

等価線形化法の適用性に関する一考察

中村 敏雄¹・牛島 宏¹・江尻 秀行¹・石橋 正博¹・中野 聡¹

¹正会員 株式会社福山コンサルタント 東日本事業部設計部 (〒136-0071 東京都江東区亀戸2-25-14 立花アネックスビル)

1. はじめに

平成11年度に道路橋示方書(以下、道示と称す)の追加改定が行われ、Bタイプ地震時水平力分散型ゴム支承を有する橋梁は、地震時の挙動が複雑となるため、動的解析による照査が義務づけられた。また、その手法の一つとして従来までの1自由度モデルによる地震時保有水平耐力法(以下、保耐法と称す)に替わり、上部構造と下部構造を分離し支承をモデルに取り込んだ2自由度モデルによる等価線形化法が提案された。

等価線形化法は、直接積分法と比べ時刻歴での応答を逐一算出せず、脚および基礎の等価剛性および等価減衰定数を用いて変形照査をおこなう簡便な手法であるが、解析結果は支承と脚および基礎の剛性比に依存するため、従来までの震度法および保耐法で決定した断面では耐震性能を満足しない場合が多々ある。

実設計レベルでは、最適断面を決定するために膨大な収束計算が行われるため、その解析手法の傾向を把握することは重要である。

本稿はBタイプ地震時水平力分散型ゴム支承を有する橋梁の耐震性能を把握することを目的とし、実設計を例として、上部構造・橋脚高さおよび地盤種別ごとのパラメータを変化させ、実設計に準じて設定された各断面に対して等価線形化法・非線形時刻歴応答解析にて耐震性の照査を行い、双方を比較して等価線形化法の適用性について考察を行ったものである。

2. 解析条件の設定

検討対象構造物の諸条件を以下に示す。なお、検討は橋軸方向について行った。

(1) 重要度区分および地域区分

重要度区分: B種の橋

地域区分: A地域 ($C_z = 1.0$)

(2) 上部構造

上部構造は、スパン $L = 40\text{m}$ 程度の連続桁を想定し、鋼桁系として鋼鈑桁を、PC桁系としてポステンT

桁を設定した。なお、地震時の分担重量は死荷重と同一とした。

・鋼桁系…上部工死荷重反力 $R_d = 450.0\text{tf}$

・PC桁系…上部工死荷重反力 $R_d = 1150.0\text{tf}$

(3) 支承

全橋脚ともにBタイプ地震時水平力分散型ゴム支承とし、支承形状は保耐法レベル地震動にて決定し、上部工ごとに一律とした。

・鋼桁系…水平ばね値 $KB = 1700.0\text{tf/m}$

・PC桁系…水平ばね値 $KB = 4078.0\text{tf/m}$

(4) 橋脚形状

橋脚は張出式RC橋脚を想定し、柱高さ $H = 10\text{m}$ ・ $H = 15\text{m}$ ・ $H = 25\text{m}$ の3タイプの検討を行った。なお、柱寸法および配筋は震度法および保耐法にて決定した。構造物の形状寸法図を図-1に示す。

(5) 地盤条件および基礎形式

地盤条件は表-1に示すとおり、I種地盤・II種地盤・III種地盤の3タイプを想定した。基礎形式は以下に示すよう、I種地盤は直接基礎とし、II種地盤・III種地盤は杭基礎(杭径 $\phi 1200\text{mm}$)とした。なお、基礎構造についてもケースごとに震度法および保耐法にて決定した。

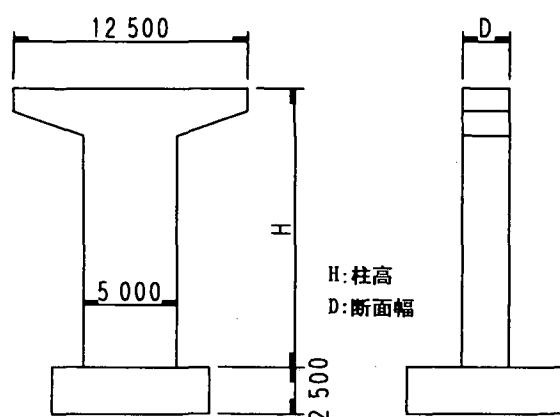


図-1 構造物の形状寸法

・I種地盤…直接基礎

・II種地盤…杭基礎(杭長 $L = 20.0\text{m}$)

・III種地盤…杭基礎(杭長 $L = 25.0\text{m}$)

