

耐震性能の照査に用いる非線形解析に関する一考察

北武コンサルタント(株) ○正会員 笠井 尚樹  
 北武コンサルタント(株) 正会員 渡辺 忠朋  
 (財) 鉄道総合技術研究所 正会員 下野 一行

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、種々の機関で耐震設計法の見直しが進められた。土木学会示方書<sup>1)</sup>をはじめとして道路構造物、鉄道構造物の耐震設計<sup>2) 3)</sup>において、構造物の耐震性能の照査に用いる応答値の算定方法として地震動の影響を直接評価できる動的非線形時刻歴応答解析法の適用が推奨されている。

同時に、簡易に構造物の耐震性能を照査する場合の応答値の算定方法として静的非線形解析の適用も認められている<sup>2) 3)</sup>。その場合、静的非線形解析法は構造物に生じる地震動による動的な作用を静的な作用に置換する必要がある。

この手法自体は、従来から適用されてきた震度法ベースの設計法に用いられている手法であるが、構造物の非線形領域を含めた範囲での適用性について十分に検討されているとは言い難い。

そこで、静的非線形解析による耐震性能の照査に用いる慣性力についての基礎資料を得るために、構造物の動的非線形解析を実施して耐震性能の照査に用いる非線形解析時に作用させる慣性力について検討することとした。以下に、その概要を示す。

2. 検討条件等

2.1 検討対象構造物および解析モデル

検討は、図 2.1 に示す鉄道用橋脚(杭基礎)を基本モデルとして、図 2.2 に示すような橋脚およびフーチングを質点とし、杭基礎部分をフーチングを支持するばねに置換した多質点系の SR モデルを用いた。

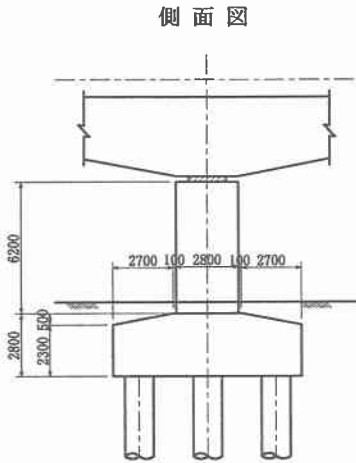


図 2.1 鉄道用橋脚(杭基礎)

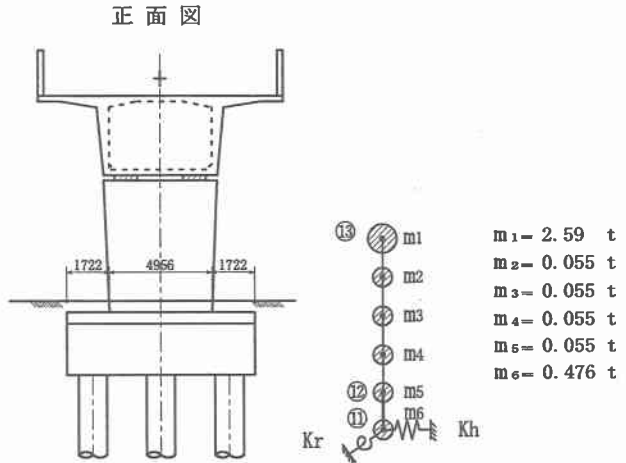


図 2.2 構造解析モデル

A Study on Nonlinear Analysis used Seismic-design  
 by Naoki Kasai, Tadatomo Watanabe, Kazuyuki Shimono

## 2.2 パラメータの概要

解析に用いたパラメータは、上部構造の剛性、基礎構造の剛性（水平、回転）および地震動とした。各検討ケースのパラメータの概要を表 2.1 に示す。

CASE1 は、上部構造の非線形特性を一定として、基礎構造の水平剛性のみを変化させた解析ケースである。CASE2 は、1 次の固有周期が概ね一定となるように上部構造の剛性および基礎構造の水平剛性を変化させた解析ケースである。CASE3 は、上部構造質量を変化させた解析ケースである。CASE4 および 5 は、CASE1 および 2 に対して上部構造の質量を変化させたケース、CASE6 は、回転ばねを回転ばね剛性のみ変化させたケースである。CASE7 は、1 次の固有周期が概ね一定になるように基礎の回転ばね剛性および水平剛性を変化させたケースである。なお、いずれのケースとも基礎構造は線形、上部構造は非線形とした（図 2.3 参照）。解析に用いた入力地震動の加速度の弾性応答スペクトルを、図 2.4 に示す。

