

I-B468 地震時保有水平耐力法と非線形動的解析による耐震検討の比較と課題

奥村組 電算センター 正会員 森尾 敏
九州工業大学 工学部 正会員 幸左賢二
山口大学 工学部 正会員 宮本文穂

1. まえがき

RC単柱橋脚を対象とした耐震補強設計において、地震時保有水平耐力法(以下、保耐法)による照査で危険と判定された橋脚が、非線形動的解析による照査で安全と判定される事例が報告されている。本報告では阪神高速道路公団の2種及び3種地盤における標準的な橋梁を取り上げ、保耐法と非線形動的解析による照査の比較を行い、両者の違いが生じる原因、非線形動的解析の妥当性について検討する。

2. 対象橋梁及び保耐法による照査

対象橋梁は阪神高速道路公団の標準的な橋脚で、上部構造は6径間連続鋼鈑桁橋、支間長は35m、全幅員は20.25m、支承はゴム支承である。基礎は場所打ち杭基礎(φ1.5m)で、2種地盤は $L=20\text{m}$ 、 $n=9$ 本、3種地盤は $L=27.5\text{m}$ 、 $n=12$ 本である。対象橋梁の橋軸直角方向解析モデルを図1に示す。2種と3種地盤ではフーチング下端の基礎パネの位置が異なる。また、橋軸方向の設計は分散支承を使用しているため、動的解析により行うことを基本としている。保耐法による橋軸直角方向断面の照査結果を表1に示す。

3. 非線形動的解析による照査

2種地盤のタイプI地震、3種地盤のタイプII地震では、保耐法と非線形動的解析による照査結果は一致し、両者とも安全と判定された。以下、2種地盤のタイプII地震、3種地盤のタイプI地震の結果について述べる。

入力地震波は応答スペクトル適合波を用い、2種地盤のタイプII地震として兵庫県南部地震におけるJR西日本鷹取NS成分波($\text{Max}=686.8\text{gal}$)、3種地盤のタイプI地震として日本海中部地震における津軽大橋周辺地盤上TR成分波($\text{Max}=433.37\text{gal}$)を採用する。これらの加速度応答スペクトルを図2に示す。2種地盤では0.4~1.1sの加速度応答スペクトル一定領域でエネルギー一定則が適用できそうである。また、3種地盤では加速度応答スペクトル一定領域が0.3~2.0s付近にあり、エネルギー一定則の適用範囲が広いといえる。粘性減衰については、下部構造の減衰定数を $h_b=0.02$ 、基礎構造(フーチング下端パネ)の減衰定数を $h_0=0.20$ とし、固有値解析結果から各モードのモード減衰(ひずみエネルギー比例減衰定数)を設定する。

$h_0=0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ とした線形動的解析を行った。図3に2種地盤においてレイレイ減衰で設定される減衰定数と上部構造位置最大応答加速度、最大応答変位を示す。この結果は図2の加速度応答スペクトルと整合しており、線形動的解析では1次モードの寄与が支配的で、加速度応答スペクトルに基づく保耐法の適用が妥当であることを示す。また、 $h_0=0.20$ の場合、最大加速度は2種地盤で1174gal、3種地盤で778galであり、保耐法で設定される水平震度(2種地盤1.75、3種地盤1.00)よりかなり小さい。両者の入力レベルを同じにするには、2種地盤で $h_0=0.05$ 、3種地盤で $h_0=0.10$ 程度の減衰を用いる必要がある。

表1 保耐法による照査結果

2種地盤	地震時保有水平耐力		3種地盤	地震時保有水平耐力	
	タイプI($\alpha=3.0$)	タイプII($\alpha=1.5$)		タイプI($\alpha=3.0$)	タイプII($\alpha=1.5$)
終局水平耐力 $P_u(\text{tf})$	757.0	757.6	終局水平耐力 $P_u(\text{tf})$	869.9	871.3
せん断耐力 $P_s(\text{tf})$	2055.9	2135.6	せん断耐力 $P_s(\text{tf})$	2023.3	2138.4
破壊形態の判定	曲げ破壊型	曲げ破壊型	破壊形態の判定	曲げ破壊型	曲げ破壊型
保有水平耐力 $P_a(\text{tf})$	757.0	757.6	保有水平耐力 $P_a(\text{tf})$	869.9	871.3
地震時慣性力			地震時慣性力		
許容塑性率 μ_a	1.79	4.31	許容塑性率 μ_a	1.62	3.38
設計水平震度 K_{hc}	0.85	1.75	設計水平震度 K_{hc}	1.00	1.50
等価水平震度 K_{he}	0.53	0.63	等価水平震度 K_{he}	0.67	0.625
等価重量 $w(\text{tf})$	1369.3	1369.3	等価重量 $w(\text{tf})$	1369.3	1369.3
慣性力 $K_{he} \cdot W(\text{tf})$	725.7	862.7	慣性力 $K_{he} \cdot W(\text{tf})$	914.9	855.8
照査	$P_a > K_{he} \cdot W$	$P_a < K_{he} \cdot W$	照査	$P_a < K_{he} \cdot W$	$P_a > K_{he} \cdot W$
判定	安全	危険	判定	危険	安全

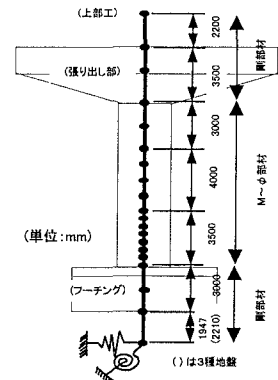


図1 解析モデル

キーワード：地震時保有水平耐力法、非線形動的解析、エネルギー一定則

連絡先：森尾 敏(〒545-8555 大阪市松崎町2-2-2、奥村組電算センター)

