

地震動入力エネルギー特性及び非線形地震応答変形推定法

温留漢¹・伊東 賢²・田中 伸英³

¹工博 新日本技研株式会社 東京支社（〒105-0014 東京都港区芝2-1-23）

²正会員 新日本技研株式会社 東京支社（〒105-0014 東京都港区芝2-1-23）

³工修 新日本技研株式会社 東京支社（〒105-0014 東京都港区芝2-1-23）

1. はじめに

一般には、地震動の強さはその最大加速度、最大速度によって評価される場合が多い。しかしながら近來、従来見られなかったような大きな加速度や速度の地震動が観測され、地震動の破壊力と被害の関連が改めて議論されている。地震動の破壊力は構造物に対する影響で評価すべきであるが、レベル2の直下型地震動であるタイプⅡ地震動による瞬間的な過大入力と、海洋型地震動であるタイプⅠ地震動による繰り返し効果ではその破壊力特性が異なり、その違いを定量的に比較することが必要である。

本稿では、鉄筋コンクリート橋脚を対象とし、地震動のエネルギー入力性状、構造物のエネルギー消費性状の検討を行なった。構造物のエネルギー消費性状は構造物の耐力、最大応答塑性率と関連する耐震性の重要な指標であり、地震動入力エネルギー及び構造物の消費エネルギー応答性状によって、地震動の破壊力、構造物の耐震性を捉えることが重要である。これによって、地震動タイプⅠ及びタイプⅡの破壊力特性の評価を試み、また、破壊力特性を考慮した地震時構造物の最大応答塑性率の推定について考察した。

2. 検討手法

1自由度振動系の運動方程式の各項に微小変位 $dx = \dot{x}dt$ を乗じて地震動の全継続時間 T で積分すると、エネルギーの釣り合いが式(1)で現れる。

$$\int_0^T m\ddot{x}\dot{x}dt + \int_0^T D(\dot{x})\dot{x}dt + \int_0^T F(x)\dot{x}dt = -\int_0^T m\ddot{x}_0\dot{x}dt \quad (1)$$

ここでは、 x は振動質点の相対速度、 $D(\dot{x})$ は減衰力、 $F(x)$ は構造物の復元力、 $\ddot{x}_0$ は入力地震動の加速度である。復元力特性は、土木構造物である橋脚の非線形特性とした武田モデルを用いる。

式(1)における左辺より、順に

$$\text{運動エネルギー} \quad E_v = \int_0^T m\ddot{x}\dot{x}dt \quad (2)$$

$$\text{減衰エネルギー} \quad E_D = \int_0^T D(\dot{x})\dot{x}dt \quad (3)$$

$$\text{履歴消費エネルギー} \quad E_H = \int_0^T F(x)\dot{x}dt \quad (4)$$

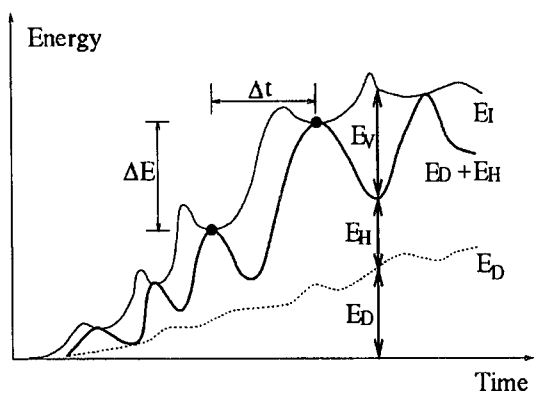
$$\text{地震動入力エネルギー} \quad E_I = \int_0^T m\ddot{x}_0\dot{x}dt \quad (5)$$

と定義する。タイプⅠ及びタイプⅡ地震動の違いを検討するために、図1に示すようなある時間 Δt 内に構造物が吸収したエネルギーを瞬間入力エネルギーと定義し、 ΔE で記す。

ここで定義したある時間 Δt とは、図2に示すような運動エネルギーが0から再び0になるまでの時間 Δt である。この時間 Δt において、構造物が消費したエネルギー $E_D + E_H$ を考えて、これに対応する