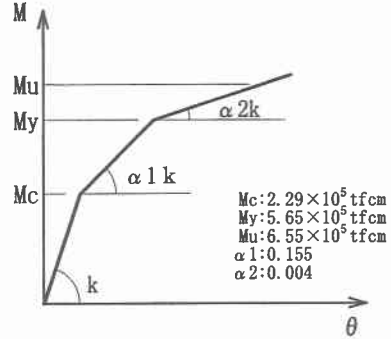


図 2.3 部材の比線形性

表 2.1 パラメータの概要

	$K_h$	$K_R$	$K_b$	地震動	$m_l$	$m$
CASE1-1	1.71E+02	1.63E+08	1.19E+07	A	3.287	0.695
CASE1-2	3.42E+02	1.63E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE1-3	6.84E+02	1.63E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE1-4	1.71E+03	1.63E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE1-5	3.42E+03	1.63E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE2-1	3.40E+02	1.63E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE2-2	6.80E+02	1.63E+08	2.18E+08	A	3.287	0.695
CASE2-3	1.70E+03	1.63E+08	1.45E+08	A	3.287	0.695
CASE2-4	3.40E+03	1.63E+08	1.29E+08	A	3.287	0.695
CASE3-1	3.42E+02	1.63E+08	1.19E+09	A	5.18	0.695
CASE3-2	3.42E+02	1.63E+08	1.19E+09	A	1.3	0.695
CASE3-3	1.71E+03	1.63E+08	1.19E+09	A	5.18	0.695
CASE3-4	1.71E+03	1.63E+08	1.19E+09	A	1.3	0.695
CASE4-1	1.71E+02	1.63E+08	1.19E+09	B	3.287	0.695
CASE4-2	3.42E+02	1.63E+08	1.19E+09	B	3.287	0.695
CASE4-3	6.84E+02	1.63E+08	1.19E+09	B	3.287	0.695
CASE4-4	1.71E+03	1.63E+08	1.19E+09	B	3.287	0.695
CASE4-5	3.42E+03	1.63E+08	1.19E+09	B	3.287	0.695
CASE5-1	3.40E+02	1.63E+08	1.19E+09	B	3.287	0.695
CASE5-2	6.80E+02	1.63E+08	2.18E+08	B	3.287	0.695
CASE5-3	1.70E+03	1.63E+08	1.45E+08	B	3.287	0.695
CASE5-4	3.40E+03	1.63E+08	1.29E+08	B	3.287	0.695
CASE6-1	1.71E+02	8.15E+07	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE6-3	1.71E+02	3.26E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE6-4	1.71E+02	8.15E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE6-5	1.71E+02	1.63E+09	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE7-1	7.00E+02	1.00E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE7-3	2.10E+02	3.40E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695
CASE7-4	1.80E+02	6.70E+08	1.19E+09	A	3.287	0.695

$K_h$  : 基礎構造の水平剛性 (tf/cm)

$K_R$  : 基礎構造の回転剛性 (tfcm/rad)

$K_b$  : 上部構造の曲げ剛性 (tfcm/rad)

## 3. 動的非線形解析結果および考察

検討ケースの着目点の加速度、および変位の時刻歴の例を図 3.1~3.6 に示す。

図中に、橋脚体が曲げひび割れ、曲げ降伏および最大応答時のそれぞれの回転角 ( $\theta_c$ ,  $\theta_y$  および  $\theta_{max}$ ) 時および基礎構造の水平変位最大時を图示した。

上部構造の応答に着目すると、上部構造の降伏は上部構造の加速度が最大になる時点と一致しており、最大応答回転角は、上部構造の最大加速度時や最大変位時には発生せず、基礎構造が上部構造と正負逆の加速度が生じている状態で生じていることが分かる。

基礎構造の応答に着目すると、基礎構造の最大応答水平変位は、概ね上部構造の加速度最大時に生じており、上部構造降伏時には基礎構造に対しても上部構造の加速度の 25~80%の加速度が発生していることが分かる。また、上部構造が最大応答回転角に達する時に基礎構造に発生している加速度は、上部構造の降伏時に比べて小さくなっている結果となった。

