

余震の影響を考慮した耐震性能照査用地震動に関する基礎的研究

徳島大学大学院 学生会員 ○小西 利弘 徳島大学大学院 正会員 成行 義文
 徳島大学大学院 正会員 三神 厚

1. はじめに 地震は、一般に群れを成して発生すると言われており、主に「本震+余震」型、「前震+本震+余震」型、「群発」型の3タイプに分類される。中でも最も多いのが「本震+余震」型であり、この場合、本震により構造物が損傷を受けた場合その後の大規模な余震で倒壊に至る可能性が考えられる。しかし、一般に現行の構造物の耐震設計においては、余震の影響までは考慮されていない。そこで本研究では、余震の影響を考慮した構造物の耐震性能照査用地震動を開発するための基礎的な研究として、余震の影響を考慮した擬似本震動の作成法について検討した。

2. 構造物のモデル化と損傷度指標 1) 運動方程式 本研究では、RC橋脚等の比較的簡単な構造物を対象とし、これらを図-1に示すようなせん断型1自由度系にモデル化して地震応答解析を行う。非線形な復元力特性を有する1自由度系の運動方程式は一般に式(1)のように表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Q(x) = -m\ddot{x}_G \quad (1)$$

ここに x 、 $\dot{x}$ および $\ddot{x}$ はそれぞれ質点の固定端からの相対変位、相対速度および相対加速度を表している。また、 $Q(x)$ および $\ddot{x}_G$ は系の復元力および地動加速度、 m, c, k はそれぞれ構造物の質量、粘性減衰係数、剛性である。

2) 復元力履歴特性 従来から広く非弾性地震応答解析に用いられている *Bi-linear* モデル(図-2)を本研究では用いる。図-2において、 $Q_{\max}$ は最大復元力、 $x_{\max}$ は最大変位、 Q_y は降伏復元力、 x_y は降伏変位、 k_0 は初期剛性、 p_1 は弾塑性剛性比である。

3) 修正 Park らの損傷度指標 本研究では、構造物の損傷を定量的に表すため式(2)の修正 Park らの損傷度指標 $D_m^{(1)}$ を用いる。

$$D_m = ((\mu_d - 1) + \beta\mu_h) / (\mu_u - 1) \quad (2)$$

ここに μ_d は最大変位塑性率、 μ_h はエネルギー塑性率、 μ_u は終局変位塑性率、 β は非負の係数である。

3. 対象とする本震と擬似本震動の作成法 1) 解析に用いる地震動記録 本研究では、2004年新潟県中越地震の本震を解析に用いる。図-3は本震の時刻歴加速度波形である。

2) 擬似本震動の作成法 本震の位相特性を種々変化させることにより地震動波形(擬似本震動)を作成した。具体的にはフーリエ変換を用いて地震動の位相変化を施した。フーリエ変換により、各々の周波数成分における複素フーリエ級数 C_k を求め、この実部を A_k 、虚部を B_k とすると、振幅 R_k 及び位相 θ_k はそれぞれ式(3)、(4)のように与えられる。

$$R_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (3), \quad \theta_k = \tan^{-1}(B_k / A_k) \quad (4)$$

本研究では、地震動の位相 θ_k を変化させた。

4. 擬似本震動による構造物の損傷度 表-1に、本研究で本震に施した位相変化の種類を示す。ここでは構造物の特性値として、減衰定数 $h = 0.05$ 、固有周期 $T_0 = 1.0\text{sec}$ 、入力強度比 $R_I (= m\ddot{x}_{G\max} / Q_y) = 7.0$ 、弾塑性剛性比 $p_1 = 0.0$ 、終局塑性率 $\mu_u = 4.0$ で解析を行った。擬似本震動が作用したときの構造物の損傷度を D_{ma} 、元の本震が作用したときの構造物の損傷度を D_{mb} として、式(5)で求めた増減率 P を擬似本震動ごとに比較したものを図-4に示す。

$$P(\%) = ((D_{ma} / D_{mb}) - 1) \times 100 \quad (5)$$

図-4から、擬似本震動 No.1~3,10 が構造物に作用した場合、損傷度が減少することがわかる。これは耐震

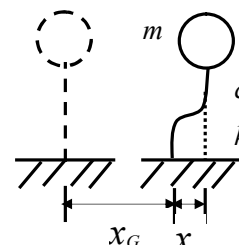


図-1 1自由度系モデル

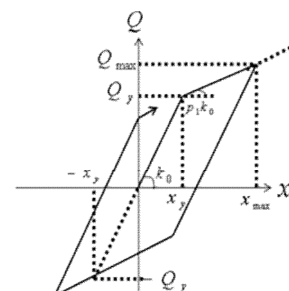


図-2 Bi-linear モデル

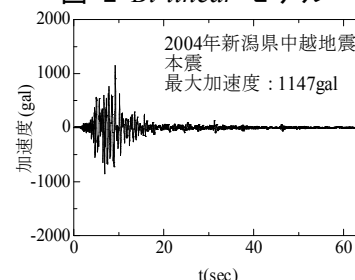


図-3 時刻歴加速度波形

性能照査用としては適さない。また、擬似本震動 No.4~7 においてはほとんど損傷が得られず、これも適さない。擬似本震動 No.8,9 はともに $P>0$ であるが、値が大小極端であり、ここでは不適と判断した。一方、擬似本震動 No.11,12 では、適度な損傷が見られたことから、この位相変化を施した場合に余震の影響を考慮できる可能性があると判断した。したがって、この位相変化を以降の解析に使用する。

