

橋梁の動的解析に用いる基礎の減衰定数 に関する解析的研究

岡田 太賀雄¹・運上 茂樹²

¹独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ(耐震) 研究員 (〒305-8516茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:okada@pwri.go.jp

²独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ(耐震) 上席研究員 (〒305-8516茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:unjoh@pwri.go.jp

橋梁の動的解析においては、基礎に地盤バネと減衰定数を与えることで、地盤の非線形性や逸散減衰の効果等の地盤と基礎の動的相互作用を考慮した解析モデルが用いられることが多い。しかし、基礎の減衰定数については十分に解明されていないことから、ひずみレベルによらず一律の地盤バネ剛性を与えていたり、基礎形式や地盤条件によって異なると考えられる減衰定数についても一律に与えられる場合が多く、より合理的な設定法が必要とされている。本研究では、直接基礎・ケーソン基礎・杭基礎について、薄層要素法を用いた3次元FEMモデルと基礎-地盤を集約バネに置換したSRモデルを用いて比較解析を行い、各基礎形式におけるSRモデルに用いる減衰定数について考察を行った結果について報告する。

Key Words : Soil-structure interaction, SR model, FEM model, Damping factor, Thin layered element

1. はじめに

橋梁の耐震設計に用いられる動的解析には、一般に基礎と地盤の影響を一体化したバネで表す簡便な方法が用いられており、この簡便なモデルにおいても地盤と基礎に生じる動的相互作用を適切に考慮すれば、実現象を精度良く評価できると考えられる。

基礎-地盤バネに考慮すべき影響としては、地盤のひずみ依存性による大規模地震での地盤剛性の低下や減衰増加の影響が知られている。また、基礎構造物が地中に埋設されているため、幾何学的な形状・剛性による周辺地盤への拘束効果により、自由地盤と比較して入射される地震動が低減されるという入力損失効果等が一般に知られている。

しかしながら、これらの動的相互作用を考慮した動的解析は煩雑であり、汎用的に用いられている方法はなく、設計実務においては基礎の減衰定数は基礎形式・地盤条件によらず一律に与えられる場合が多い¹⁾。適切な地盤剛性・減衰定数を設定し、動的相互作用の影響について簡便な形で取り込む事ができれば、より合理的な設計ができると考えられる。

本研究では、直接基礎・ケーソン基礎・杭基礎を対象に、地盤を薄層要素、基礎部をFEMを用いて動的サブス

トラクチャー法により結合した詳細法(以下、FEMモデル)と地盤と基礎を集約バネにモデル化したスウェイロッキングモデル(以下、SRモデル)を用いた比較解析を行った。インピーダンスの算出においては薄層要素を用いた線形解析とし、地盤には地震時の剛性低下・履歴減衰増加の影響を等価剛性・等価減衰定数として、特定の地盤を対象とせず任意に設定し与えることとした。このように設定した地盤においてインピーダンスを算出し、各基礎形式におけるSRモデルに用いる減衰定数について考察を行った。

なお、大規模地震時には基礎と地盤の境界部での軟化、すべり、あるいは剥離等の非線形性が生じ²⁾、動的相互作用に影響を与える事が知られている^{例えは3)}が、本研究においては線形解析の範囲として考慮していない。

2. 薄層要素法を用いたインピーダンス及び減衰定数の算出

(1) 解析モデル

図-1に解析対象モデル、表-1~表-3に各ケースの構造諸元を示す。直接基礎・杭基礎については正方形断面、ケーソン基礎については円形断面とし、基礎の平面形状

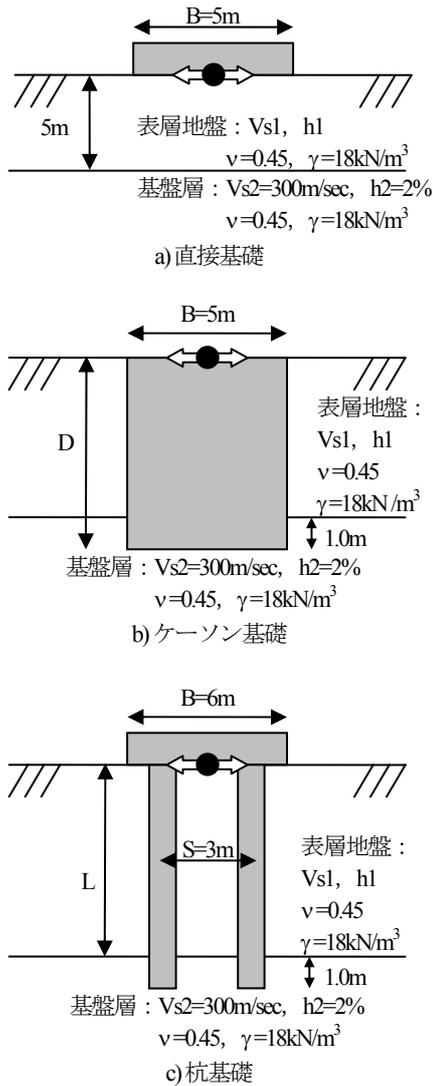


図-1 解析モデル概要図

は一定とした。基盤層については等価地盤剛性 $Vs=300\text{m/sec}$ 、等価減衰定数2%と設定した。表層地盤については特定の地盤を想定せず、強震時の地盤剛性の低下、減衰定数の増加の影響を見るために、等価地盤剛性として $Vs=50,100\text{m/sec}$ 、等価減衰定数20%,10%をパラメータとして与え、ケーソン基礎、杭基礎については基礎深さについてもパラメータとした。また、直接基礎・杭基礎のフーチング側面の地盤や埋め戻し地盤の影響があるが、ここでは簡単のため、これらが無いものと仮定した。なお、杭基礎については、簡単のため地盤と接触させていないモデルとし、フーチング底面からの波動逸散は含まれないモデルとした。3次元FEMモデルにおいては参考文献4)のプログラムを使用し、地盤を薄層要素・基礎部をFEM・橋脚部を質点と梁でモデル化した。各基礎形式における無質量基礎でのインピーダンスの算出位置は図-1に示す通りである。なお、ケーソン基礎については

