

地震動特性に基づく非線形応答の推定方法に関する研究

吉田 仁司¹・田村敬一²・中尾吉宏³

¹ 正会員 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 振動研究室 交流研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

² 正会員 工博 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 振動研究室 室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³ 正会員 工修 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 振動研究室 研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

1. はじめに

構造物の非線形応答の簡易推定法としては、エネルギー一定則や変位一定則に基づく方法、等価線形化法等、様々な方法が提案されているが、入力地震動の特性と非線形応答特性の関係については未解明な部分が多く残されている。

本研究では、入力地震動と構造物の非線形応答の関係について振幅特性と位相特性に着目し、これらの特性に基づいた非線形応答の簡易推定手法を提案し、その適用性を検討した。

2. 検討手法

弾塑性型せん断バネを有する1質点系に対して非線形時刻歴応答解析を行った。1質点系の非線形履歴モデルとしては完全バイリニアモデルを用い、内部減衰は5%とした。入力地震動としては、道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁾に規定される標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように、表-1に示す既往の強震記録を振動数領域で振幅調整した波形²⁾を用いた。

入力地震動と非線形加速度応答の振幅特性、位相特性を比較することにより、入力地震動と構造物の非線形応答特性の関係をモデル化し、このモデルを用いた非線形応答値の推定手法を提案するとともに、その精度を検証した。

3. 非線形応答特性

(1) 振幅応答特性

非線形時刻歴応答解析によって得られた非線形加速度応答と入力地震動のフーリエ振幅スペクトルの比率(以下、フーリエ振幅応答倍率という)の一例として、1質点系の初期固有周期が $T=1.0$ および $1.5[\text{sec}]$ の場合の解析結果を図-1に示す。同図には線形加速度応答の入力地震動に対するフーリエ振幅応答倍率も実線で示してある。図-1から、非線形加速度応答のフーリエ振幅応答倍率はばらつきを有しているものの、入力地震動のフーリエ成分波の周期 $t[\text{sec}]$ を1質点系の固有周期 $T[\text{sec}]$ で正規化した t/T に応じて、つぎのような特性を有していることがわかる。

表-1 入力地震動

(a) タイプ I

地震種別	地震名	記録名
I 種	1978年 宮城県沖地震	KAIHOKU BRG LG
	1978年 宮城県沖地震	KAIHOKU BRG TR
	1993年 北海道南西沖地震	SHICHIHOU BRG LG
II 種	1968年 日向灘沖地震	ITAJIMA BRG LG
	1968年 日向灘沖地震	ITAJIMA BRG TR
	1994年 北海道東方沖地震	ONNETO BRG TR
III 種	1983年 日本海中部地震	TSUGARU BRG TR
	1983年 日本海中部地震	TSUGARU BRG LG
	1994年 北海道東方沖地震	KUSHIROGAWA EMB LG

(b) タイプ II

地震種別	地震名	記録名
Ⅰ種	1995 年 兵庫県南部地震	JMA KOBE N-S
		JMA KOBE E-W
		HEPC INAGAWA N-S
Ⅱ種		JR TAKATORI STA N-S
		JR TAKATORI STA E-W
		OGAS FUKIAI
Ⅲ種		HEPC HIGASHI KOBE
		KOBE PORT ISLAND
		KOBE PORT ISLAND

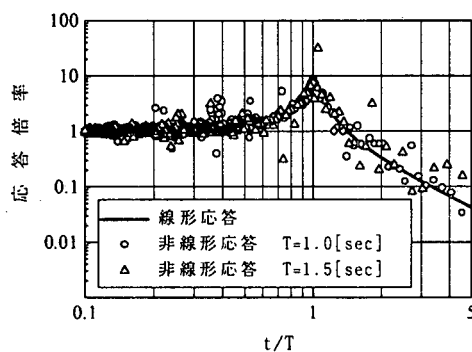
ーリエ振幅応答倍率も実線で示してある。図-1から、非線形加速度応答のフーリエ振幅応答倍率はばらつきを有しているものの、入力地震動のフーリエ成分波の周期 $t[\text{sec}]$ を1質点系の固有周期 $T[\text{sec}]$ で正規化した t/T に応じて、つぎのような特性を有していることがわかる。