5. 振幅スペクトル不変の場合の構造物の損傷度

1) 擬似連続地震動 実際の「本震+余震」型の地震動が構造物に作用するときの基本応答特性を把握するために、本研究では、本震の後に本震をスケールリングした余震を繋げ、連続地震動を作成した。まず、観測された余震²⁾の最大加速度を大きい順に並べて、その回帰式(6)を求めた。なお、減衰率は式(6)の中カッコで表される。この減衰率を用いて、本震をスケールリングした。

$$A_i = \left\{ 1 / (i + 0.509)^{0.918} \right\} \times 1147.43 \quad (6)$$

ここに A_i は i 番目の最大加速度である。なお本研究では、繋げる余震は4つ($i=1\sim4$)とした。

2) 解析方法 まず、連続地震動を入力したときに損傷度が D_1 となるような入力強度比 R_{I1} を求める。次に、同じ R_{I1} 値を有する本震を入力したときの損傷度を D_2 とすると、 $D_2 \leq D_1$ となる(ただし、 $D_2 = D_1$ となるのは余震による損傷がない場合)。そこで、前出の擬似本震動(表-1 No.11,12)を入力したときの損傷度 D を D_1 と比較検討する。なお、入力した擬似本震動の振幅スペクトルは図-5 に示すように虚部の低減係数 x の値によらず位相変化前後で不変とした。

3) 解析結果 図-6 に、 $D_1 = 0.3$ の場合の R_I を用いて解析を行い、 $D = 0.300, 0.315, 0.330, 0.360, 0.450$ の各場合の虚部の低減係数 x と固有周期 T_0 の関係を示す。図-6 より全ての固有周期に対して、 $D \geq D_1$ となる x が存在することがわかる。また、各固有周期ごとに、使用できる低減係数の範囲を知ることもできた。

6. おわりに 位相のみ変化させた擬似本震により、余震の影響を反映した構造物の損傷を近似的に評価し得る可能性を示した。今後、各固有周期に対する、有効な低減係数の範囲の定量的な評価について検討する予定である。

7. 参考文献 1) Park, Y.J., A.M. Reinhorn and S.K. Kunnath : Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings, Proc. Of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII pp.211~216, 1988

2) 強震ネットワーク K-NET: <http://www.k-net.bosai.go.jp>

表-1 擬似本震動の種類(N は複素フーリエ級数の総数)

擬似本震動 No.	変更対象	変更内容
1	B_k	フーリエスペクトル図において、振幅が大きい周波数範囲のフーリエ級数のみ使用
2	A_k	
3	B_k, A_k	
4	B_k	変更対象を2倍する
5	A_k	
6	B_k	擬似本震動 No.6 の場合、 B_0 を 2.0 倍、 B_1 を $2(1-1/N)$ 倍、 B_2 を $2(1-2/N)$ 倍、 $\dots$ 、 B_{N-1} を $2(1-(N-1)/N)$ 倍する
7	A_k	
8	B_k	B_k ($k=0\sim4$) を、末尾にずらす
9	B_k	B_k ($k=0\sim99$) を、末尾にずらす
10	B_k	B_k ($k=0\sim999$) を、末尾にずらす
11	B_k, A_k	位相変化前後で振幅スペクトルを不変とした状態で B_k (虚部) を 1/10 にする
12	B_k, A_k	位相変化前後で振幅スペクトルを不変とした状態で B_k (虚部) を 1/2 にする

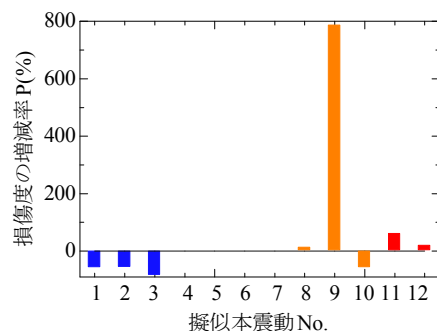


図-4 増減率 P の比較

変化前 変化後

$$R_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} = \sqrt{a_k^2 + (B_k/x)^2} \quad (x>1)$$

振幅

$$a_k = \pm \sqrt{R_k^2 - (B_k/x)^2}$$

$a_k, B_k/x$ を用いて比較

図-5 位相変化の方法

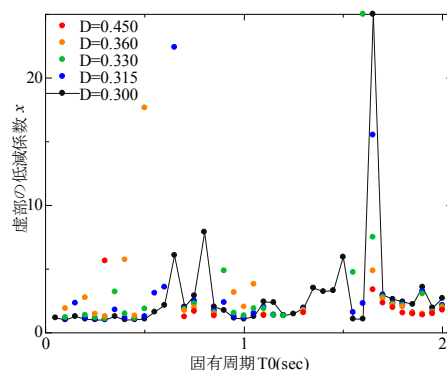


図-6 虚部の低減係数 x

と固有周期 T_0 の関係