以上の条件で等価線形化法および非線形時刻歴応答解析をおこなった。検討の流れを図-2にフローで示す。

表-1 地盤種別ごとの地盤条件

I 種地盤					
層厚 l(m)	土質	N値	γ (tf/m ³)	V_s (m/s)	G_o (t/m ²)
-	砂礫	-	2.0	371	28090
II 種地盤					
層厚 l(m)	土質	N値	γ (tf/m ³)	V_s (m/s)	G_o (t/m ²)
5.00	粘性土	7	1.7	191	6328
5.00	砂質土	12	1.7	183	5809
4.00	粘性土	10	1.8	215	8490
4.00	砂質土	20	1.9	217	9130
2.00	砂質土	50	1.9	295	16872
III 種地盤					
層厚 l(m)	土質	N値	γ (tf/m ³)	V_s (m/s)	G_o (t/m ²)
6.00	粘性土	3	1.6	144	3385
5.00	砂質土	10	1.7	172	5132
8.00	粘性土	8	1.8	200	7347
4.00	砂質土	5	1.7	137	3256
2.00	砂質土	50	1.9	295	16872

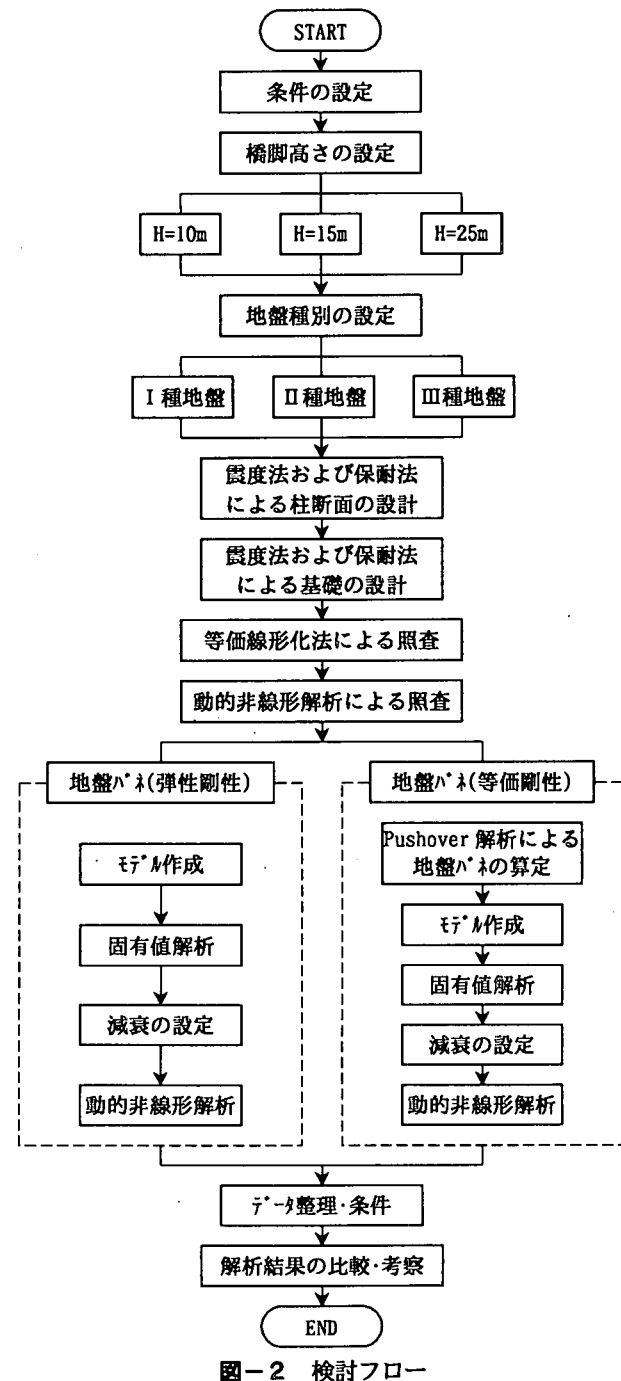


図-2 検討フロー

3. 等価線形化法の傾向

(1) 解析条件の整理

等価線形化法で照査を行うにあたり、解析対象構造物の固有周期を表-2.1・表-2.2に、保耐法の結果の概要を表-3.1・表-3.2に示す。なお保耐法では、耐力および残留変位を90%程度で決定することを目安としている。

固有周期の結果は、PC桁系のほうが上部工重量が大きいため全体的に固有周期は長い。地盤種別がI種、II種からIII種へと変化した際に長周期化していないが、これは、実設計断面における固有周期が1秒~2秒間ではI種地盤における慣性力が小さく、躯体の剛性も低く設計できるためであり、固有周期は地盤パネの影響よりも、躯体の剛性による影響が大きくなったためである。

保耐法の結果より、H=10m・15mのI種地盤・II種地盤はタイプII地震動で決定され、H=25mおよびIII種地盤はタイプI地震動で決定される傾向にある。また、等価水平震度は地盤が柔らかいほうが高くなり、構造物の剛性も高くなる傾向にある。これらから各断面諸元の設定は、柱高さおよび地盤条件がよく反映されているといえる。

表-2.1 各橋脚の固有周期 (鋼桁系)