地震動の入力エネルギー E_I の増分を ΔE と定義する。

下記の式(6)によって計算される。



Energy time history

図-1 地震動入力エネルギー

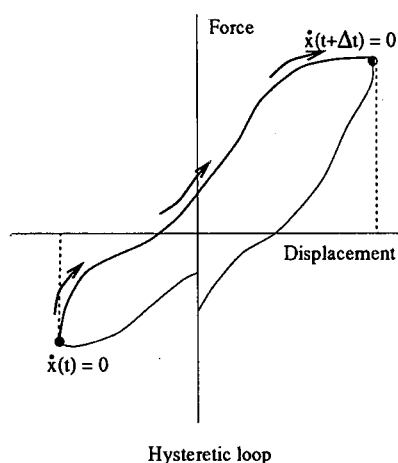


図-2 地震動瞬間入力エネルギー

$$\begin{aligned}\Delta E &= \int_t^{t+\Delta t} m\ddot{x}\dot{x}dt + \int_t^{t+\Delta t} D(\dot{x})\dot{x}dt + \int_t^{t+\Delta t} F(x)\dot{x}dt \\ &= -\int_t^{t+\Delta t} m\ddot{x}_0\dot{x}dt\end{aligned}\quad (6)$$

この定義では、図2に示すように、 Δt は履歴ループの半分サイクルの時間に対応しており、各サイクルごとに異なる値をもつ。地震動継続時間 T 内の ΔE の最大値を地震動の最大瞬間入力エネルギーと定義し、 $\Delta E_{\max}$ と記する。

3. 入力地震動

検討に用いた地震動は、「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」に指定されている修正地震動²⁾である。検討のために、海洋型地震動を地震動タイプⅠと呼び、直下型地震動を地震動タイプⅡと呼ぶ。この地震動を用いることによって、地震動のタイプ

表1 解析パラメータ

	タイプⅠ	タイプⅡ
降伏耐力 P_y (kN)	5655.77	5655.77
降伏変位 δy (m)	0.044	0.044

表2 非線形時刻歴解析結果

入力地震動	橋脚頭部最大変形
タイプⅠ-Ⅱ-3	0.054 m
タイプⅡ-Ⅱ-3	0.210 m
タイプⅠ-Ⅲ-3	0.132 m
タイプⅡ-Ⅲ-3	0.215 m

別による特徴を把握できると考えられる。周波数成分に関しては、ある卓越周期成分だけが大きいような地震動がよく見られるが、これは震源から観測点までの地盤特性が大きく影響していると考えられる。よって、もとの地震動の破壊力特性を把握するため、検討に用いる地震動として広い周波数範囲で破壊力をもつ修正地震動とした。

4. 非線形動的時刻歴解析

対象とする鉄筋コンクリート橋脚は、表1に示すようなパラメータを有する地震時水平保有耐力法によって設計された単柱式橋脚である。地震時最大応答変形の推定結果と比較するために、対象の鉄筋コンクリート橋脚に対し、「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」に指定されている修正地震動を用いて非線形時刻歴動的解析を行なった。解析結果を表2に示す。

5. 地震動の入力エネルギー性状

海洋型地震動タイプⅠ及び直下型地震動タイプⅡの破壊力特性の相違を詳しく調べるために、各地震動の入力エネルギー応答性状による検討を行なう。計算結果を図3から図8に示す。

図3と図4に示すように地震動入力エネルギーでは、海洋型地震動タイプⅠと直下型地震動タイプⅡの地震動エネルギー入力された時刻には違いがあり、海洋型地震動タイプⅠの場合では、継続時間の増大につれて地震動入力エネルギーが増加しており、それに対して、直下型地震動タイプⅡでは、地震動入力エネルギーの増加する時間が非常に短く、一定な

(タイプⅠ-Ⅱ-3)

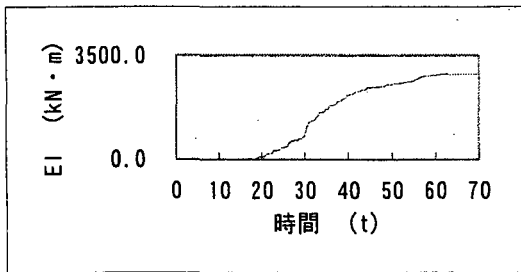


図-3 地震動入力エネルギー時刻歴

(タイプⅡ-Ⅱ-3)