表-1 解析ケース一覧 (直接基礎)

| 解析ケース | $Vs1(\text{m/sec})$ | $h1(\%)$ |
|-------|---------------------|----------|
| 1-1 | 50 | 2 |
| 1-2 | 100 | 2 |
| 1-3 | 50 | 20 |
| 1-4 | 100 | 10 |
| 1-5 | 300 | 2 |

表-2 解析ケース一覧 (ケーソン基礎)

| 解析ケース | $D(\text{m})$ | $Vs1(\text{m/sec})$ | $h1(\%)$ |
|-------|---------------|---------------------|----------|
| 2-1 | 10 | 50 | 2 |
| 2-2 | 10 | 100 | 2 |
| 2-3 | 10 | 300 | 2 |
| 2-4 | 10 | 50 | 20 |
| 2-5 | 10 | 100 | 10 |
| 2-6 | 10 | 300 | 5 |
| 2-7 | 20 | 50 | 2 |
| 2-8 | 20 | 100 | 2 |
| 2-9 | 20 | 300 | 2 |
| 2-10 | 20 | 50 | 20 |
| 2-11 | 20 | 100 | 10 |
| 2-12 | 20 | 300 | 5 |

表-3 解析ケース一覧 (杭基礎)

| 解析ケース | $L(\text{m})$ | 杭本数(本) | $Vs1(\text{m/sec})$ | $h1(\%)$ |
|-------|---------------|--------|---------------------|----------|
| 3-1 | 25 | 2×2 | 50 | 2 |
| 3-2 | 25 | 2×2 | 100 | 2 |
| 3-3 | 25 | 2×2 | 300 | 2 |
| 3-4 | 40 | 2×2 | 50 | 2 |
| 3-5 | 40 | 2×2 | 100 | 2 |
| 3-6 | 40 | 2×2 | 300 | 2 |
| 3-7 | 25 | 2×2 | 50 | 20 |
| 3-8 | 25 | 2×2 | 100 | 10 |
| 3-9 | 25 | 2×2 | 300 | 5 |

剛体とし、杭基礎についてはコンクリート杭とし杭径1.2m、杭中心距離3m、弾性係数 21kN/mm^2 、単位体積重量 25kN/m^3 として算出した。地盤のポアソン比 ν を0.45、単位体積重量 γ を 18kN/m^3 としてモデル化し、地盤の半無限性を考慮するために最下層には半無限要素を用いた。

インピーダンスの算出は0.05Hzから0.2Hz毎に20.05Hzまで行い、各振動数でのインピーダンス算出位置での減衰定数を算出した。減衰定数の算出は以下のように考えた。式(1)に示す運動方程式に関する固有値 λ は式(2)となる。ここで、固有値 λ の実部 $\text{Re}(\lambda)$ と虚部 $\text{Im}(\lambda)$ から減衰定数 h を算出すると式(3)のようになる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (1)$$

$$\lambda = -h\omega_0 + i\omega_0\sqrt{1-h^2} \quad (2)$$

$$h = \frac{-\text{Re}(\lambda)}{\sqrt{(\text{Re}(\lambda))^2 + (\text{Im}(\lambda))^2}} \quad (3)$$

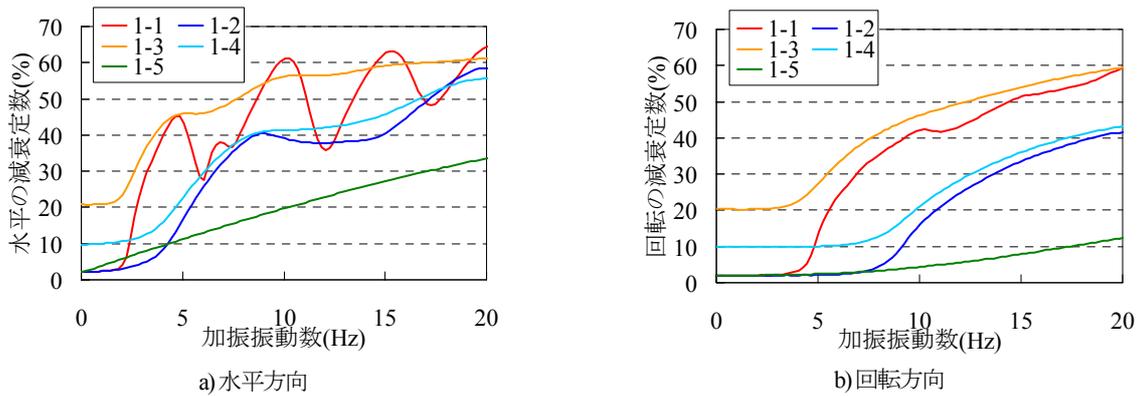


図-2 直接基礎の減衰定数

同様に複素剛性($K + iK'$)を持つ式(4)の運動方程式から固有値 λ について算出すると式(5)となる。

$$m\ddot{x} + (K + iK')x = 0 \quad (4)$$

$$\lambda = i\omega_0^* \exp(i\phi) = \omega_0^* (-\sin\phi + i\cos\phi) \quad (5)$$