a) $t/T \leq 0.5$ の応答特性

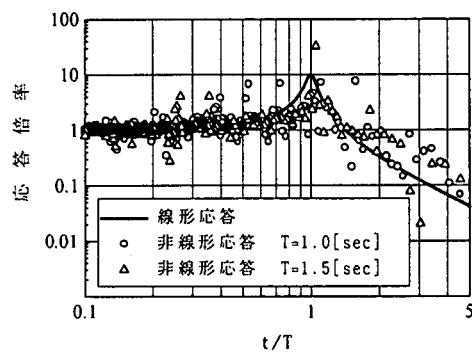
$t/T \leq 0.5$ のフーリエ振幅応答倍率は、線形応答のフーリエ振幅応答倍率と概ね一致する。すなわち、 t/T が小さい領域では非線形応答と線形応答は入力地震動に対して同様の応答特性を示し、 t/T が小さくなるにしたがいフーリエ振幅応答倍率は1.0に収束する特性を有すると考えられる。

b) $0.5 < t/T < 1.5$ の応答特性

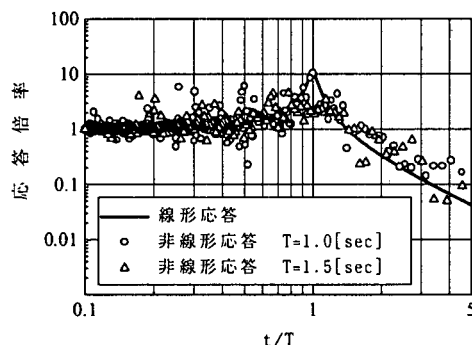
$0.5 < t/T < 1.5$ はフーリエ振幅応答倍率が大きくなる領域であるが、その値は一般的に線形応答よりも小さくなる特性を示す。これらの値は、入力地震動や1質点系の初期固有周期によってばらつきを有しているものの、応答塑性率 μ が大



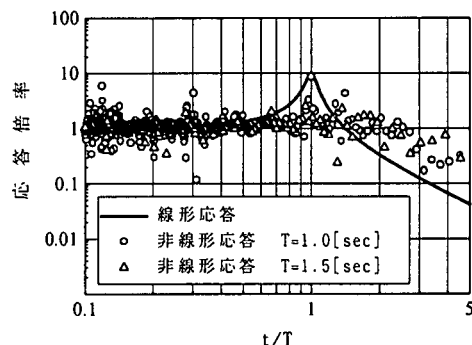
(a) KAIHOKU BRG LG ($\mu=2$)



(b) KAIHOKU BRG LG ($\mu=8$)

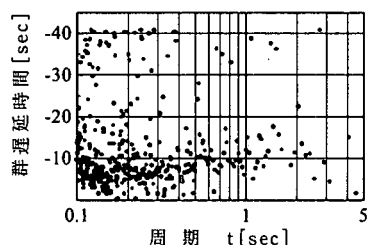


(c) JR TAKATORI STA N-S ($\mu=2$)

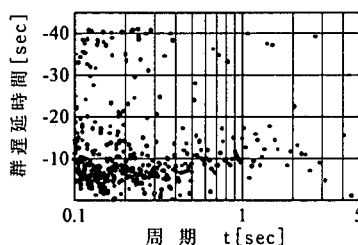


(d) JR TAKATORI STA N-S ($\mu=8$)

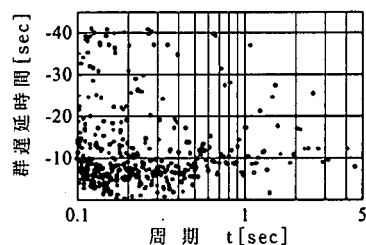
図-1 非線形加速度応答のフーリエ振幅応答倍率



(a) 入力地震動



(b) 線形応答 $T=1.0[\text{sec}]$



(c) 非線形応答 ($\mu=8$) $T=1.0[\text{sec}]$

図-2 群遅延時間 (KAIHOIKU BRG LG)

きくなるほど一般的に応答倍率が小さくなる特性を示す。また、図-1(b), (d)のように、フーリエ振幅応答倍率の大きくなる t/T の領域が $t/T=1$ よりも大きくなることが確認できる。

c) $1.5 \leq t/T$ の応答特性

$1.5 \leq t/T$ のフーリエ振幅応答倍率は線形応答のフーリエ振幅応答倍率を上回る特性を示す。これは μ が大きくなるほど顕著に表れており、系が塑性化することによって剛性が低下し、固有周期が延びることにより共振周期帯が長周期側に移行するためであると推測できる。したがって、固有周期の延びが大きいほど、すなわち μ が大きいほど t/T が大きい領域のフーリエ振幅応答倍率が大きくなると考えられる。

