

京都大学大学院 学生員 ○ 家村浩和
カリフォルニア工科大学 P.C.Jennings

1. まえおき 1971年2月米国カリフォルニア州でのサンフェルナンド地震は土木・建築構造物に莫大な被害を及ぼしたが、他方では各地に設置された強震計網を通して数多くの貴重な記録を残した。これらの記録はHousener, Hudson 両教授らの提唱するStrong Motion Seismologyの分野にとっては大変意義深いものである¹⁾。カリフォルニア工科大学構内のミリカン記念図書館の地下および屋上に設置されていた2台の強震計(RFT-250)もまた完全な同時記録を収めた。これらの記録より地震時における図書館の固有周期は地震前に振動実験で求められていた値よりも約50%近く大きいことが認められた²⁾。この原因としては復元力特性の非線形性あるいは構造物・地盤の相互作用などが考えられる。本研究ではまず前者にのみ注目し、地震時における実構造物の大振幅領域における非定常な復元力特性を強震記録より直接解析する手法について述べるとともに、非定常履歴モデルを設定して、その妥当性についてモデルの応答と同図書館での記録との比較より検討を加えた。

2. ミリカン記念図書館とサンフェルナンド強震記録 同図書館は9階R.C構造物で南北方向の水平力は東西に面した剛度の高い壁によって、東西方向は図書館中央のエレベータータワーによって支えられている。南北面にはすべて窓枠がはめ込まれているのみで、東西方向にはややフレキシブル、南北方向にはやや剛度の高い構造物である。同図書館の動特性については地震前後を通して詳細な実験結果が報告されている^{2,3)}。これらによると東西方向の1次固有周期は地震前、0.65sec、地震後、0.75secと、構造物にわずかの亀裂以外目に見える被害がないにもかかわらず、かなりの周期増加が見られた。サンフェルナンド地震時に得られた記録(Fig.1上が屋上での、下が地下でのおおの東西方向の加速度)を見ると、大振幅応答時の卓越周期は約1.0secであり大幅な固有周期の増加が認められる。なお地下・屋上での地震計は互いに連結されており両記録は正確な同時記録となっている。この配慮は以下の解析に大の便を与えた。

3. 強震記録解析 振動実験では得ることの困難な実構造物の大振幅応答時に対応する非定常・非線形な復元力特性を、強震記録から直接解析するために次のような手法が用いられた。まず構造物

そのものの振動特性を議論する上では相対変位を求めることが最初必要となる。カリフォルニア工科大学地震工学研究室(C.I.T., E.E.R.L.)での一連のデータ解析システム⁴⁾により、地下・屋上での両加速度記録から計算・修正した相対変位をFig.2に示した。このFig.2から相対変位応答では1次モードが支配的であり、同図書館の単純履歴構造物としての解析の可能性を指摘できよう。復元力特性の非線形性を調べるためにFig.2から各波の周期と振幅が読みとられてFig.3に示された。図中の番号はFig.2の各波の番号に対応する。地震前後の振動実験結果も同時に示されている。この図から地震の最初の部分(No.1~11)では周期と振幅とにSoft Spring型非線形性が認められるが、その後の周期は約1.0sec付近にちらびている。このことから周期

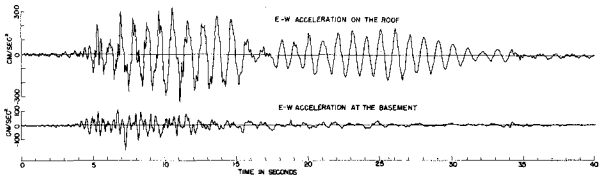


Fig. 1 San Fernando Earthquake Accelerograms Recorded at Millikan Library.

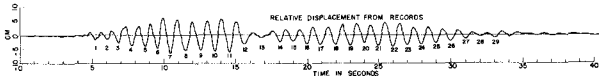


Fig. 2 Relative Displacement Calculated from the Accelerograms.

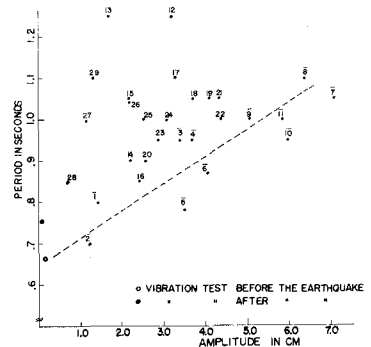


Fig. 3 Period-Amplitude Relation from the Relative Displacement.