ここで、

$$\omega_0^* = \sqrt{K^*/m} \quad (6)$$

$$K^* = \sqrt{K^2 + K'^2} \quad (7)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{K'}{K} \quad (8)$$

同様に式(3)から h を算出すると式(9)のように減衰定数が算出される。

$$h = \sin\phi = \sin\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{K'}{K}\right) \quad (9)$$

なお、剛性 K (実部)については静的な値を用いる事とした。ただし、プログラムの都合上0Hzの結果は算出できなかったため0Hzに近い0.05Hzの結果を代用した。

(2) 各基礎形式での減衰定数の振動数依存性

図-2 に直接基礎での水平方向及び回転方向の各振動数での減衰定数を示す。いずれのケースも加振振動数の増加に伴い減衰定数が増加するが、2層の地盤の剛性差が大きいケースについては水平方向において振動数の変化により激しく増減する結果となる。ただし、地盤の等価減衰定数を大きくしたケースではその程度が弱まる。地盤に与える等価減衰定数を大きくしたケースの方が同じ加振振動数における減衰定数が大きくなる。なお、表層地盤の1次の固有振動数は $V_s=50\text{m/sec}$, 100m/sec で2.5Hz, 5.0Hzとなるが、これよりも小さな加振振動数においては地盤に与えた等価減衰定数とほぼ同様である事がわかる。解析対象としたような埋込のない直接基礎の場合、逸散減衰の効果はこれよりも高振動数において顕

著になっている。

図-3 にケーソン基礎での水平方向、回転方向及び水平回転の連成方向の各振動数での減衰定数を示す。ケーソン基礎については剛体としているため、水平-回転の連成バネの影響が橋脚の応答値に大きく影響を与えるため水平-回転の連成バネについても算出している。いずれも加振振動数の増加に伴い、減衰定数が増加しており、同加振振動数においては根入れ深さが深い方が減衰定数が大きくなる。また、表層地盤の剛性が大きい方が減衰定数は大きく、表層地盤の等価減衰定数の違いによる影響はほとんどみられない。これはケーソン基礎底部が基盤層に埋め込まれているためであると考えられる。地盤の剛性の変化に応じて同じ加振振動数において減衰定数が増加していることから、幾何学的な形状、剛性による周辺地盤への拘束効果の及ぼす影響が大きいことがわかる。

図-4 に杭基礎での水平方向、回転方向の各振動数での減衰定数を示す。地盤剛性の小さい方が同振動数においては減衰定数が大きくなり、振動数の増加に伴い減衰定数が大きくなる。また、杭の深さによる影響は低振動数領域において差異があるものの、振動数の増加に伴い差異は生じなくなる。 $V_s=50\text{m/sec}$ であるケース 3-1, 3-4の結果に関しては直接基礎のように振動数により増減する結果となり、表層地盤の等価減衰定数を大きくしたケース 3-7についてはその程度が緩和されている。表層地盤の等価減衰定数の増加したケースの方が、同じ加振振動数において減衰定数が大きくなる。ケーソン基礎のように杭は基盤層に埋め込まれているものの、ケーソン基礎を剛とモデル化したのに対して、杭基礎についてはコンクリート製としており、ケーソン基礎と比べると基盤層の影響よりも表層地盤の影響を受けているものと考えられる。

