

## 動的解析に基づく耐震設計に用いる入力地震動の数と非線形応答のばらつき

独立行政法人土木研究所 正会員 星隈 順一  
独立行政法人土木研究所 正会員 運上 茂樹

### 1. はじめに

近年、橋梁の耐震設計では非線形動的解析が積極的に活用されるようになってきた。レベル2地震動に対しては、一般に橋脚に塑性化を考慮するため、橋脚の非線形応答値は入力地震動の非正常性の影響を大きく受ける。したがって、耐震設計における入力地震動の設定においては、振幅特性の他に位相特性にも十分配慮する必要がある<sup>1), 2)</sup>。道路橋示方書 耐震設計編では、このような入力地震動の非正常性を考慮し、耐震設計に用いる入力地震動としては3波形程度を選定し、それぞれの波形に対する応答値の平均値を耐震設計に用いる応答値として扱うことになっている。しかしながら、入力地震動の選定数と非線形応答のばらつきの関係については十分に明確となっていない。そこで、本研究では、これまでに主として我が国で観測された多数の強震記録を基に動的解析を行い、地震動の位相特性と橋脚の非線形応答の関係について検討するとともに、動的解析に用いる入力地震動の数と橋脚に生じる非線形応答変位のばらつきについて一考察を行った。

### 2. 解析対象とした振動系と入力地震動

解析対象としたのは1質点系にモデル化可能な降伏震度が0.6の鉄筋コンクリート橋脚であり、復元力特性は骨格曲線を完全弾塑性型としたTakedaモデルによりモデル化した。ここで、質点の質量は、振動系の固有周期が1.0秒となるように設定した。解析に用いた入力地震動は、過去に主として我が国で発生したマグニチュード6.5以上の27地震により種地盤上の地盤で観測された強震記録を、道路橋示方書に規定される種地盤に対するレベル2地震動の加速度応答スペクトルに適合するように振幅特性のみを調整した波形であり、プレート境界付近の海洋型地震により生じたタイプⅠの地震動が30波形、内陸直下型地震により生じたタイプⅡの地震動が21波形である。

### 3. 入力地震動の位相特性

本研究では、地震動の位相特性を式(1)で定義される位相差を用い、その標準偏差で評価することとした<sup>3)</sup>。

$$j = j_{i+1} - j_i \quad (1)$$

ここで、 $j_i$ は*i*番目の位相差、 $j_{i+1}$ は*i+1*番目の周波数の位相である。なお、位相差の値の区間の取り方によって標準偏差の値が変わってしまうが、岩崎らの研究<sup>3)</sup>を基に、標準偏差が最小となる幅2の区間によって標準偏差を算出した。このようにして求めた標準偏差が大きい場合、当該地震動には様々な位相差の振動成分が含まれていることを意味する。

図-1は、本解析に用いた入力地震動の位相差と地震動の継続時間の関係を示したものである。ここで、地震動の継続時間は、入力地震動の総エネルギーに対する累積エネルギーの比が5%から95%に達するのに要する時間である。これより、位相差の標準偏差は地震動の継続時間に概ね比例しており、今回の解析で用いた入力地震動の位相差の標準偏差は0.1~0.5までの範囲に分布していることが確認される。また、タイプⅠの地震動と比較すると、タイプⅡの地震動では継続時間が短く、また位相差の標準偏差も小さい。

### 4. 位相特性と鉄筋コンクリート橋脚に生じる最大応答変位の関係

図-2は、位相差の標準偏差と非線形動的解析の結果求められた質点位置での最大応答変位の関係を示したものである。図中には、全入力地震動に対する位相差の標準偏差の平均値ならびに最大応答変位の平均値を実線で、また、平均値±標準偏差の値を波線でそれぞれ併記している。これより、タイプⅠの地震動なら