地盤種別	柱高さ m	支保力 tf/m	柱の 降伏剛性 tf/m	水平方向 地盤剛性 tf/m	合成剛性 tf/m	固有周期 秒
I 種地盤	10m	1700	12660	507480	12352	1.068
	15m	1700	4413	507480	4375	1.128
	25m	1700	1721	507480	1715	1.424
II 種地盤	10m	1700	11600	331550	11208	1.114
	15m	1700	6933	331550	6791	1.208
	25m	1700	3520	589420	3499	1.308
III 種地盤	10m	1700	11600	198380	10959	1.123
	15m	1700	6844	264510	6671	1.188
	25m	1700	3520	352670	3485	1.316

表-2.2 各橋脚の固有周期 (PC 桁系)

地盤種別	柱高さ m	支保力 tf/m	柱の 降伏剛性 tf/m	水平方向 地盤剛性 tf/m	合成剛性 tf/m	固有周期 秒
I 種地盤	10m	4078	17558	507480	16971	1.225
	15m	4078	6639	507480	6554	1.438
	25m	4078	3556	743370	3539	1.685
II 種地盤	10m	4078	20210	475460	19386	1.187
	15m	4078	11790	845270	11628	1.255
	25m	4078	5555	1056600	5525	1.464
III 種地盤	10m	4078	19618	533310	18922	1.180
	15m	4078	10662	533310	10453	1.274
	25m	4078	7847	833290	7774	1.355

表-3.1 保耐法結果 (鋼桁系)

地盤種別	橋脚 柱高さ	断面高さ D(m)	主鉄筋	等価水 平震度	耐力比 or 残留変位比	杭本数 (本)
I 種地盤	10m	2.5	D25 × 1	0.40	90% (II Pa)	-
	15m	2.5	D32 × 1	0.40	93% (II Pa)	-
	25m	2.5	D41 × 2	0.46	83% (I Pa)	-
II 種地盤	10m	2.5	D25 × 1	0.40	99% (II δ)	9
	15m	2.5	D51 × 1	0.72	89% (II Pa)	9
	25m	3.0	D51 × 2	0.65	82% (II Pa)	16
III 種地盤	10m	2.5	D25 × 1	0.40	82% (II Pa)	9
	15m	2.5	D51 × 1	0.66	84% (I Pa)	12
	25m	3.0	D51 × 2	0.71	88% (I Pa)	16

※表中、「耐力比or残留変位比」() 記号は以下を表し、決定ケースを指している。
I・II…地震動タイプ Pa…保有耐力(Khe・W/Pa) δ…残留変位(δR/δa)

表-3.2 保耐法結果 (PC 桁系)

地盤 種別	橋脚 柱高さ	断面高さ D(m)	主鉄筋	等価水 平震度	耐力比 or 残留変位比	杭本数 (本)
I 種地盤	10m	2.5	D32 × 1.5	0.40	90% (II Pa)	-
	15m	2.5	D35 × 2	0.41	95% (I Pa)	-
	25m	3.0	D51 × 2	0.41	84% (I Pa)	-
II 種地盤	10m	2.5	D32 × 2	0.45	94% (II δ)	9
	15m	3.0	D38 × 2	0.49	93% (II δ)	16
	25m	3.5	D51 × 2	0.60	90% (I Pa)	20
III 種地盤	10m	2.5	D32 × 2	0.43	82% (I Pa)	16
	15m	3.0	D35 × 2	0.42	99% (II δ)	16
	25m	4.0	D51 × 2	0.68	88% (I Pa)	25

※表中、「耐力比or残留変位比」() 記号は以下を表し、決定ケースを指している。
I・II…地震動タイプ Pa…保有耐力($Khe \cdot W/Pa$) δ…残留変位(δ_R/δ_a)

(2) 減衰定数の設定

各部材における等価減衰定数は、柱及び基礎構造は、道示耐震設計編をもとに、2%及び 20%に設定したが、支承については、建設省土木研究所資料より、近年のゴム支承におけるせん断試験結果から平均的に 4%程度まで考慮できることが実験的に確認されており、2%とした解析結果よりも厳密解が得られるとされている。

図-3 は、ゴム支承のせん断試験における等価減衰定数の測定結果の一例を示しており、各支承において減衰定数の試験結果バラツキがあることがわかる。

ただし、近年の実験結果が平均的に 4%であることを考慮すれば、設計段階で、等価減衰定数が 4%程度のゴム支承に限定して支承構造を採用することも可能であると考えられる。

以上をふまえ、本稿においては支承の減衰定数は 4%として設定を行った。

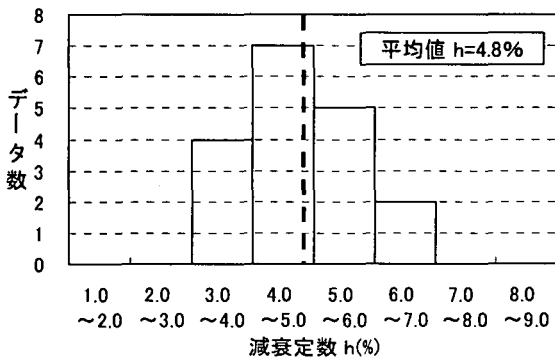


図-3 ゴム支承のせん断試験結果

(3) 等価線形化法の結果

等価線形化法で照査を行った結果を鋼桁系と PC 桁系に分け、支承の許容変位に対する応答変位 (δ_B/δ_{Ba}) と、柱の許容塑性率に対する応答塑性率 (μ_R/μ_a) を図-4.1・図-4.4 にそれぞれ示す。