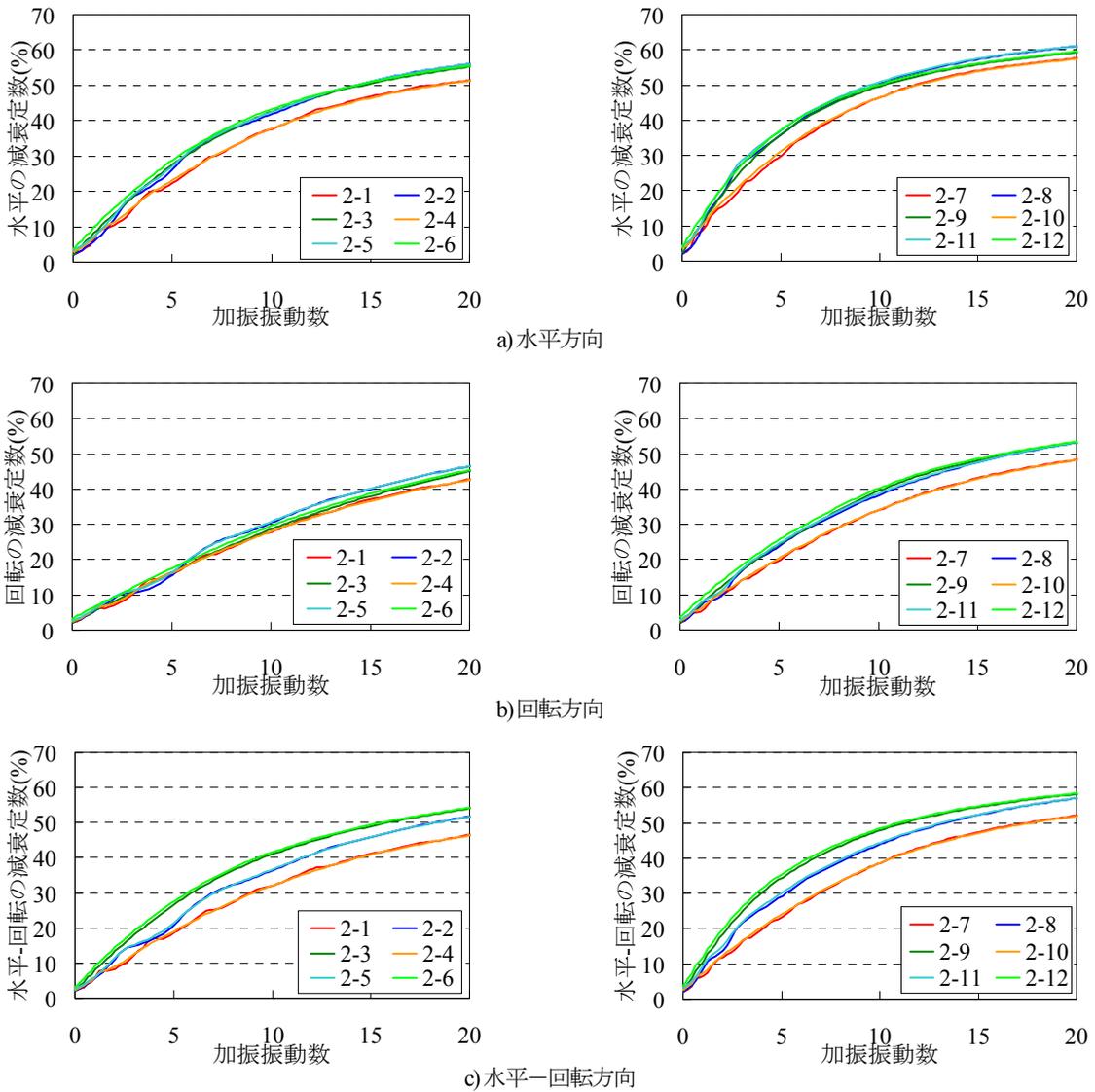


図-3 ケーソン基礎の減衰定数

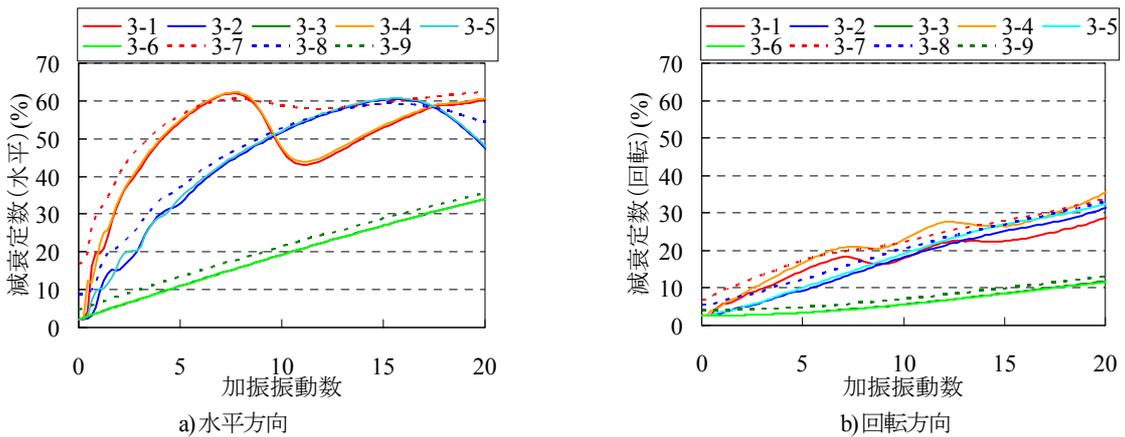


図-4 杭基礎の減衰定数

3. SRモデルに用いる基礎地盤バネの減衰定数に関する検討

前章の結果を用いて、橋梁の動的解析に用いる SR モ

デルでの基礎地盤バネの減衰定数について検討する。SR モデルにおいては、図-5 に示すように線形梁・質点で高さ 10m の橋脚をモデル化し、前章で得られた減衰定数曲線から全体系での 1 次モードの減衰定数を基礎地盤バネの減衰定数として用いることとした。なお、FEM