表2 動的解析による照査結果

(a) 2種地盤タイプII地震							
	線形解析		非線形解析		$\delta y=7.54\text{cm}$		
	最大加速度 (gal)	最大変位 (cm)	最大加速度 (gal)	最大変位 $\delta_{\max}$ (cm)	塑性率 μ	許容塑性率 μ_a	判定
$h_b=0.20$	1174	18.90	651.9	25.95	3.44	4.31	安全
$h_b=0.05$	1911	31.34	577.5	44.17	5.86	4.31	危険

(b) 3種地盤タイプI地震							
	線形解析		非線形解析		$\delta y=7.77\text{cm}$		
	最大加速度 (gal)	最大変位 (cm)	最大加速度 (gal)	最大変位 $\delta_{\max}$ (cm)	塑性率 μ	許容塑性率 μ_a	判定
$h_b=0.20$	777.5	7.808	541.6	11.22	1.44	1.62	安全
$h_b=0.10$	969.6	9.752	561.9	18.43	2.37	1.62	危険

表3 エネルギー一定則の検討

h_b	方法	δp (cm)	δd (cm)	$\delta p / \delta d$
2種地盤	①	27.64	25.95	1.07
	②	30.82		1.19
	①	59.94	44.17	1.36
	②	68.91		1.56
3種地盤	①	9.11	11.22	0.81
	②	10.25		0.91
	①	12.07	18.43	0.65
	②	13.80		0.75

動的解析による照査結果

果を表2に示す。2種、3種地盤とも $h_b=0.20$ では安全と判定される。一方、動的解析による入力動を保耐法と同レベルに設定した場合、危険と判定され、保耐法の結果と一致する。以上の結果より、動的解析では2種、3種地盤とも基礎減衰 ($h_b=0.20$) の効果により構造系への入力地震動レベルが保耐法の入力レベルより小さなものになっている。このため、保耐法で危険と判定された橋脚が非線形動的解析で安全となる結果が得られたものである。

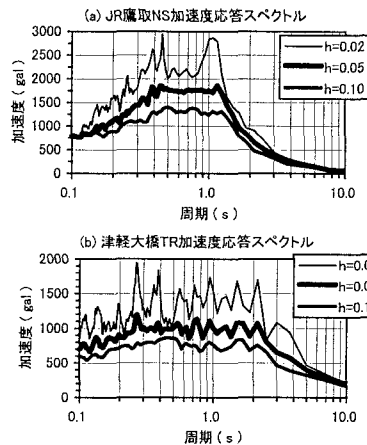


図2 加速度応答スペクトル

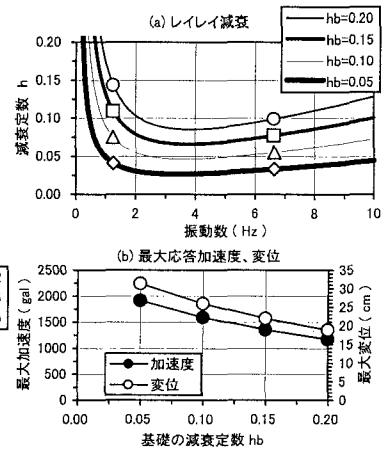


図3 レイレイ減衰、最大応答

プッシュオーバー解析で得られた $P-\delta$ 関係に基づき、以下の2つの方法で水平力 F を求め、エネルギー一定則が満足されているかどうか検討した。①**方法1**：線形動的解析の上部構造位置最大応答加速度 α と等価重量 W から水平力 $F (=W\alpha/980)$ を求め、エネルギー一定則で得られる変位 δp と非線形動的解析で得られる変位 δd を比べる。②**方法2**：線形動的解析の上部構造位置最大応答変位 δe とプッシュオーバー解析の $P-\delta$ 関係の第一勾配 K_1 から水平力 $F (=K_1 \delta e)$ を求め、 δp と δd を比べる。解析結果を表3に示す。2種地盤の $h_b=0.05$ では、エネルギー一定則は満足されない。これは、下部構造への入力地震動の増加に伴い、卓越周期が0.8sから1.58sまで長周期化し(図4)、エネルギー一定則適用領域(図2(a)参照)から変位一定則適用領域に近づいたためであろう。3種地盤は2種地盤とは逆に $\delta p < \delta d$ で、保耐法が危険側の設計になる。これは、3種地盤は図5に○印で示すように、武田モデル($\alpha=0.4$)の最大ループ時の履歴減衰が小さく、動的解析による変位 δd が大きくなったものである。

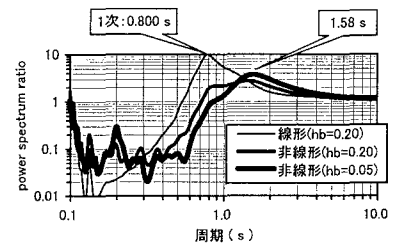


図4 上部構造加速度のスペクトル比

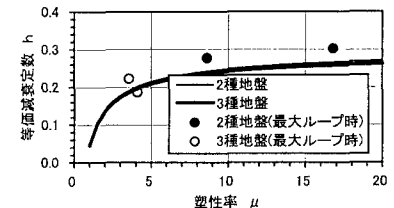


図5 武田モデルの履歴減衰特性

4. **結論** 基礎減衰 ($h_b=0.20$) の効果により、動的解析の入力レベルは保耐法の入力レベルよりかなり小さい。また、2種地盤では動的解析の入力レベルを増加させることで、系の固有周期が長周期化し、エネルギー一定則適用領域からはずれ、変位一定則適用域に近づく。なお、別途行った基礎の非線形骨組み構造解析によると、基礎の耐力は橋脚の2倍程度以上あり、動的解析における基礎バネの応答は水平、回転とも弾性範囲内にある。