

基礎の曲げ剛性および基礎先端の回転抵抗が 入力損失効果に及ぼす影響

土井 達也¹・室野 剛隆²・齊藤 正人³

¹正会員 修士（工学） 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 博士（工学） 鉄道総合技術研究所 研究開発推進部
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 博士（工学） 埼玉大学 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門
（〒338-0825 埼玉県さいたま市桜区下大久保255）

1. はじめに

杭基礎やケーソン基礎に支持される構造物では、地盤－基礎系の動的相互作用による入力損失が生じる。一方、ケーソン基礎など、基礎く体の曲げ剛性が大きい基礎では、地震動の振動数によっては、有効入力動が自由地盤に比べて増幅する（以下、このことを有効入力動の増幅と呼ぶ）場合がある（例えば¹⁾）ことが知られている。

有効入力動の増幅が生じるか否かに影響を及ぼす要因として、1 つは基礎く体の曲げ剛性が考えられる。また、基礎径を大きくすると基礎く体の曲げ剛性だけでなく基礎底面の回転抵抗も増大し、この双方が有効入力動の増幅の有無に影響を及ぼしていると考えられる。

そこで本検討では、有効入力動の増幅が生じる場合、生じない場合のメカニズムを考察するため、単杭モデルを対象に杭径、杭長、表層地盤の等価せん断波速度をパラメータとして、有効入力動の増幅の傾向を比較した。さらに、支持杭を有する高架橋およびケーソン基礎を有する橋脚を対象とした既往の入力損失の検討結果^{2), 3)}と単杭モデルの検討結果との比較を行った。

2. 単杭モデルの解析モデルおよび解析条件

有効入力動の増幅の比較は、自由地盤における地表面の変位に対する杭頭変位の比で表される有効入

力係数 η を算出することにより行った。有効入力係数 η が1.0を下回る場合は入力損失が生じることを意味し、有効入力係数 η が1.0を超える場合は有効入力動の増幅が生じることを意味する。

単杭モデルでの検討は、有効入力係数 η が1.0を超えるか否かを基礎く体の曲げモードとの関係から簡明に考察するため、實地⁴⁾による有効入力係数 η を応答変位法により評価する手法により評価した。この手法は、自由地盤の各モードの固有値から得られる固有モードを地盤変位と解釈し、基礎構造物に作用させることで得られる基礎の変位応答と地盤変位の比から入力損失を評価する手法である。

検討の概要を図-2に示す。検討においては、1層地盤（層厚10mおよび20m）のみの固有値解析を行い、1次モードの変形モードを求め、求めた変形モードを地盤変位と見立てて、杭に作用させた。解析ケースは、表-1に示すように杭長 l (m)、表層地盤の等価せん断波速度 V_{seq} (m/s)、杭径 D (m)をパラメータとした20ケースを実施した。なお、表-1の実施ケースには、一般的な鉄道構造物の杭径としては現実的ではないと考えられるものも含まれるが、本検討は幅広い基礎径に対する基礎く体の曲げ剛性や基礎底面の回転抵抗の影響を考察することが目的であるため、地盤ばねの算定式の相違による影響が生じないように、本検討においてはすべてのケースを杭基礎として扱った。

図-3に解析モデルを示す。解析モデルは自由地盤と構造系で構成されており、自由地盤の節点に1次モードの地盤変位を強制変位として作用させる静的

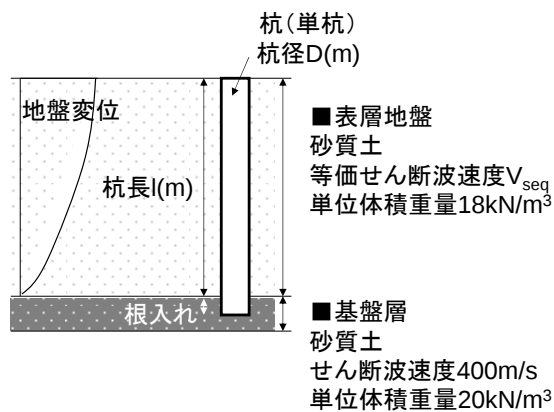


図-2 検討の概要

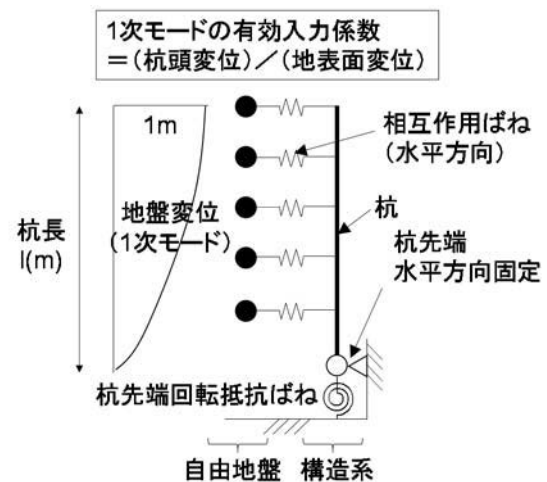


図-3 解析モデル

表-1 解析ケース

杭長 l (m)	表層地盤の等価せん断波速度 V_{seq} (m/s)	杭径 D (m)
20, 10	200, 100	1, 3, 5, 10, 20

計 20 ケース

表-2 適用したばね値 (杭前面抵抗)