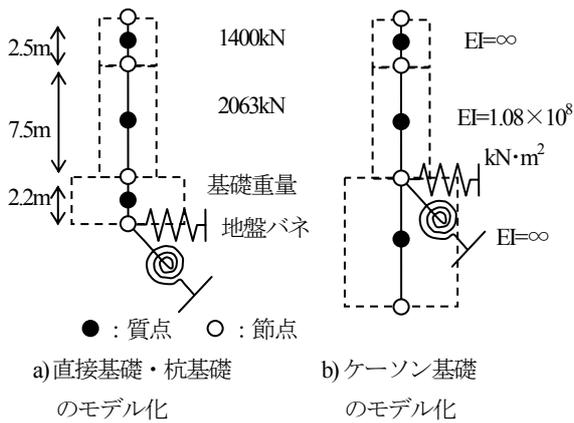


図-5 SRモデル概要

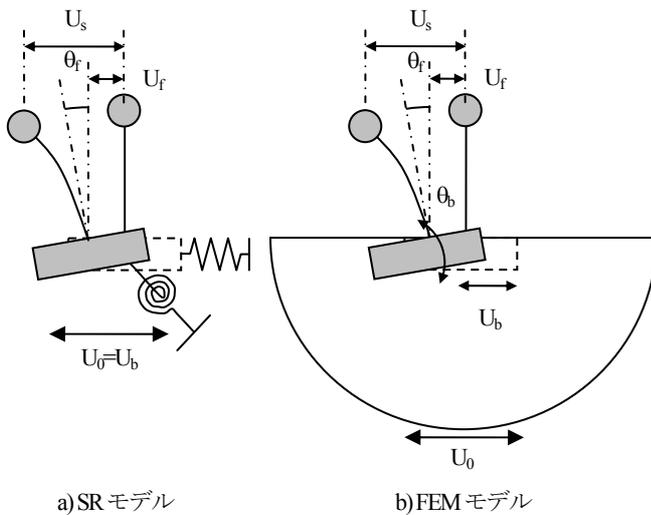


図-6 SRモデルとFEMモデルの入力の相違

モデルにおいても SR モデルと同様に線形梁と質点でモデル化した。また、構造物要素に与えた減衰定数は 2% である。なお、SR モデルにおいても参考文献 4) のプログラムを使用し、地盤バネ剛性・減衰定数については複素剛性で与えた。ただし、SR モデルの地盤バネ剛性については、前章に示す減衰定数の算出時に用いた静的な値を用いることとした。橋脚についてはいずれの基礎形式においても同一のものとし、フーチング部の重量については基礎形状に応じて変化させた。なお、1 次モードの振動数の算定は FEM モデルにおいて加振振動数 0.05Hz から 0.2Hz 毎に加振し最初に橋脚天端の振幅のピークが得られた振動数とした。

上記のように設定した SR モデルと FEM モデルについて各振動数でのフーチング部の入力変位に対する橋脚天端の水平方向変位の応答倍率について比較を行う。図-6 に示すように、SR モデルと FEM モデルでは入力に相違が生じる。SR モデルと同条件の比較とするため、FEM モデルにおいては、別途、無質量剛基礎での基礎の水平方向変位 U_b を算出し、これに対する構造物も含めた一体モデルでの橋脚天端の水平方向変位 U_s との応

表-4 1次の振動数及び減衰定数（直接基礎）

| 解析ケース | 振動数 (Hz) | 水平の減衰定数 (%) | 回転の減衰定数 (%) |
|-------|----------|-------------|-------------|
| 1-1 | 0.85 | 2.27 | 2.09 |
| 1-2 | 1.65 | 2.76 | 1.98 |
| 1-3 | 0.85 | 20.82 | 20.29 |
| 1-4 | 1.65 | 10.3 | 9.9 |
| 1-5 | 4.05 | 9.45 | 2.22 |

表-5 1次の振動数及び減衰定数（ケーソン基礎）

| 解析ケース | 振動数 (Hz) | 水平の減衰定数 (%) | 回転の減衰定数 (%) | 水平回転の減衰定数 (%) |
|-------|----------|-------------|-------------|---------------|
| 2-1 | 3.45 | 17.71 | 12.37 | 14.50 |
| 2-2 | 4.05 | 21.88 | 12.12 | 17.02 |
| 2-3 | 6.85 | 34.14 | 21.22 | 33.05 |
| 2-4 | 3.25 | 16.58 | 11.28 | 13.41 |
| 2-5 | 3.85 | 22.18 | 12.60 | 17.23 |
| 2-6 | 6.65 | 34.58 | 21.75 | 33.17 |
| 2-7 | 2.25 | 16.39 | 10.59 | 12.56 |
| 2-8 | 4.25 | 32.75 | 21.20 | 26.29 |
| 2-9 | 7.25 | 43.62 | 31.74 | 41.64 |
| 2-10 | 1.85 | 15.68 | 9.63 | 11.60 |
| 2-11 | 4.25 | 34.09 | 21.89 | 27.18 |
| 2-12 | 7.25 | 44.46 | 32.86 | 42.45 |

表-6 1次の振動数及び減衰定数（杭基礎）

| 解析ケース | 振動数 (Hz) | 水平の減衰定数 (%) | 回転の減衰定数 (%) |
|-------|----------|-------------|-------------|
| 3-1 | 2.05 | 33.89 | 7.79 |
| 3-2 | 3.05 | 22.23 | 6.28 |
| 3-3 | 4.85 | 10.71 | 3.39 |
| 3-4 | 2.05 | 34.34 | 8.52 |
| 3-5 | 3.05 | 21.44 | 6.34 |
| 3-6 | 4.85 | 10.71 | 3.39 |
| 3-7 | 2.05 | 40.86 | 11.44 |
| 3-8 | 3.05 | 27.44 | 9.17 |
| 3-9 | 4.85 | 13.11 | 4.84 |

答倍率 U_s/U_b とした。また、FEM モデルについては橋脚天端の水平方向変位 U_s として 2 種類の応答値を算出した。図-6 a) に示すような一般に用いられる SR モデルについては、水平方向のみを入力する場合が多いが、FEM モデルでは図-6 b) に示すように無質量剛基礎においては水平方向変位 U_b だけでなく回転方向変位 θ_b も生じることとなり、FEM モデルと SR モデルの比較においては地盤バネの影響だけでなく入力の違いも生じる。そのため、別途、FEM モデルにおいて回転入力を除去し、SR モデルと同じように水平方向変位 U_b のみ入力した結果も算出した。なお、FEM モデルと SR モデルの比較において地盤バネの影響のみを評価するためには、SR モデルにおいても水平方向入力と回転方向入力を行う必要があるが、ここでは、水平方向入力のみでの結果について比較した。

直接基礎について、表-4 に各ケースの 1 次の振動数及び減衰定数を、図-7 に応答比較図を示す。減衰定数については、1 層のケース（ケース 1-5）については水平が 10% 程度、回転が 2% 程度となり、2 層のケースについては地盤の剛性低下に伴い 1 次の振動数が低下するものの、

