で、さらに約1年半後には0.73秒、2%といくぶん回復の傾向が見られた。

(3) 強震による同図書館の動特性の劣化の原因としては、窓枠パネルおよびそれらの間のモルタルに発生したひびわれなどを指摘できる。志賀らによるせん断壁の破壊実験結果との比較より、構造物の動特性の劣化過程に多くの類似性を見出すことができた。

(4) 同図書館の1次モードの動特性を、定常等価線形・定常 bilinear・非定常等価線形および非正常劣化 bilinear



図一六 非正常劣化 bilinear モデルの履歴応答

の4種類の1自由度振動系でモデル化し、地震記録の再現性について検討した。その結果従来より用いられているパラメーター一定の定常モデルでは、ごく一部の時間帯を除いて記録との十分な一致は得られないことがわかった。一方非正常モデルの計算結果は位相・振幅とも記録ときわめてよい一致を示し、地震中における R.C. 構造物の動特性の劣化がその応答におよぼす影響の大きいことを立証することができた。

本研究では、強震計の設置が地下と屋上の2箇所のみであったことなどの理由から、等価1自由度振動系とし

ての解析のみに終わったが、同図書館を非正常非線形多自由度系と見なして解析を進めるためには、各階の同時記録が最低限必要となり、連結した強震計のよりいっそうの設置が望まれる。

謝辞：地震記録の解析にあたって有益なご助言・ご討議を頂いたカリフォルニア工科大学 D.E. Hudson 教授・M.D. Trifunac 助教授ならびに本文投稿にあたってご助言下さった京都大学工学部 後藤尚男教授・亀田弘行助教授に感謝の意を表する次第である。

なお本研究は著者の1人家村がロータリー財団大学院課程奨学金を受けカリフォルニア工科大学留学中に、同

大学および米国 National Science Foundation からの研究費援助を受けて実施されたことを付記する。

参考文献

- 1) 家村浩和・P.C. Jennings : 9階RC構造物のサンフェルナンド地震による履歴応答解析, 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集第1部, I-247, 1973, 10.
- 2) Umemura, H., Aoyama, H., and Takizawa, H. : Analysis of the Behavior of Reinforced Concrete Structures during Strong Earthquakes Based on Empirical Estimation of Inelastic Restoring Force Characteristics of Members, Preprint No. 275, Proc. of 5 WCEE, Rome, 1973.
- 3) Jennings, P.C. : Earthquake Response of a Yielding Structure, Journal of EM, ASCE, Vol. 91, EM 4, August, 1965, pp. 41-68.
- 4) 後藤尚男・家村浩和 : 強震時における1自由度系の塑性変形に関する考察, 土木学会論文報告集, No. 184, 1970, 12, pp. 57-67.
- 5) Shiga, T., Shibata, A., and Takahashi, J. : Experimental Study on Dynamic Properties of Reinforced Concrete Shear Walls, Preprint No. 142, Proc. of 5 WCEE, Rome, 1973.
- 6) Iwan, W.D. : A Model for the Dynamic Analysis of Deteriorating Structures, Preprint No. 222, Proc. of 5 WCEE, Rome, 1973.
- 7) たとえば Strong Motion Earthquake Accelerograms, Uncorrected Data, Vol. I, Part A, Report EERL 70-20, California Institute of Technology, July, 1969.
- 8) Hudson, D.E. : Dynamic Properties of Full-Scale Structures Determined from Natural Excitations, Dynamic Response of Structures, Edited by G. Herrman and N. Perrone, Pergamon Press, 1972, pp. 159-177.
- 9) Jennings, P.C., Edited : Engineering Features of the San Fernando Earthquake, Report EERL 71-02, California Institute of Technology, June, 1971.
- 10) Iemura, H. and Jennings, P.C. : Hysteretic Response of A Nine-Story R.C. Building during the San Fernando Earthquake, Report EERL 73-07, California Institute of Technology, October, 1973.
- 11) Kuroiwa, H. : Vibration Test of a Multistory Building, Report EERL, California Institute of Technology, June, 1967.
- 12) Jennings, P.C. and Kuroiwa, H. : Vibration and Soil-Structure Interaction Tests of a Nine-Story R.C. Building, Bull. of Seismological Soc. of Am., Vol. 58, No. 3, June, 1968, pp. 891-916.
- 13) Udawadia, F.E. and Trifunac, M.D. : Time and Amplitude Dependent Response of Structures, Report EERL, October, 1973.
- 14) Strong-Motion Earthquake Accelerograms, Corrected Accelerograms and Integrated Ground Velocity and Displacement Curves, Vol. II, Part A, Report EERL 71-50, September, 1971.
- 15) Trifunac, M.D. : Stress Estimation for the San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971 : Main Event and Thirteen Aftershocks, Bull. of Seismological Soc. of Am., Vol. 62, No. 3, June, 1972, pp. 721-750.
- 16) Keightley, W.O. : A Strong-Motion Accelerograph Array with Telephone Line Interconnections, Report EERL 70-05, California Institute of Technology, September, 1970.
- 17) Udawadia, F.E. and Trifunac, M.D. : Ambient Vibration Tests of Full-Scale Structures, Preprint No. 178, Proc. of 5 WCEE, Rome, 1973.
- 18) Jennings, P.C., Housner G.W. and Tsai, N.C. : Simulated Earthquake Motions, Report EERL, California Institute of Technology, April, 1968.
- 19) Goto, H. and Iemura, H. : Linearization Techniques for Earthquake Response of Simple Hysteretic Structures, Proc. of JSCE, No. 212, April, 1973, pp. 109-119.
- 20) 後藤尚男・家村浩和 : 等価減衰定数に関する1,2の考察, 第11回地震工学研究発表会講演概要, 1971.7, pp. 83-86. (1974.3.2・受付)