は応答レベルの増大とともに増加し、最大応答を示した後入力応答レベルの減少にもかかわらず一定値にとどまる傾向を示していると言える。この傾向は Udwadia・Trifunac 両博士のフーリエ解析の結果と一致する。つまり構造物の非線形性に強震の結果と考えられる非定常性が見出される。

1次モードの卓越した地震応答記録から変位-復元力の非定常な関係を直接求めるには、相対変位と(-1)×(絶対加速度)の位相面を描くことが有効となる。これは運動方程式上での関係すなわち(復元力)+(質量)×(絶対加速度)=0から明らかである。

Fig.4の各図には0.02secごとのデータから同図書館の位相曲線を2秒間にわたって示した。(a)図は振動の初期の部分にあたり復元力の平均的勾配は固有周期0.65secの線形剛度にはほぼ等しい。2次モードの影響や復元力の急激なドロップなどが履歴に見られる。(b)図では復元力の勾配の大幅な減少が認められる。振動の終期にあたる(c)図では履歴面積が非常に少なくなっている。勾配は固有周期1.0secの線形剛度にはほぼ等しい。これらの図から復元力特性の地震時における非定常な性格、すなわち強振動によると考えられる剛度の減少ならびに履歴によるエネルギー消費能力の減少が指摘される。

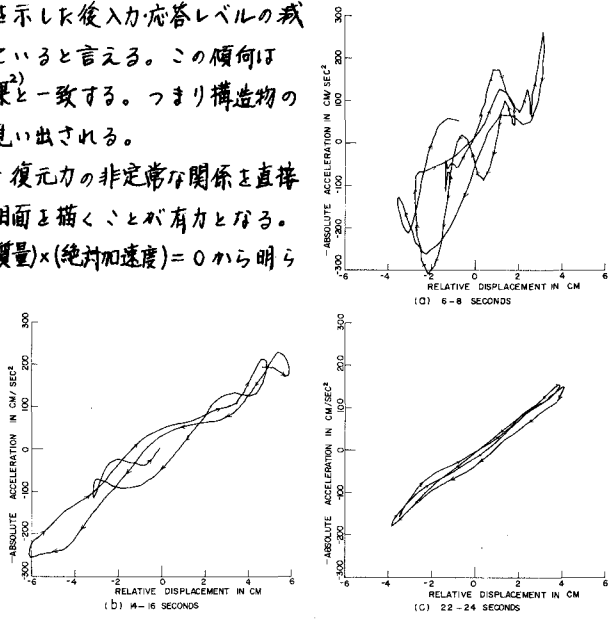


Fig. 4 Trajectory between Relative Displacement and Absolute Acceleration from the Accelerograms.

4. 非定常 Bilinear モデルとその妥当性

前節での解析により強震時における同図書館の復元力特性の非定常性が指摘されたが、この特性は従来よりのパラメーター一定の定常履歴モデルでは表現し得ないことが、応答計算の結果確認された。本研究では前節での解析結果を参考にしながら Fig.5 に示す3種の Bilinear モデルを連続時間内によって使いわけ非定常モデルとした。弾性および塑性領域での勾配はそれぞれ固有周期0.65sec, 1.00secの線形復元力の剛度に等しくすべて同一であるが、モデルの降伏変位のみの変化(1.0cm, 0.25cm, 0.10cm)により履歴の非定常性を示している。第1のモデルは0.0~8.5secに、第2のモデルは8.5~16.5secに、第3のモデルは16.5sec~最後までの間にならう用いられた。これら非定常モデルの応答計算にあたっては、モデル変化の時間帯を指定しつつは復元力の時間応答にジャンプがないような履歴制御手法を考案した。相対変位応答の計算結果を Fig.6 に示した。強震記録より得られた結果(Fig.2)と比較すると一部を除きよく一致していることかわかる。このことは非定常モデルの妥当性については同図書館の復元力特性の非定常性(剛度と履歴面積の減少)の認識の正しさを立証していると考えられる。

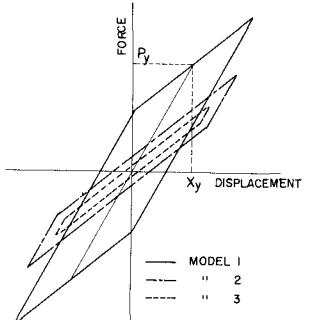


Fig. 5. Three Bilinear Hysteretic Systems Used for the Nonstationary Model.

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てカリフォルニア工科大学留学中に実施されたものである。本文の投稿に当っては京都大学工学部後藤尚男教授の支援と協力を受けた。また同大学院生泉並隆二君には本文の浄書に依頼した。ここに記して深く感謝する次第である。

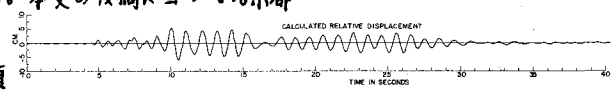


Fig. 6 The Relative Displacement Response of the Nonstationary Model.

参考文献 1) Jennings 編集: Engineering Features of the San Fernando Earthquake, EERL 71-02, C. I. T.
 2) Udwadia & Trifunac: Ambient Vibration Tests of Full Scale Structures, Preprints of 5WCEE, No. 178, 1973.
 3) Jennings & Kuroiwa: Bull. of the S. S. A. Vol. 58, No. 3, pp. 891~916, June, 1968.
 4) Hudson その他: Strong Motion Earthquake Accelerograms, Vol. II Part A, EERL 71-50, C. I. T.