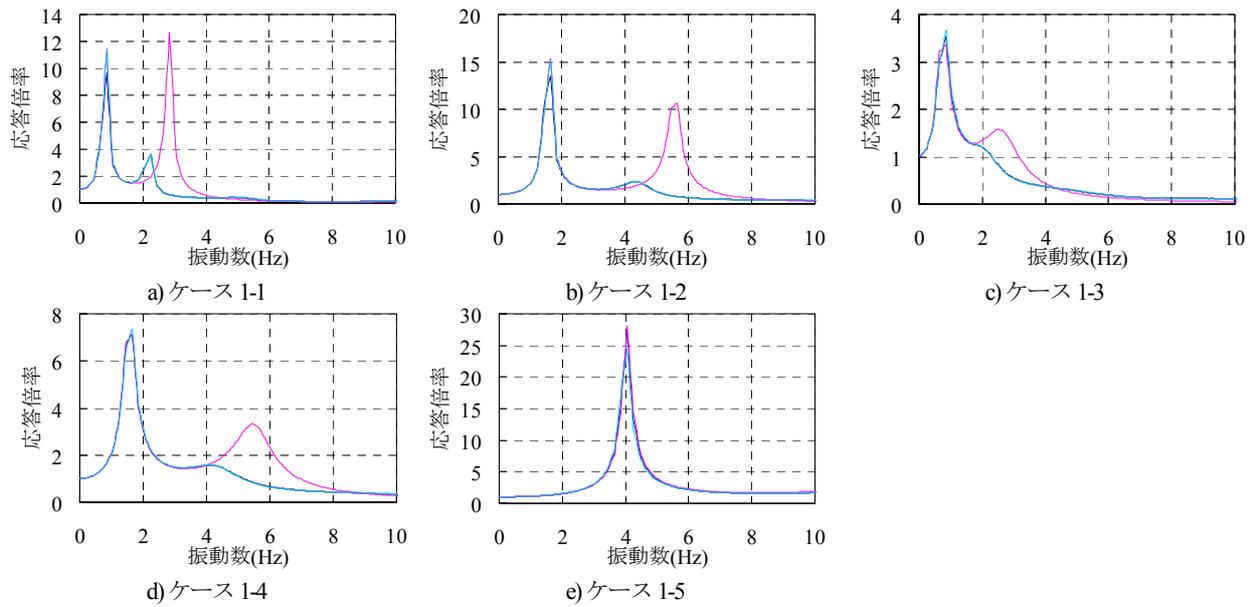


図-7 直接基礎のFEMモデルとSRモデルの比較 (—FEMモデル, —FEMモデル(回転無し), —SRモデル)

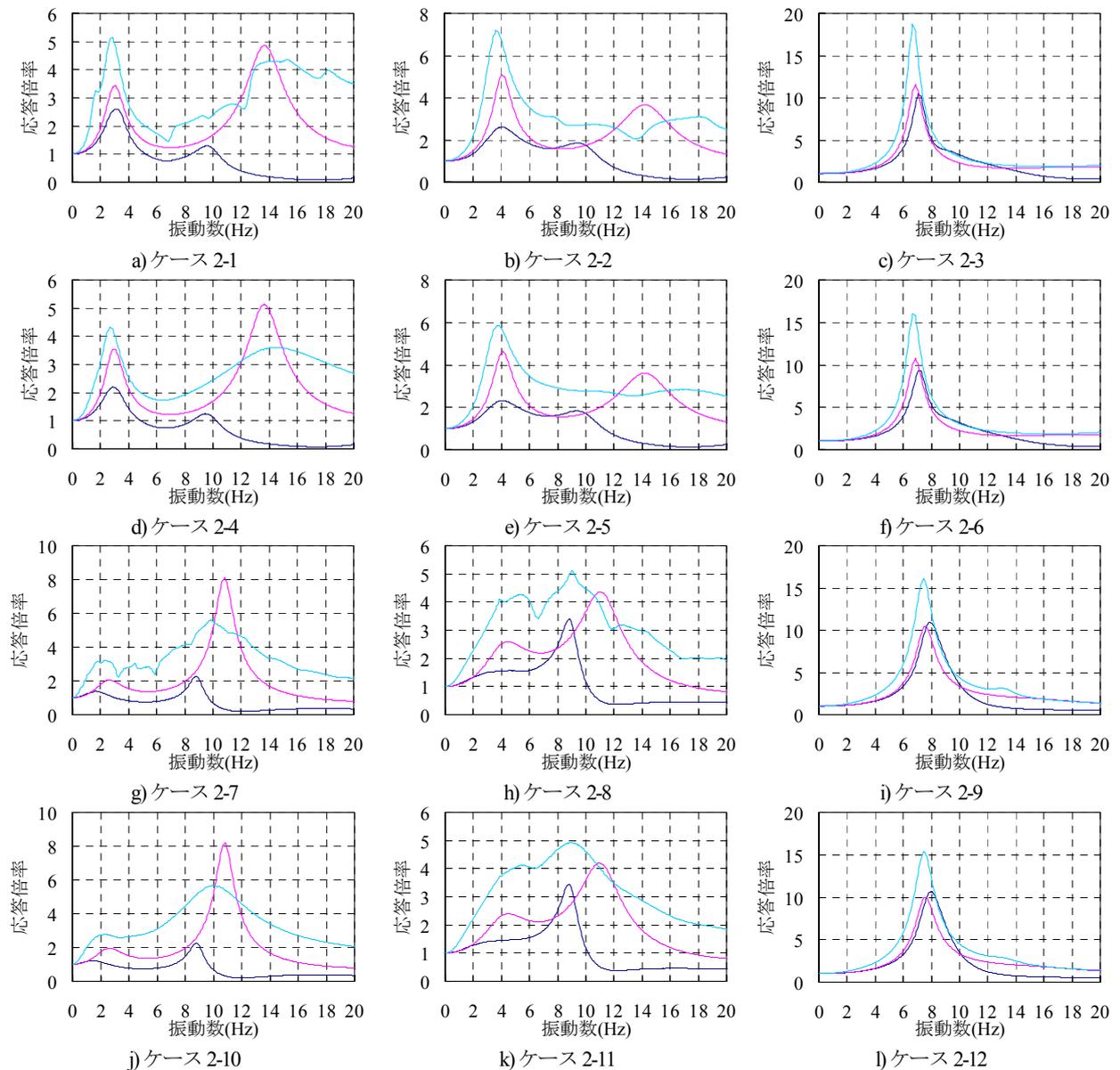


図-8 ケーソン基礎のFEMモデルとSRモデルの比較 (—FEMモデル, —FEMモデル(回転無し), —SRモデル)