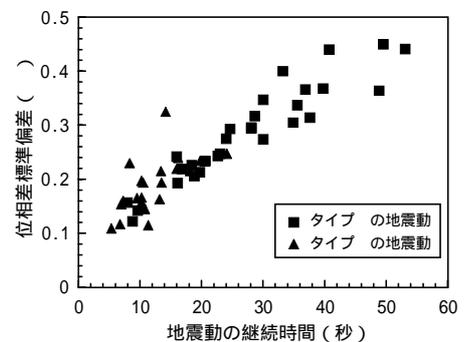
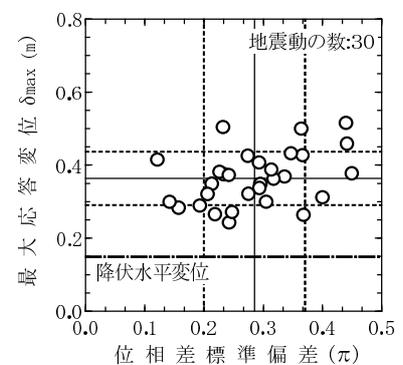
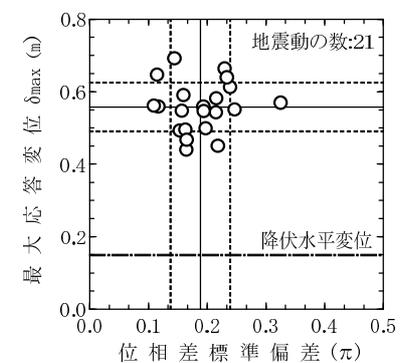


図-1 解析に用いた地震動の位相特性

—:平均値, ----:平均値±標準偏差



(a)タイプⅠの地震動



(b)タイプⅡの地震動

図-2 位相差の標準偏差と最大応答変位

キーワード：非線形応答、位相特性、動的設計、ばらつき

連絡先：茨城県つくば市南原 1-6 TEL：0298-79-6773 FAX：0298-79-6736

びにタイプ の地震動ともに、位相特性を位相差の標準偏差により表現した場合、これと最大応答変位の間に有意な傾向はなく、一様にばらついていることがわかる。

5. 入力地震動の数と最大応答変位の平均値の関係

今回の解析では、タイプ の地震動として30波、タイプ の地震動として21波の入力地震動を作成したが、それぞれこの中から任意のn波を抽出し、そのn波に対する非線形動的解析の結果を平均し、その平均値と全波形に対する平均値との比較を行った。図-3及び図-4は、タイプ の地震動の30波及びタイプ の地震動の21波の中から、それぞれ1波、3波、10波を抽出する場合の全ての地震動の組み合わせに対して最大応答変位の平均値を求め、その頻度分布を示したものである。これより、タイプ の地震動の場合、全地震動に対する最大応答変位の平均値が36.36cmであるのに対して、1波の入力地震動だけで最大応答変位を評価すると、その平均値に対するばらつきは大きく（標準偏差で7.29cm）耐震設計としては危険側の評価をする可能性が高いことを示している。3波を抽出して最大応答変位を評価すると、全地震動に対する平均値からのばらつきは小さくなり、標準偏差は4.06cmとなる。さらに10波を抽出して評価した場合には、標準偏差は1.92cmとなり、これは全地震動に対する最大応答変位の平均値の5%程度である。このような傾向は、タイプ の地震動に対する解析結果からも確認される。

図-5は、抽出する地震動の数と最大応答変位の平均値の変動係数の関係を示したものである。当然のことながら、抽出する地震動の数が多ければ、それだけ位相特性が非線形応答に及ぼす影響を考慮することができるため、全地震動に対する最大応答変位の平均値に対する変動を小さくすることができる。3波形の入力地震動により非線形応答を評価した場合、その変動係数はタイプ の地震動で約12%、タイプ の地震動で約7%である。