結果より、柱の塑性率については鋼桁系、H=10m の II 種地盤・III 種地盤および PC 桁系の H=10m と H=15m で許容値を満足せず、柱高さの低いほう、また地盤の柔らかいほうが応答塑性率は高くなっている。これより、支承ばねに対して柱の剛性が高いと、II 種地盤・III 種地盤では等価線形化法では許容値を満足しない傾向にあることがわかる。

また支承については、全ての支承が許容値を満足せず、特に H=15m・H=25m の II 種地盤・III 種地盤での変位比が大きい。これは柱の塑性化が少ない分、地震力のエネルギーが支承に流れるためである。

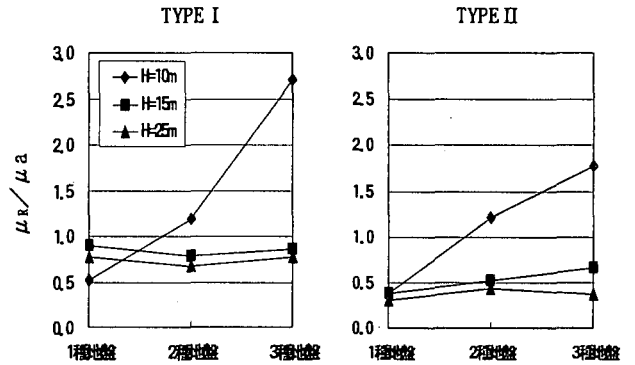


図-4.1 塑性率比 (鋼桁系)

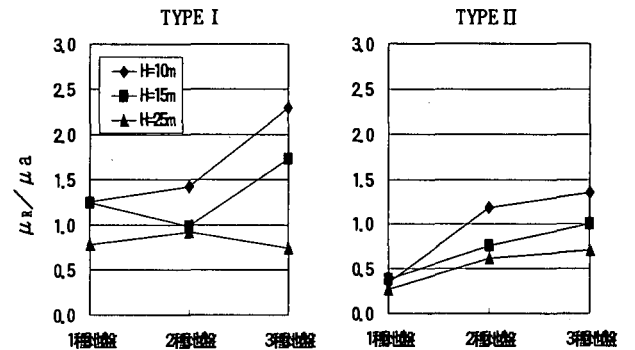


図-4.2 塑性率比 (PC 桁系)

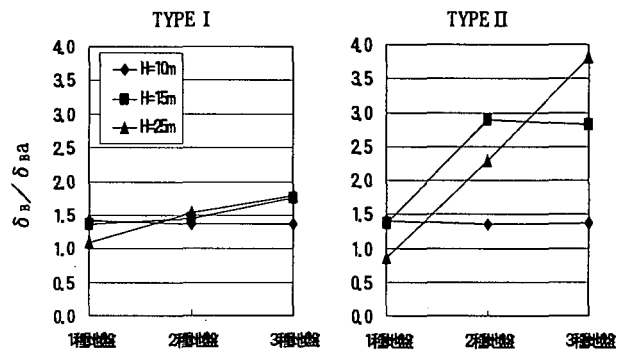


図-4.3 支承変位比 (鋼桁系)

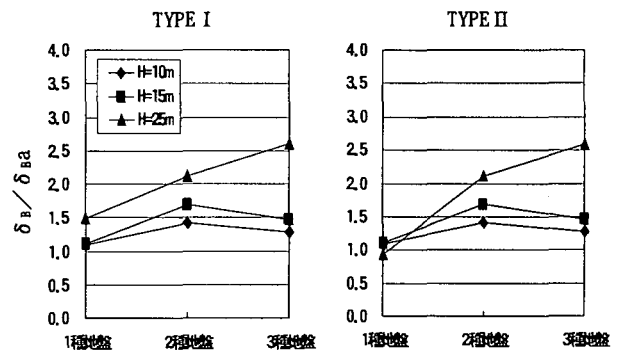


図-4.4 支承変位比 (PC 桁系)

4. 等価線形化法と動的非線形解析との比較

等価線形化法の適用性を検証するために非線形時刻歴応答解析を行い、それぞれの結果を比較した。

(1) 解析モデル

解析モデルは、図-5に示すように橋脚の質量を離散させたモデルとし、部材分割長は断面有効幅程度とした。但し柱基部は塑性ヒンジ長程度とした。柱部材は塑性化が発生することを考慮して非線形部材とし、履歴モデルは剛性劣化型トリリニアモデル（武田モデル）を用いた。なお、部材の減衰定数は等価線形化法で用いたものと同値とした。