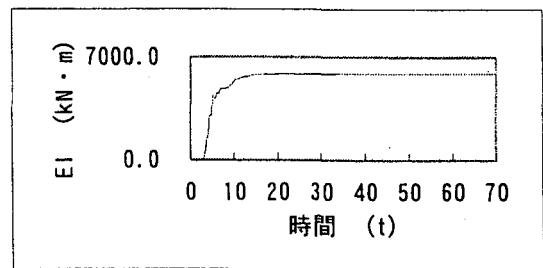


図-4 地震動入力エネルギー時刻歴

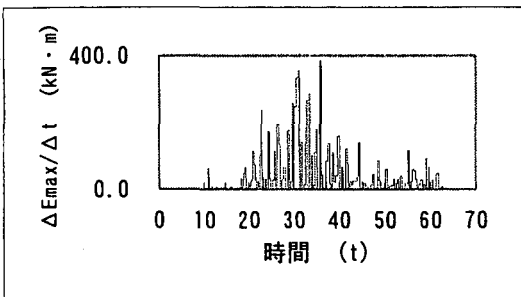


図-5 最大瞬間入力エネルギー分布

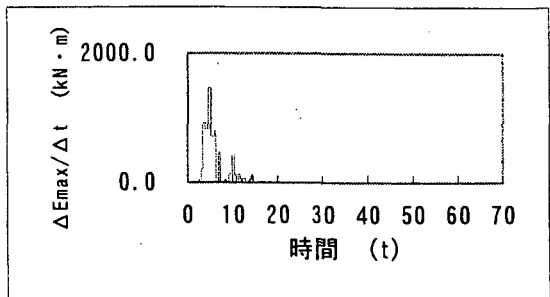


図-6 最大瞬間入力エネルギー分布

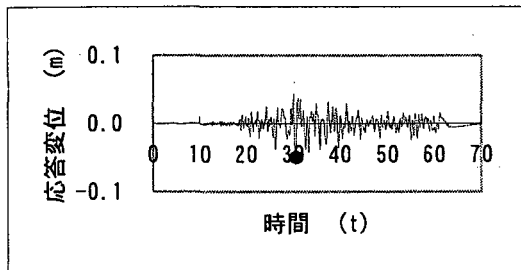


図-7 非線形応答変形時刻歴

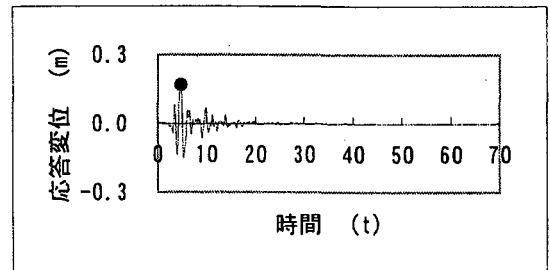


図-8 非線形応答変形時刻歴

時間が過ぎてから、地震動入力エネルギーが一定となる。すなわち、海洋型地震動タイプⅠと違い、直下型地震動タイプⅡの構造物に入力されたエネルギー量が一気に増大した形となっている。

図5と図6に示している瞬間入力エネルギー ΔE の分布状況を見ると、海洋型地震動タイプⅠにおいて繰り返し何度も大きなエネルギーが入力されており、損傷が累積されていることが考えられる。直下型地震動タイプⅡでは瞬間入力エネルギーが数回に限られており、瞬間的に損傷を与えるタイプだと考えられる。地震動の破壊力特性の相違が見られる。

次に非線形時刻歴動的解析結果での最大応答変形を●で示した図7と図8に示す。これまでの研究では、最大瞬間入力エネルギー $\Delta E_{\max}$ が入力された

直後に最大応答変形が生じる傾向があることがすでに報告されており¹⁾、両者の間に相関が非常に高いと思われるため、図7と図8に示しているように、海洋型地震動タイプⅠ及び直下型地震動タイプⅡともにその傾向を示していることがわかる。この検討をすべての動的解析に用いる地震動に対して行なうことで、地震動の破壊力特性の評価及び分類が可能であると考えられる。また、地震動入力エネルギーについては等価な速度より推定できることができて研究されつつある。このような分類、履歴タイプとの関連などによって、非線形地震時最大応答変形を弾性解析結果より推定が可能である¹⁾。