6. まとめ

比較的規模の大きい地震により観測された数多くの強震記録の位相特性を基に、位相特性が鉄筋コンクリート橋脚の非線形応答に及ぼす影響ならびに動的解析による耐震設計における入力地震動の数と非線形応答のばらつきの関係について一考察を行った。部分安全係数に基づく耐震設計法の検討が進められているが、動的解析によって耐震設計する場合には、設計に用いる入力地震動の数に応じて非線形応答の評価値の信頼性が変わってくるため、本文で述べたような検討結果を踏まえ、位相特性のばらつきも部分安全係数に反映させていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1)和泉正哲、勝倉裕：地震動の位相情報に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第327号、pp.20-27、1983年
- 2)羅休、室野剛隆、西村昭彦：群遅延時間を用いた適合波の作成とその非定常性が弾塑性応答へ及ぼす影響、第10回日本地震工学シンポジウム、pp.637-642、1998年
- 3)岩崎良二、神田順、政尾享、大川出：地震動波形の位相差分および位相差分分布に関する基本的性質、日本建築学会構造系論文報告集、第386号、pp.16-23、1988年

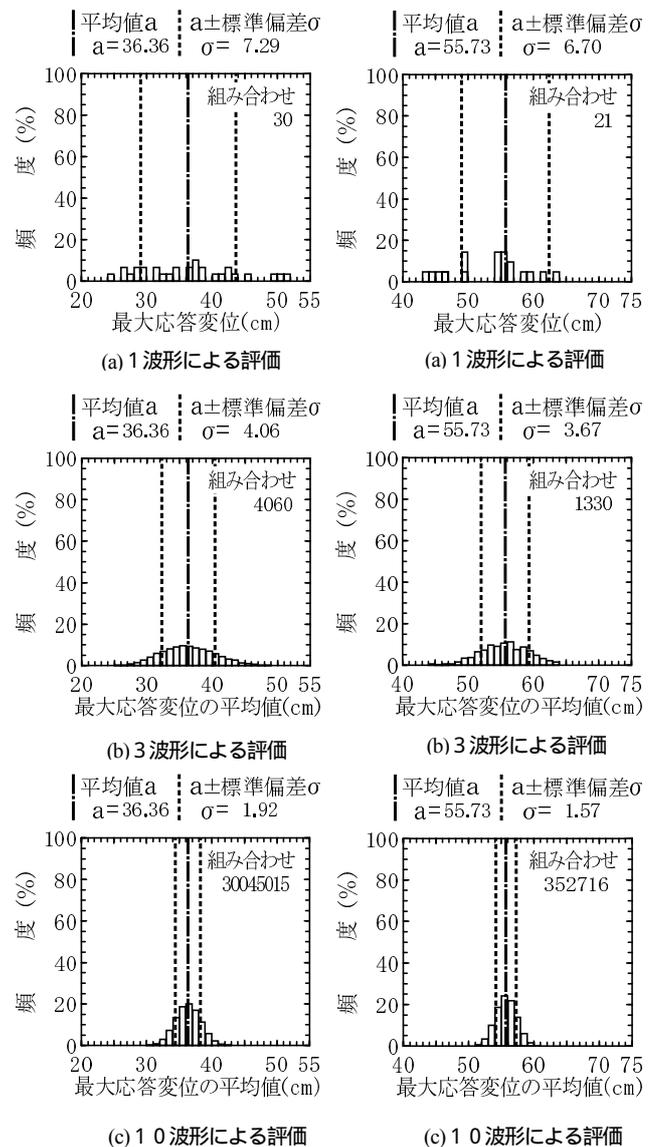


図-3 非線形応答のばらつき(タイプA)

図-4 非線形応答のばらつき(タイプB)

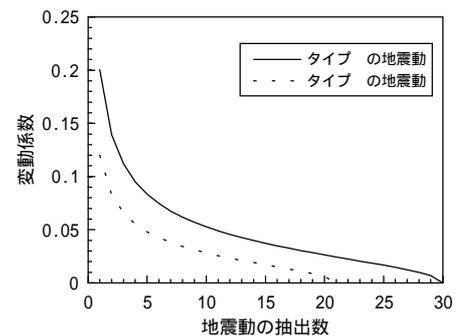


図-5 抽出する地震動の数と最大応答変位の平均値の変動係数