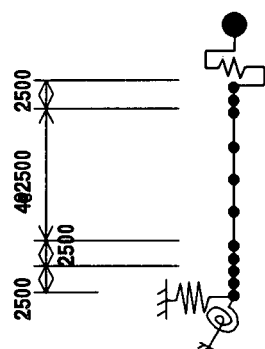


図-5 解析モデル (H=15m)

(2) 基礎ばねの設定

基礎は集中ばねとして設定したが、この集中ばねは地震時の地盤のひずみを考慮した地盤のせん断弾性波速度 (V_s) を道示耐震設計編に準拠し 0.8 倍に低減して求めた変形係数より算出した。(以下、このばねを便宜上「弾性ばね」と称す)

また、Ⅱ種地盤・Ⅲ種地盤での大地震時の地盤のひずみはさらに高い値となる可能性があることが予想される。厳密には、構造物と地盤をモデル化した連成解析を行う必要があるが、本稿では基礎を Pushover 解析した結果より底板下面での水平抵抗 ($P-\delta$ 関係) と回転抵抗 ($M-\theta$ 関係) を算出し、基礎降伏時の割線剛性から基礎の等価剛性を求めた。(以下、このばねを便宜上「等価ばね」と称す) $P-\delta$ 関係の一例を図-6に示す。

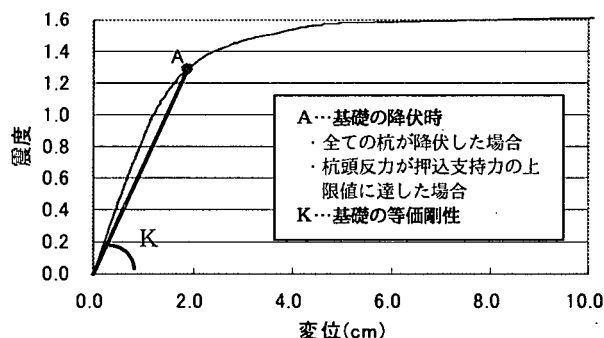


図-6 底板下面での $P-\delta$ 関係
(PC 桁系 H=15m Ⅱ種地盤)

弾性ばねと等価剛性のばねの値を表-6に示すが、ばね値は 1/10 程度まで低下していることが分かる。

表-6 地盤ばねの比較 (PC 桁系)

柱高	地盤種別	等価ばね		弾性ばね		比率	
		Axx	Arr	Axx'	Arr'	Axx'/Axx	Arr'/Arr
10m	Ⅱ種	4.16E+04	2.51E+06	4.75E+05	2.71E+07	11.4	10.8
10m	Ⅲ種	6.59E+04	8.60E+06	5.33E+05	9.02E+07	8.1	10.5
15m	Ⅱ種	1.01E+05	8.56E+06	8.45E+05	8.47E+07	8.4	9.9
15m	Ⅲ種	5.84E+04	8.82E+06	5.33E+05	9.02E+07	9.1	10.2
25m	Ⅱ種	1.17E+05	1.11E+07	1.06E+06	1.06E+08	9.1	9.6
25m	Ⅲ種	9.18E+04	2.25E+07	8.33E+05	2.20E+08	9.1	9.8

地盤ばねの変更に伴うモード変形の違いを図-7.1・図-7.2に示すが、等価ばねを設定したほうが地盤の変形が大きく、それにより柱の変形は小さくなっていることが分かる。

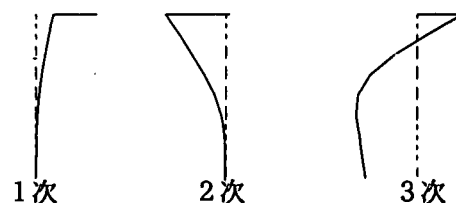


図-7.1 主要モードの変形 (弾性ばね)

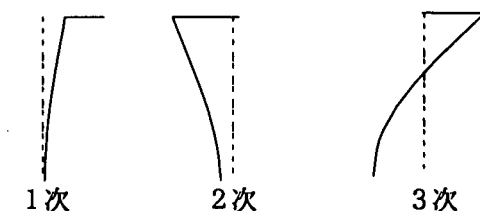


図-7.2 主要モードの変形 (等価ばね)

(3) 入力地震波形

入力地震波形は道示の標準波形を用い、地盤種別および地震動タイプごとに表-5に示すように設定した。

表-5 入力地震波形

地盤種別	地震動タイプ	地震名	記録場所	成分
Ⅰ種地盤	TYPE I	1978年宮城県沖地震	開成橋周辺地盤上	LG
	TYPE II	1995年兵庫県南部地震	気象庁神戸海洋気象台地盤上	NS
Ⅱ種地盤	TYPE I	1968年日向灘沖地震	板橋周辺地盤上	LG
	TYPE II	1995年兵庫県南部地震	JR福知山駅構内地盤上	NS
Ⅲ種地盤	TYPE I	1983年日本海中部地震	津軽大橋周辺地盤上	TR
	TYPE II	1995年兵庫県南部地震	阪高 東神戸大橋周辺地盤上	N12W