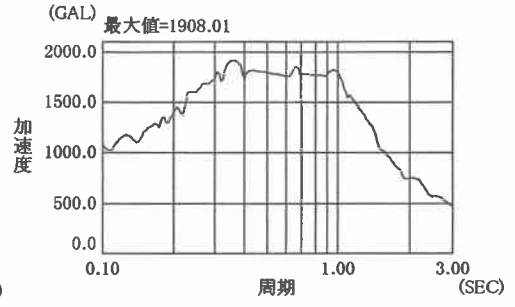
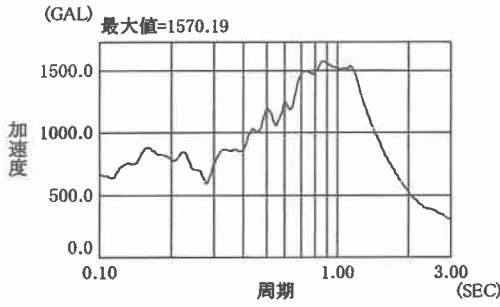


図 2.4 弾性加速度応答スペクトル

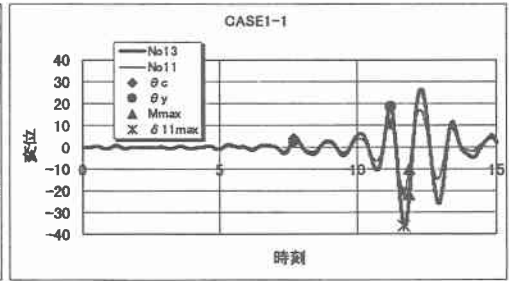
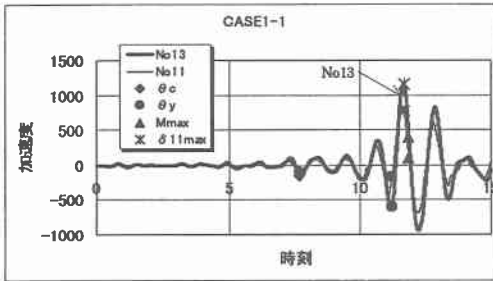


図 3.1 加速度および変位時刻歴 (CASE1)

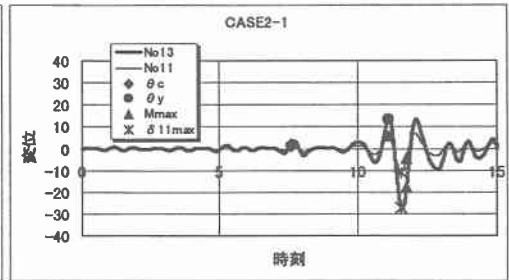
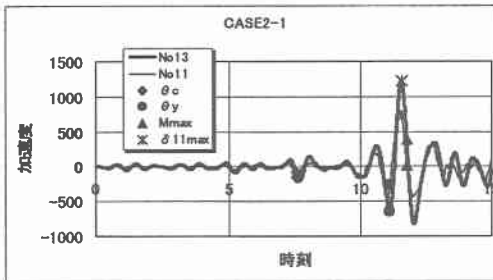


図 3.2 加速度および変位時刻歴 (CASE2)

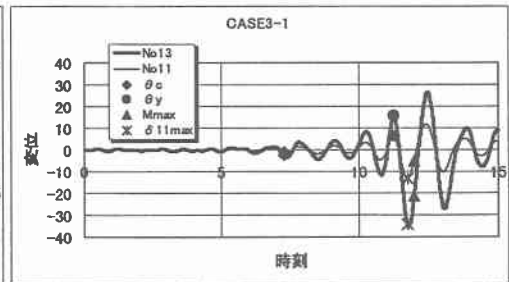
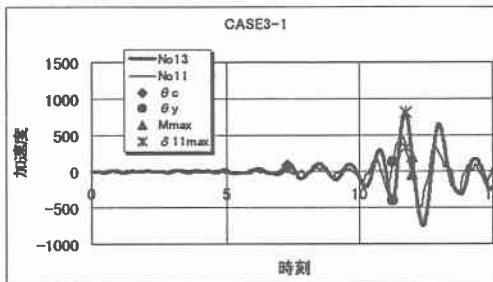


図 3.3 加速度および変位時刻歴 (CASE3)