(2) 位相特性(群遅延時間)

本研究では、位相特性は群遅延時間を用いて評価することとした。群遅延時間とは、フーリエ位相スペクトル $\phi(\omega)$ を角振動数 ω 軸上で微分したものであり、式(1)で表される。

$$t_{gr}(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (1)$$

図-2 に入力地震動、線形加速度応答および非線形加速度応答の群遅延時間スペクトルの一例を示す。これによれば、入力地震動と加速度応答(線形、非線形)の群遅延時間スペクトルは類似していることがわかる。

4. 非線形応答特性のモデル化

(1) フーリエ振幅応答倍率のモデル化

既往の研究³⁾では、1質点の弾塑性型せん断バネモデルに正弦波を入力した場合、正弦波の周期 $t[\text{sec}]$ を系の初期固有周期 $T[\text{sec}]$ で正規化したフーリエ振幅応答倍率は t や T に依存せず、概ね一致することが確認されている。また、非線形応答の入力地震動に対するフーリエ振幅応答倍率を、正弦波を入力した場合のフーリエ振幅応答倍率でモデル化することにより非線形応答値を推定できる可能性が示唆されている。図-3 に正弦波を入力した場合のフーリエ振幅応答倍率を示す。正弦波を入力した場合のフーリエ振幅応答倍率は、図-1 に示す非線形応答

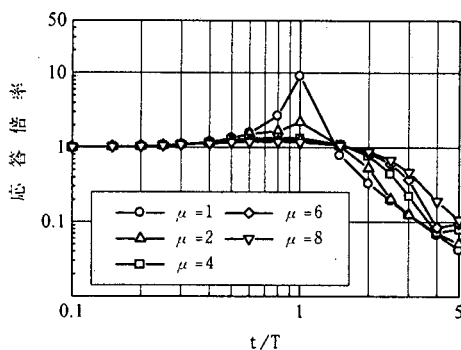


図-3 正弦波入力によるフーリエ振幅応答倍率

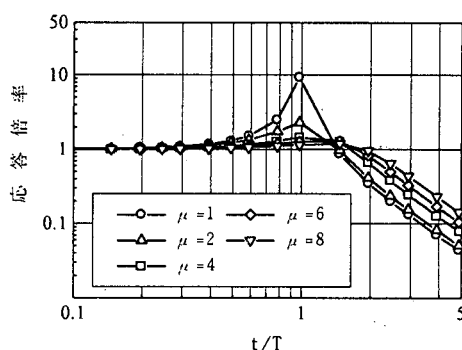
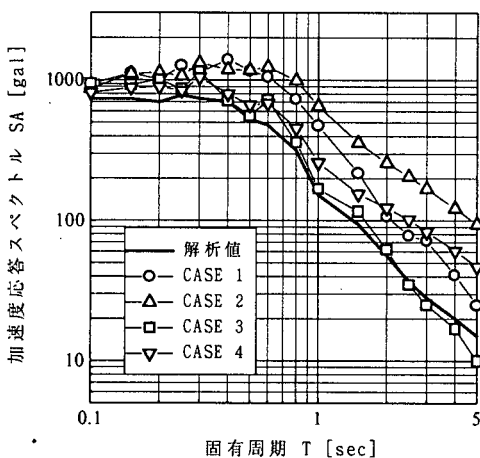
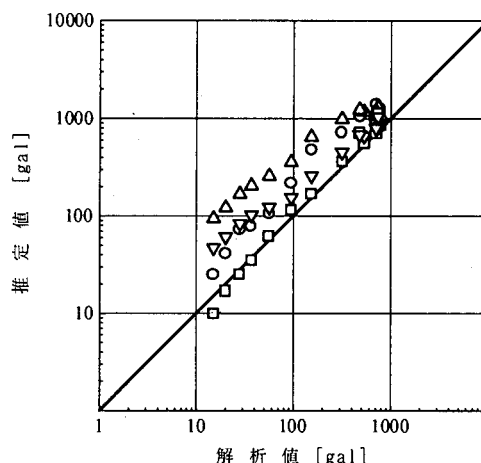


図-4 フーリエ振幅応答倍率のモデル関数



(a) 非線形加速度応答スペクトルの比較



(b) 解析値と推定値の比較

図-5 位相モデルの違いによる非線形加速度応答 ($\mu=8$) の推定精度の比較 (JMA KOBE N-S)