(4) 解析結果

等価線形化法と非線形時刻歴応答解析 (弾性ばね・等価ばね) の結果については、鋼桁系と PC 桁系に分け、それぞれ柱高・地盤種別および地震動タイプごとに柱の許容塑性率に対する応答塑性率 (μ_R/μ_a) と、支承の許容変位に対する応答変位 (δ_B/δ_{Ba}) で表した。

(以下便宜上、等価線形化法を「等価線形」、弾性ばねでの非線形時刻歴応答解析を「動解」、等価ばねでの非線形時刻歴応答解析を「地盤動解」と称す。)

a) 鋼桁系

鋼桁系の解析結果について、柱の塑性率比を図-8.1に、支承の変位比を図-8.2に示す。

結果から、柱高 $H=10\text{m} \cdot 15\text{m}$ については、I種地盤で柱の塑性率比・支承変位比ともに、若干等価線形による応答値が高くなるものの、動解による結果とほぼ一致している。しかし、II種・III種地盤においては、塑性率比・支承変位比ともに等価線形及び、動解における応答値が、地盤動解による応答値と比べて過小となる場合があり、注意が必要と考えられる。

また、柱高 $H=25\text{m}$ については、I種地盤の等価線形における支承変位比が動解に比べて過小な応答値となり、II種・III種地盤では逆に過大となる場合があるが、動解と地盤動解の結果はおおむねよく一致している。これは、等価線形による応答値が1次モードの影響のみに着目しているのに対し、動解では高次モードの影響のため解析結果が異なったものと考えられ、このような場合では、等価線形の適用は難しいと考えられる。

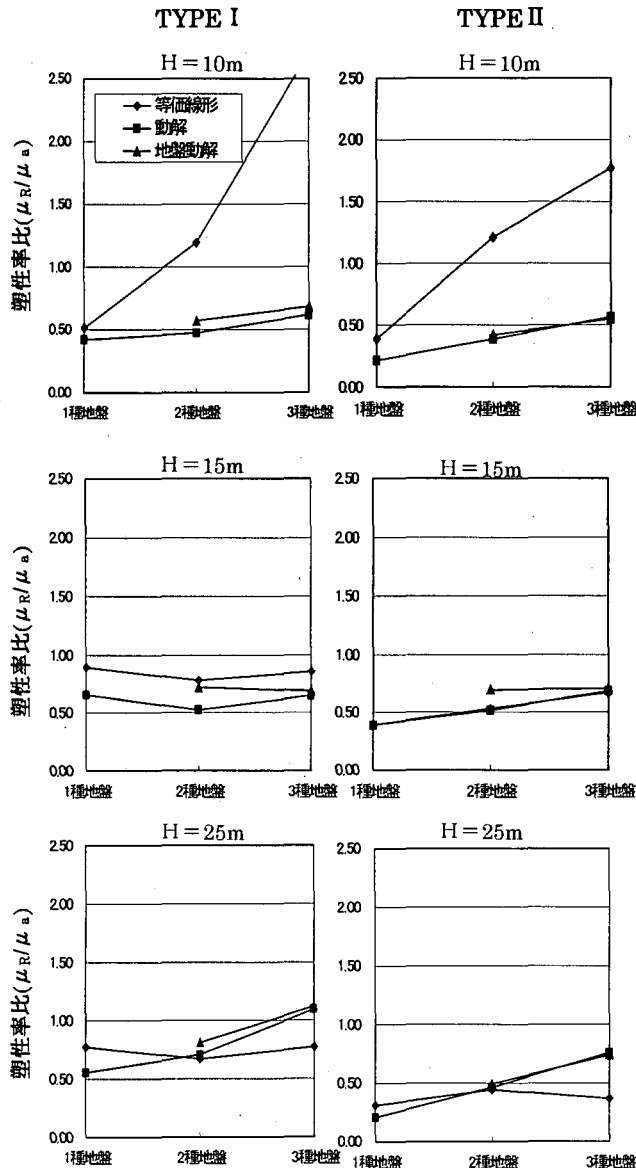


図-8.1 塑性率比 (鋼桁系)