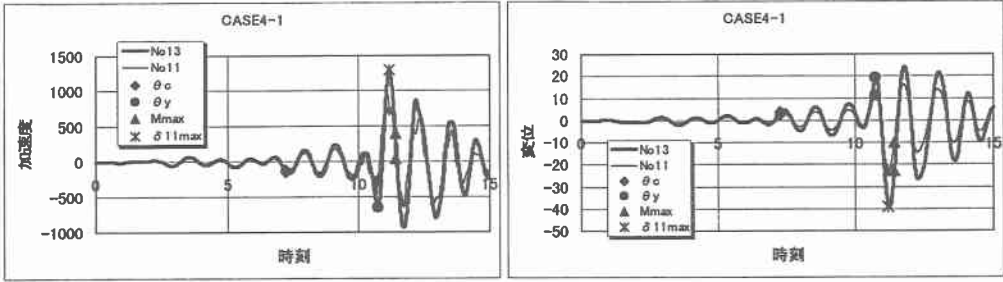


図 3.4 速度および変位時刻歴 (CASE4)

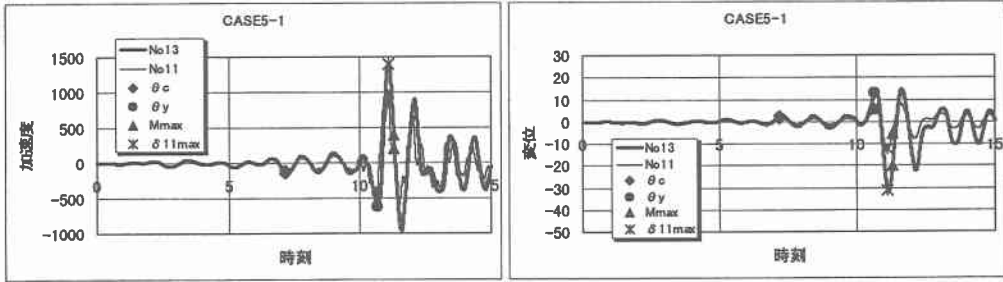


図 3.5 速度および変位時刻歴 (CASE5)

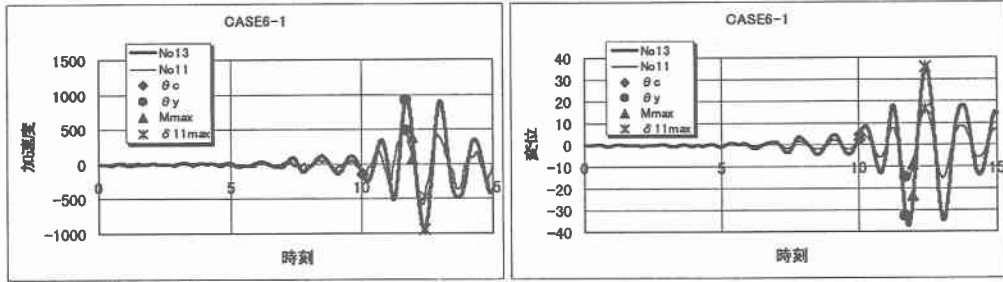


図 3.6 速度および変位時刻歴 (CASE6)

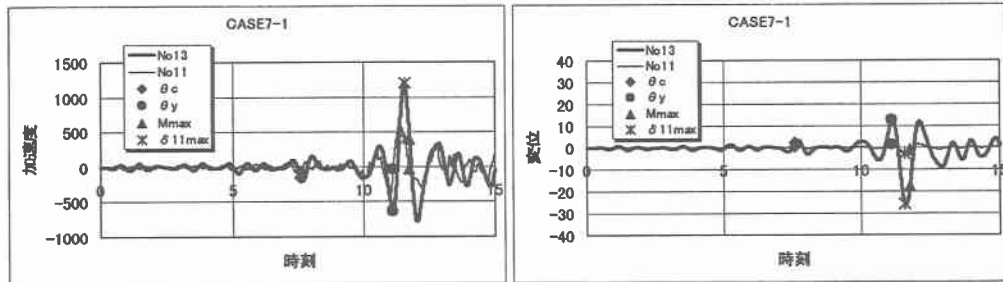


図 3.7 速度および変位時刻歴 (CASE7)