表-2 振幅応答倍率モデル関数の

等価固有周期: $T_{eq}[\text{sec}]$, 等価減衰定数 heq

応答塑性率 μ	2	4	6	8
等価固有周期 T_{eq}	$1.078 \cdot T$	$1.338 \cdot T$	$1.530 \cdot T$	$1.781 \cdot T$
等価減衰定数 heq	0.217	0.345	0.402	0.469

T : 初期固有周期 [sec]

表-3 位相モデルの検討ケース

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
固有周期	T	T	T_{eq}	T_{eq}
減衰定数	h	heq	h	heq

T : 初期固有周期 [sec]

h : 減衰定数 (=5%)

T_{eq}, heq : 表-2 に示す等価線形モデル

解析で得られたフーリエ振幅応答倍率と類似の特性を有しており、非線形加速度応答のフーリエ振幅応答倍率を正弦波入力のフーリエ振幅応答倍率で評価できることがわかる。

本研究では、正弦波を入力した場合のフーリエ振幅応答倍率を、等価固有周期 $T_{eq}[\text{sec}]$ と等価減衰定数 heq を有する線形応答のフーリエ振幅応答倍率でモデル化することを試みた。すなわち、線形応答のフーリエ振幅応答倍率と図-3 の正弦波を入力した場合のフーリエ振幅応答倍率の残差が最小となるような T_{eq} と heq を設定した。図-4 に設定した加速度フーリエ振幅応答倍率のモデル関数を、表-2 にモデル関数に対応する T_{eq} と heq を示す。

(2) 位相特性(群遅延時間)のモデル化

図-2 に示したように、入力地震動と加速度応答の群遅延時間は類似している。そこで、非線形動的解析により得られた加速度応答のフーリエ振幅と、種々の方法でモデル化した位相特性を組み合わせ非線形加速度応答を推定し、妥当な位相特性のモデル化について検討した。種々の位相特性としては表-3 に示す CASE 1~CASE 4 の固有周期と減衰定数を有する弾性加速度応答の位相特性を用いた。

非線形加速度応答の推定値と非線形動的解析結果の加速度応答スペクトルの比較を図-5(a)に示す。また、図-5(a)でプロットした各固有周期における解析値と推定値の関係を図-5(b)に示す。これらの図から、位相特性のモデル化の違いが非線形応答値の推定値に及ぼす影響が大きいことがわかる。また、CASE 3 の位相特性を用いたときの推定精度が高いと判断できることから、本研究では CASE 3 で位相特性をモデル化することとした。

5. 非線形応答値の推定

モデル化したフーリエ振幅応答倍率と位相特性を用いて、表-1 に示した地震動を入力した場合の非線形応答値(本研究では、最大加速度応答)の推定を試みた。図-6 に推定値と非線形動的解析値を比較した結果を示す。また、図-7 に $\mu=6$ とした非線形加速度応答スペクトルを比較した結果の