6. 地震時最大応答変形の推定

ここでは、地震動入力エネルギーの釣り合いから地震時最大応答変形を推定することを示す。最大応答変形の推定においては、まず、最大応答変形が発生するときの最大瞬間入力エネルギー $\Delta E_{\max}$ と履歴によって吸収されたエネルギー ΔE_H を式(7)で表す。

$$\Delta E_H = \beta \times \Delta E_{\max} \tag{7}$$

構造物が非線形領域に入ってからエネルギーの吸収が主に履歴によって行なわれ、減衰の影響が小さいと思われるので、 β を 0.925 とする¹⁾。

図 9 に示すように ΔE_H は最大変形時の履歴によって吸収されるエネルギーで、最大変形 $\delta_{\max}$ と復元力特性をモデル化する 2 本の折れ線及び構造物の降伏耐力 P_y により次式(8)で表される。

$$\Delta E_H = P_y \delta_y (\mu - 1) \tag{8}$$

ここで、 μ は塑性率である。
 構造物における地震時の最大瞬間入力エネルギーがわかれば、式(8)によって地震時の最大応答変形が推定できる。
 表 2 に示した地震動に対して、推定した結果と非線形時刻歴動的解析結果の比較を表 3 及び図 10 に示す。精度良く推定できることがわかる。

7. 結論及び課題

地震動の破壊力特性については、繰り返し効果や過大入力の効果を適切に考慮することが必要であり、瞬間的な入力エネルギー応答によってよく評価できるといえる。本研究により得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 海洋型であるタイプⅠ地震動と直下型であるタイプⅡ地震動の破壊力特性に違いがある。地震動タイプⅡの瞬間に過大なエネルギーが入力されるのに対し、地震動タイプⅠではエネルギーが継続時間の増大に伴って増大していく形となっている。
- (2) 最大瞬間入力エネルギーと地震時の1自由度振動系の最大応答変形の間に高い相関がある。最大応答変形が最大瞬間入力エネルギーが入力された直後に生じる。

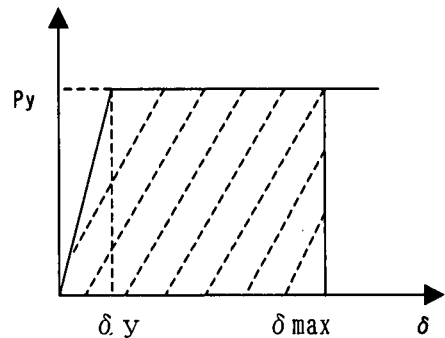


図-9 履歴ループ

表 3 非線形応答値と推定値の比較

入力地震動	非線形解析値	推定値
タイプⅠ-Ⅱ-3	0.054 m	0.051 m
タイプⅡ-Ⅱ-3	0.210 m	0.203 m
タイプⅠ-Ⅲ-3	0.132 m	0.124 m
タイプⅡ-Ⅲ-3	0.215 m	0.228 m

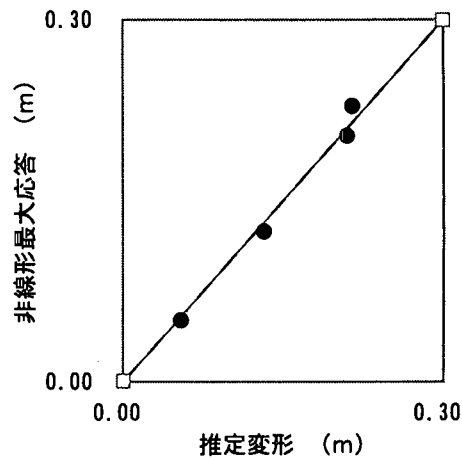


図-10 地震時最大応答変形の比較

- (3) 最大瞬間入力エネルギーにより地震時1自由度振動系に生じる最大応答変形を精度よく推定することが可能である。

最大瞬間入力エネルギー $\Delta E_{\max}$ を弾性速度スペクトルにより推定することが今後の課題とする。

参考文献

1) Norio,I,Wenlihan.:Shaking table tests of reinforced concrete columns subjected to simulated eathquake motions with different time durations, 12WCEE, pp. 213-222, 2000.
 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ 耐震設計編 2002.3