#### 4.1 静的解析に用いる慣性力の考え方

3に示した解析結果から、耐震性能の照査に用いる慣性力モデルについて考慮すべき事項を定性的に示すと以下ようになる。

- 1) 上部構造系の耐震性能（部材の塑性状況）を照査する場合は、上部構造系に最大加速度が発生する時点で上部構造の応答値（回転角）は最大となると仮定し、基礎構造に生じる加速度の影響を無視した慣性力を想定する。

解析結果によると、部材の最大応答値は最大加速度時よりも小さい加速度で発生していることから、上記の手法から得られる部材の最大応答値は、動的解析時の基礎が基礎構造が橋脚と逆位相となる影響を無視しても、動的解析から得られる最大応答値よりも大きな値となり、照査上安全側の値を得ることが出来ると考えられる。

- 2) 基礎構造の耐震性能を照査する場合は、上部構造が降伏する時点で基礎構造に作用する加速度を推定して、その影響を上部構造の加速度の影響に付加した荷重分布を想定する必要がある。

#### 4.2 基礎構造物の照査に用いる慣性力

各検討ケースの固有周期と上部構造および基礎構造の最大応答加速度を表4.1に示す。

表4.1に示すように、基礎構造に作用する加速度は、動的解析の結果から一定値とはならない。そこで、上部構造の最大応答加速度（ $\alpha_{bmax}$ ）と基礎構造の最大応答加速度（ $\alpha_{fmax}$ ）の比（ $\alpha_{fmax}/\alpha_{bmax}$ ）と、上部構造部分、基礎部分（水平剛性、回転剛性）、上部構造と下部構造の質量比等をパラメータとして、多変量解析を実施した。その結果、次式を得た。 $\alpha_{fmax}/\alpha_{bmax}$ の計算値と解析値の関係を図4.2に示す。