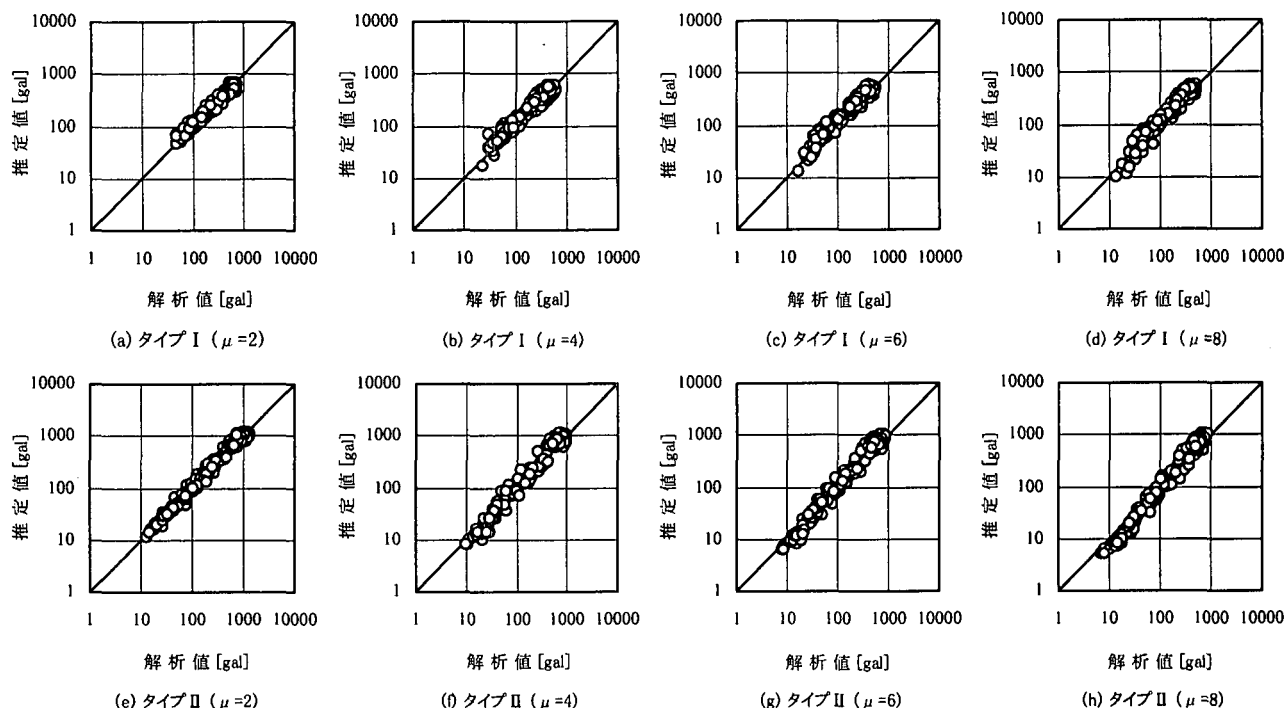


図-6 非線形加速度応答の解析値と推定値の比較

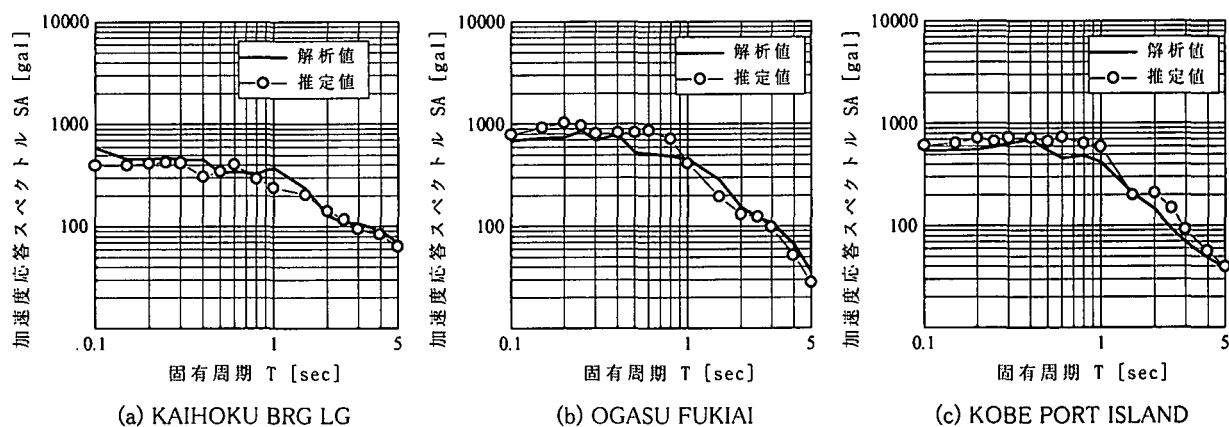


図-7 非線形加速度応答の推定値と解析値の比較 ($\mu = 6$)

一例を示す。これらによれば、提案した手法で推定した非線形加速度応答値は非線形動的解析値と概ね一致していることがわかる。

6. まとめ

本研究では入力地震動と非線形加速度応答の振動数領域における振幅特性と位相特性を比較することにより、入力地震動の特性に基づいた非線形加速度応答を推定する手法を提案した。

本研究から得られた結論は以下のとおりである。

- ① 正弦波を入力した場合の非線形加速度応答に基づいてモデル化したフーリエ振幅応答倍率を用いて、非線形加速度応答の振幅特性を概ね推定することができる。
- ② 入力地震動と加速度応答(線形、非線形)の群遅延時間は類似しているが、位相特性のモデル化の違いが非線

形応答値の推定精度に及ぼす影響は大きい。

- ③ 非線形応答の位相特性を、等価固有周期を有する系の線形応答の位相特性でモデル化することで非線形応答値の推定精度を高めることができる。
- ④ 提案した手法により非線形加速度応答を簡便に推定することが可能である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成 8 年 12 月
- 2) (社)日本道路協会:道路橋の耐震設計に関する資料, 平成 9 年 3 月
- 3) 平澤、田村、中尾:周波数応答関数を用いた弾塑性応答の推定方法について, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集 平成 12 年 9 月