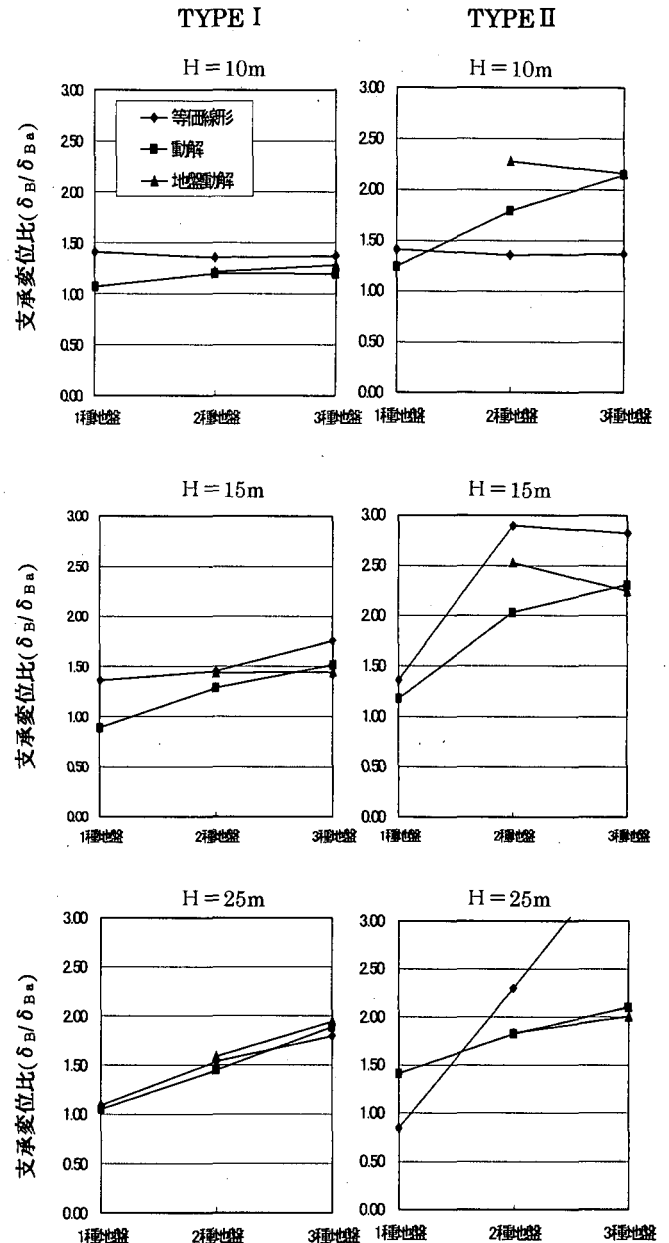


図-8.2 支承変位比 (鋼桁系)

b) PC桁系

PC桁系の結果について、柱の塑性率比を図-9.1に、支承の変位比を図-9.2に示す。

PC桁系についても鋼桁系とおおむね同様の傾向が得られていたが、動解と地盤動解の結果は比較的よく近似しており、地盤動解の必要性は少ないと考えられる。

これら等価線形化法による結果は、1次モードのみを考慮した計算方法であり、高次モードに発生する地盤の変形が卓越するモードや、橋脚高さの高い場合に発生する高次モードの影響は考慮することができない。これより、軟弱地盤や橋脚高さの高い場合には等価線形化法の適用性が限定されるといえる。

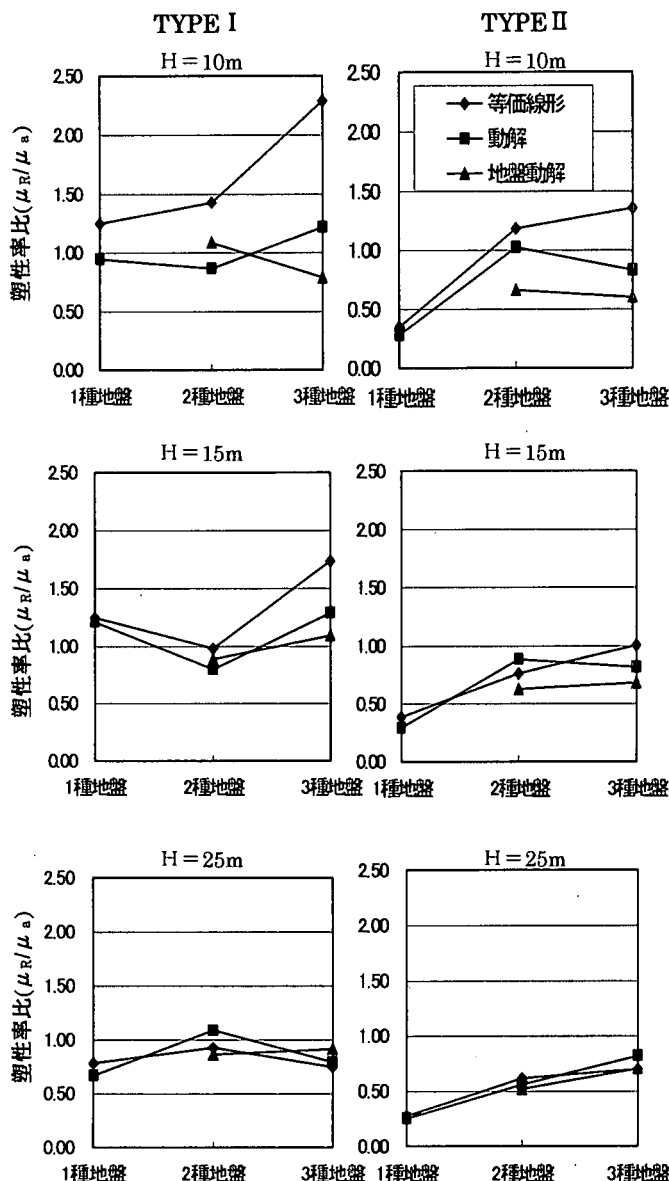


図-9.1 塑性率比 (PC 桁系)