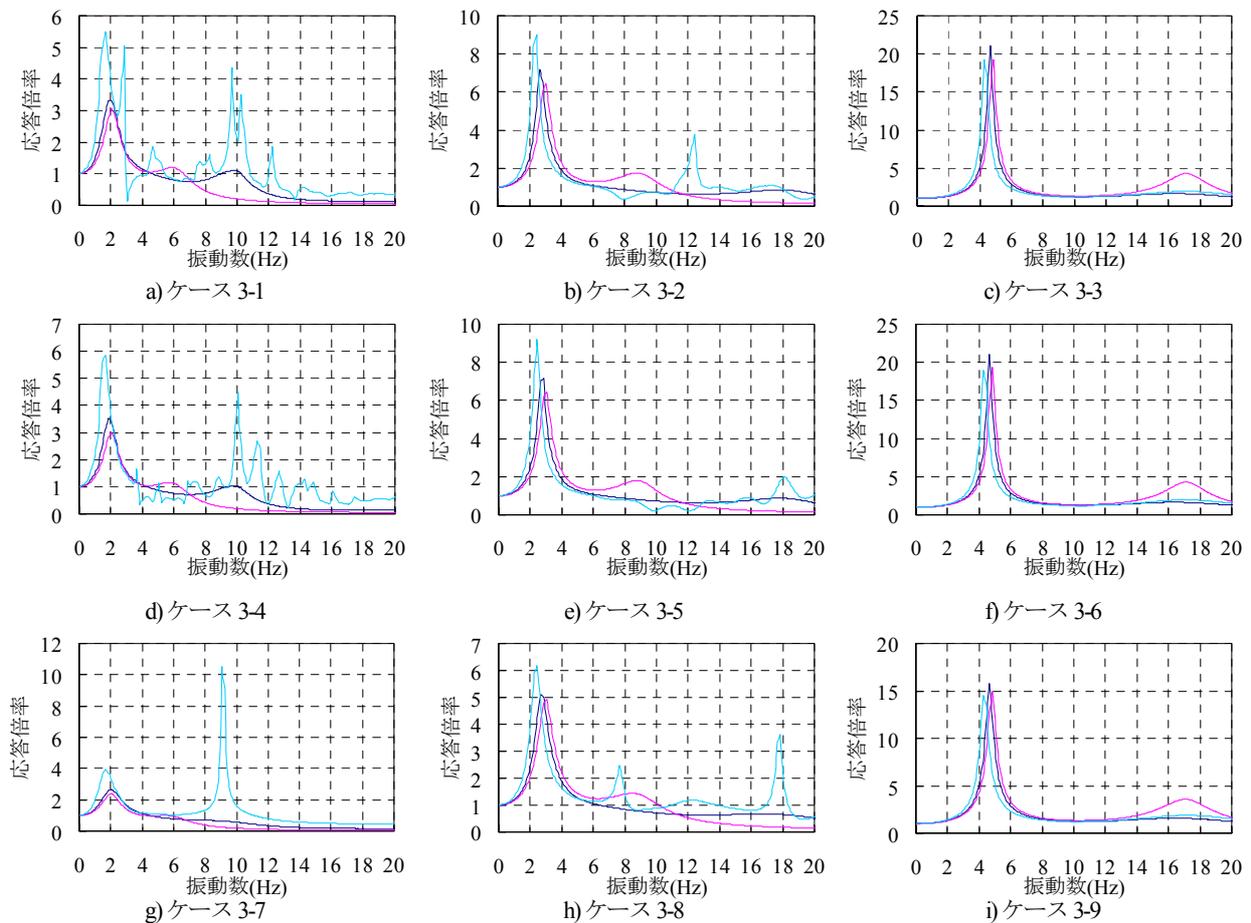


図-9 杭基礎のFEMモデルとSRモデルの比較 (—FEMモデル, - -FEMモデル(回転無し), —SRモデル)

表層地盤の振動数よりも小さい結果となるため、前章で述べたように水平・回転ともに地盤に設定した等価減衰定数と同じとなっている。応答比較図については、FEMモデルにおける回転の影響はほとんど無く1次モードと考えられる最初のピークについて、SRモデルにおいても概ね再現できていることがわかる。2次モードと考えられるピークについては、振動数も異なり、SRモデルの結果はFEMモデルの結果よりも大きくなる。これは前章で示す減衰定数の振動数依存性が示す通り、振動数の増加に伴い減衰定数は増加するものの、SRモデルには1次モードの減衰定数を与えたためFEMモデルよりも小さくなるためである。また、振動数が異なった理由については、SRモデルの地盤バネ剛性として静的な値を用いているのに対して、FEMモデルでは、振動数の増加に伴い、地盤バネ剛性はなだらかに減少しているため、ピークとなる振動数が減少したものと考えられる。1次モードが卓越する系においては、SRモデルにおいても地震応答を概ね再現できると考えられる。