$$\frac{\alpha_{fmax}}{\alpha_{bmax}} = 0.96 - 0.42T_b + 0.25T_h - 0.68T_r$$

ここに、

$\alpha_{fmax}$  : 基礎構造の最大加速度

$\alpha_{bmax}$  : 上部構造の最大加速度

$T_b$  : 上部構造の固有周期

$T_h$  : 基礎構造の水平剛性による固有周期

$T_r$  : 基礎構造の回転剛性による固有周期

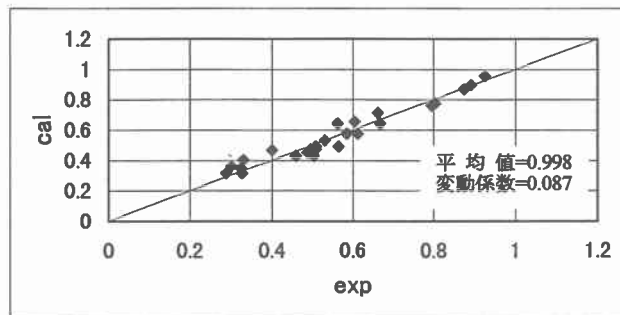


図4.2 ( $\alpha_{fmax}/\alpha_{bmax}$ )の推定

表 4.1 上部構造および基礎構造の最大応答加速度

	固有周期 (sec)					m1/m	最大加速度 (gal)		$\alpha f_{max} / \alpha b_{max}$ exp	$\alpha f_{max} / \alpha b_{max}$ cal	exp/cal
	$T_a$	$T_h$	$T_r$	$T_f$	$T_b$		$\alpha b_{max}$	$\alpha f_{max}$			
CASE1-1	1.057	0.871	0.679	1.104	0.183	4.729	1.15E+03	7.69E+02	0.668	0.641	1.041
CASE1-2	0.867	0.616	0.679	0.917	0.183	4.729	1.22E+03	7.12E+02	0.584	0.577	1.012
CASE1-3	0.757	0.436	0.679	0.806	0.183	4.729	1.17E+03	6.20E+02	0.530	0.531	0.999
CASE1-4	0.686	0.276	0.679	0.732	0.183	4.729	1.11E+03	5.63E+02	0.508	0.490	1.036
CASE1-5	0.661	0.195	0.679	0.706	0.183	4.729	1.08E+03	5.34E+02	0.495	0.470	1.054
CASE2-1	0.867	0.618	0.679	0.918	0.183	4.729	1.22E+03	7.14E+02	0.585	0.577	1.014
CASE2-2	0.848	0.437	0.679	0.807	0.427	4.729	7.94E+02	3.64E+02	0.458	0.430	1.067
CASE2-3	0.842	0.276	0.679	0.733	0.523	4.729	6.82E+02	2.22E+02	0.326	0.349	0.933
CASE2-4	0.843	0.195	0.679	0.706	0.554	4.729	6.51E+02	1.89E+02	0.290	0.316	0.919
CASE3-1	1.202	0.773	0.852	1.151	0.258	7.453	8.12E+02	3.25E+02	0.400	0.468	0.855
CASE3-2	0.636	0.387	0.427	0.576	0.130	1.871	1.19E+03	7.88E+02	0.662	0.711	0.932
CASE3-3	0.962	0.346	0.852	0.919	0.258	7.453	9.50E+02	2.87E+02	0.302	0.360	0.839
CASE3-4	0.492	0.173	0.427	0.461	0.130	1.871	1.01E+03	6.09E+02	0.604	0.657	0.920
CASE4-1	1.057	0.871	0.679	1.104	0.183	4.729	1.29E+03	7.25E+02	0.562	0.641	0.877
CASE4-2	0.867	0.616	0.679	0.917	0.183	4.729	1.40E+03	8.55E+02	0.611	0.577	1.059
CASE4-3	0.757	0.436	0.679	0.806	0.183	4.729	1.17E+03	6.20E+02	0.531	0.531	1.000
CASE4-4	0.686	0.276	0.679	0.732	0.183	4.729	1.30E+03	7.34E+02	0.565	0.490	1.151
CASE4-5	0.661	0.195	0.679	0.706	0.183	4.729	1.29E+03	6.56E+02	0.509	0.470	1.082
CASE5-1	0.867	0.618	0.679	0.918	0.183	4.729	1.40E+03	8.57E+02	0.612	0.577	1.061
CASE5-2	0.848	0.437	0.679	0.807	0.427	4.729	9.20E+02	4.63E+02	0.503	0.430	1.171
CASE5-3	0.842	0.276	0.679	0.733	0.523	4.729	6.82E+02	2.22E+02	0.326	0.349	0.933
CASE5-4	0.843	0.195	0.679	0.706	0.554	4.729	7.26E+02	2.38E+02	0.328	0.316	1.038
CASE6-1	1.212	0.871	0.959	1.296	0.183	4.729	9.42E+02	4.59E+02	0.487	0.452	1.079
CASE6-3	0.974	0.871	0.480	0.995	0.183	4.729	1.19E+03	9.56E+02	0.803	0.776	1.036
CASE6-4	0.922	0.871	0.303	0.923	0.183	4.729	1.20E+03	1.07E+03	0.892	0.895	0.997
CASE6-5	0.904	0.871	0.214	0.897	0.183	4.729	1.20E+03	1.11E+03	0.925	0.955	0.969
CASE7-1	0.894	0.431	0.866	0.967	0.183	4.729	1.20E+03	3.97E+02	0.331	0.403	0.820
CASE7-3	0.895	0.786	0.470	0.916	0.183	4.729	1.21E+03	9.62E+02	0.795	0.761	1.045
CASE7-4	0.909	0.849	0.335	0.913	0.183	4.729	1.20E+03	1.05E+03	0.875	0.868	1.008

$T_a$  : 全体系の固有周期

$T_f$  : 基礎構造の固有周期

$\alpha b_{max}$  : 上部構造の最大応答加速度

$T_h$  : 基礎構造の水平剛性固有周期

$T_b$  : 上部構造の固有周期

$\alpha f_{max}$  : 基礎構造の最大応答加速度

$T_r$  : 基礎構造の回転固有周期

## 5. 結論

構造物の動的な影響を静的な作用に置き換え、簡便に耐震性能を照査する場合の慣性力の取り扱い、上部構造のみが非線形化する場合、本検討の範囲内では以下のように取り扱ってよいと考えられる。

### 1) 上部構造部分の耐震性能の照査を行う場合

基礎構造に作用する慣性力の影響を無視して、構造物の天端に水平力を作用させて変位増分解析を行う。

### 2) 基礎構造部分の耐震性能の照査を行う場合

基礎構造に作用する慣性力の影響を考慮して、構造物の天端および基礎圆心に水平力を作用させて上部構造が降伏するまで増分解析を行う。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕，平成8年
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料，平成8年3月
- 3) (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