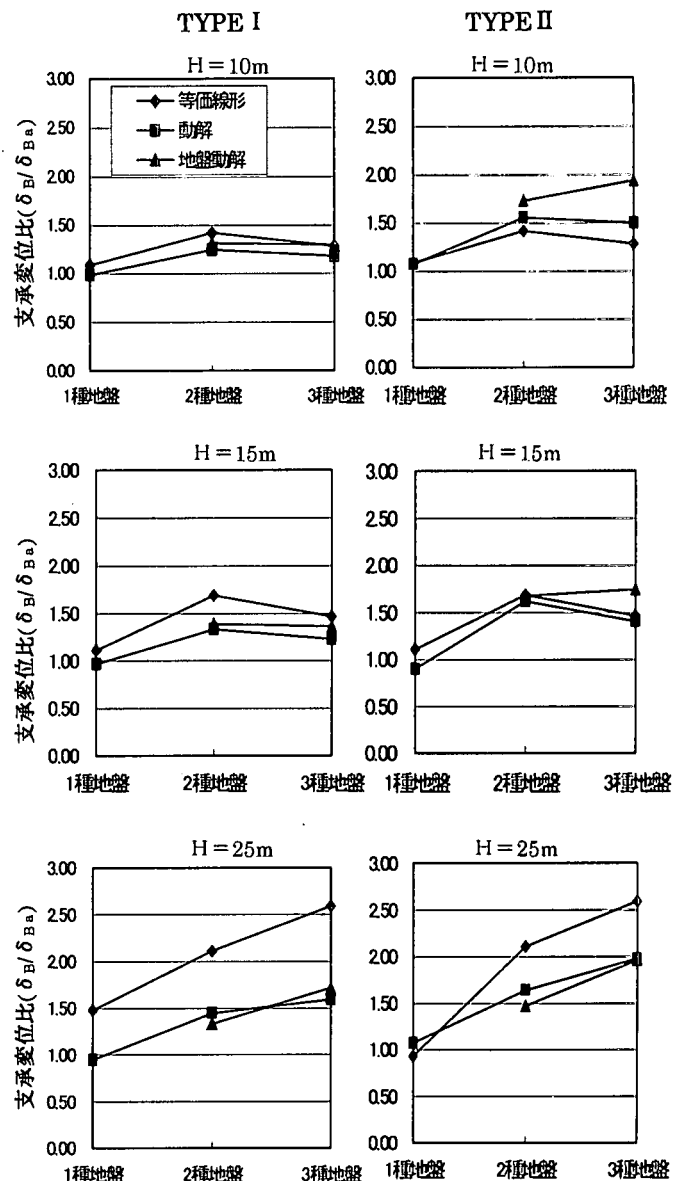


図-9.2 支承変位比 (PC 桁系)

6. まとめ

Bタイプ地震時水平力分散型ゴム支承を有する橋梁に対して、等価線形化法の適用性について検討を行うために、非線形時刻歴応答解析と比較した結果、表-6.1・表-6.2の結果を得た。

- 1) I種地盤では等価線形化法と動解の応答値はよく一致するが、II種・III種地盤および橋脚高さ25m程度では、高次モードの影響より等価線形化法の適用は難しい。
- 2) 動解と地盤の非線形性を考慮した動解はおおむね応答値は一致するが、H=10m程度では結果に差異が生じやすい。

本検討より等価線形化法においては1次モードのみでなく、2次・3次まで含めたモードの影響を考慮すれば、より推定精度が向上することが予想され、現在検討中である。

表-6.1 設定条件ごとの解析方法の適用性 (鋼桁系)

	I種地盤	II種地盤	III種地盤
10m	等価線形化法	動解(地盤非線形)	動解
15m	等価線形化法	動解	動解
25m	動解	動解	動解

※表中の「動解」は、非線形時刻歴応答解析を示し、基礎ばねは集中ばねである。

表-6.2 設定条件ごとの解析方法の適用性 (PC 桁系)

	I種地盤	II種地盤	III種地盤
10m	等価線形化法	動解	動解
15m	等価線形化法	等価線形化法	動解
25m	動解	動解	動解

※表中の「動解」は、非線形時刻歴応答解析を示し、基礎ばねは集中ばねである。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：ゴム支承を用いた地震時水平力分散構造を有する道路橋の非線形地震応答の簡易推定法、平成11年3月
- 2) (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