ケーソン基礎について、表-5に各ケースの1次の振動数及び減衰定数を、図-8に応答比較図を示す。減衰定数については、地盤剛性の低下とともに、減衰定数が小さくなっている。これは減衰定数曲線が地盤剛性によりあ

まり変化しないものの、1次の振動数が剛性低下に伴い低下しているためである。また、表層地盤の等価減衰定数の差による影響はあまりみられない。応答比較図については、1層地盤となる $V_s=300\text{m/sec}$ のケースでは、SRモデルと回転入力無しのFEMモデルの場合についてはほぼ同じ結果となるが、回転入力によりピークとなる振動数はあまり影響がないものの応答倍率が大きく算出されている。表層地盤の剛性が低下したケースについては、FEMモデルでの回転入力の有無により、全振動数域で回転入力による応答倍率が大きくなり、ケーソン基礎については回転入力に対する影響を与えることがわかる。また、回転入力無しのFEMモデルとSRモデルとの比較においては1次モードの振動数については再現できているものの、応答倍率が大きく異なり、1次モードとした振動数においても大きく異なる。また、基礎深さを20mとしたケースにおいては明確な1次のピークがなく高振動数域においてピークがみられる。表層地盤の等価減衰定数の影響としてはインピーダンスにおいても明確な差が生じていないので、応答倍率においても同様に影響は小さかったものと考えられる。また、SRモデルにおいては、直接基礎と同様に2次モードと思われる応答倍率のピークがみられる。今回得られた減衰定数を用

いたSRモデルでは、FEMモデルと比較して、地盤剛性が低いケースでは大きく算出される傾向となるが、回転入力を考慮した結果に対してはSRモデルの方が小さく算出されるケースも多い事から、地盤剛性が小さいケースへの適用においてはさらなる検討が必要となる。

杭基礎について、表-6 に各ケースの1次の振動数及び減衰定数を、図-9 に応答比較図を示す。減衰定数については、地盤剛性の低下に伴い減衰定数が増加している。また、杭の深さの影響はあまりみられない。表層地盤の等価減衰定数の増加により、SRモデルの減衰定数も増加している。応答比較図については、FEMモデルの回転の有無の影響については $V_s=300\text{m/sec}$ ではほぼ1次の振動数において同様のピークがあり回転の影響はそれほど大きくないが、地盤剛性の低下とともに、回転により1次モードの応答倍率が大きく算出されているだけでなく、高振動数域においてもピークがみられる。また、地盤に与えた等価減衰定数の影響としては、インピーダンスから得られた減衰定数が大きく算出されていることから応答倍率がいずれも低減されており、高振動数域での不規則なピークも無くなっている事がわかる。水平入力のみFEMモデルとSRモデルとの比較においては、1次モードに関してほぼ同様の結果が得られている。

4. まとめ

SRモデルの基礎地盤バネに用いる減衰定数を、薄層要素法を用いたFEMモデルにより求めた1次振動数に相当するインピーダンスから算出するとともに、FEMモデルとSRモデルの応答倍率を比較することによってその近似度を検討した。本検討結果をまとめると以下の通りである。

1) 直接基礎・杭基礎については、検討したいずれの地盤剛性においても、1次モードの応答倍率についてSRモ

デルによってFEMモデルの結果を概ね再現することができた。なお、SRモデルには静的な地盤バネ剛性及び1次モードの振動数における減衰定数を用いるため、2次モードについては振動数がSRモデルの方が大きく応答倍率についても大きくなり、その一致度は低下する。このため、1次モードが卓越するような振動系の場合にはSRモデルによってFEMモデルと同様の地震応答を得ることができると考えられる。

- 2) ケーソン基礎については、地盤剛性が高いケースでは、SRモデルによって直接基礎・杭基礎と同様の結果が得られたが、地盤剛性が低いケースでは一致度は大きく低下した。
- 3) 本検討では、地盤の剛性は静的な値を、減衰定数はこの剛性を用いて算出した1次モードの振動数で設定した値を用いたが、共振曲線の一致度のみならず、具体的な地震応答の一致度を検討するとともに、回転入力の影響を含めてSRモデルの近似度をさらに高める方法について検討が必要と考えられる。
- 4) 地盤の剛性と減衰定数の設定法に関しては、今後さらに、地盤の非線形性、基礎の大きさや埋め戻し、構造系の剛性等の影響について明かにするとともに、強震観測結果との検証を踏まえた検討が必要と考えられる。

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，2002.3.
- 2) 土木学会編：動的解析と耐震設計[第4巻]ライフライン施設，pp.56-58, 1989.7.
- 3) 齊藤正人，渡邊啓行：滑りと剥離の境界非線形性が杭基礎の動的インピーダンスに及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集No.766/I-68, pp.263-275, 2004.7.
- 4) (株)地震工学研究所：SuperFLUSH/3DS使用説明書，1992.

(2007.4.6 受付)

ANALYTICAL STUDY ON THE DAMPING FACTOR OF BRIDGE FOUNDATIONS

Takao OKADA, Shigeki UNJOH

In the dynamic analysis of bridges, a bridge foundation is simply modeled as sway-rocking spring model (SR-Model). It is necessary to take account of the nonlinear soil-structure interaction to determine the characteristics of spring elements. However, such elements are generally given as simple values in the usual dynamic analysis regardless of the strain amplitude of soils, foundations types, and soil conditions.

In this research, the damping factors for the SR-model are analysed through 3-D FEM model using thin-layered element method and the comparison of the response functions between FEM model and SR-model are made.