V_{seq} (m/s)	D (m)	変形係数 E_d (kN/m ²)	杭前面の水平 地盤反力係数 k_h (kN/m ³)	水平ばね K_h (kN/m)
100	1	5507	9912	9912
	3		4348	13045
	5		2964	14822
	10		1763	17626
	20		1048	20961
200	1	22026	39647	39647
	3		17393	52178
	5		11857	59286
	10		7050	70504
	20		4192	83843

表-3 適用したばね値 (杭先端回転抵抗)

D (m)	変形係数 E_d (kN/m ²)	杭先端の鉛直地盤 反力係数 k_v (kN/m ³)	杭先端の回 転ばね K_r (kN-m/rad)
1	97894	137051	6727
3		60123	239055
5		40988	1257494
10		24372	11963368
20		14491	113815380

線形解析により、杭の応答値を算定した。ここで、地盤変位は、地表面の地盤変位が1mとなるように設定した。自由地盤とく体の間の相互作用ばねは、杭の前面抵抗ばねと杭先端の回転抵抗を考慮した。ばね値の設定は、いずれの杭径も鉄道構造物等設計

標準・同解説 基礎構造物⁵⁾の杭基礎の計算式によった。表-2、表-3に本解析で適用したばね値を示す。根入れ範囲の水平抵抗は、本来は前面抵抗ばねにより考慮するが、本検討では表層地盤の前面抵抗と杭先端の回転抵抗に着目する観点から固定条件とした。

3. 解析結果および考察

図-4に各ケースの杭および地盤の変位分布図を示す。また、図-5に各ケースの曲げモーメント分布図を示す。図-4、図-5には杭の特性値 $\beta (= \sqrt[4]{k_h D / 4EI})$ と杭長 l の積 βl を併記しており、詳細は後述する。まず、杭長20m、表層地盤 $V_{seq}=200$ m/sの条件で、杭径ごとの変位分布および曲げモーメント分布の傾向を比較する。図-4(a)をみると、杭径1mの条件では杭変位は地盤変位に概ね追従している。一方、杭径を3mとすると、杭体が地盤変位に追従しづらくなり、地盤変位に対して杭頭変位が増幅している。さらに杭径を大きくしていくと、地盤変位に対する杭頭変位の増幅が小さくなり、杭径20mでは杭頭変位が地盤変位よりも小さくなっている(入力損失が生じている)。また、図-5(a)より、杭径1mおよび杭径3mの条件では、杭先端の曲げモーメントは小さい。しかし、杭径をさらに大きくしていくと、杭径10m、20mでは杭先端で曲げモーメントの最大値が現れている。

図-4(b)、図-5(b)より、同様の傾向は杭長20m、表層地盤 $V_{seq}=100$ m/sのケースでも認められるが、杭径1mにおいてやや杭頭で増幅がみられる点、杭径10m～20mでの杭頭変位が表層地盤 $V_{seq}=200$ m/sのケースより小さい点、杭径5mにおいても杭先端で曲げモーメントの最大値が現れている点で傾向が異なる。

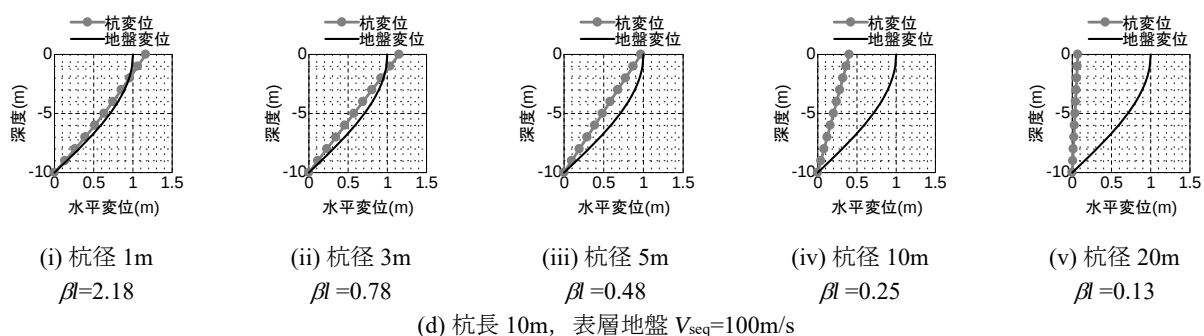
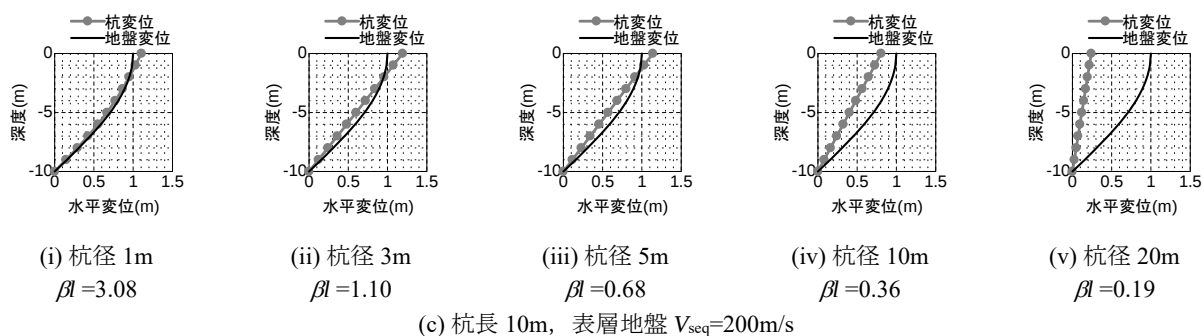
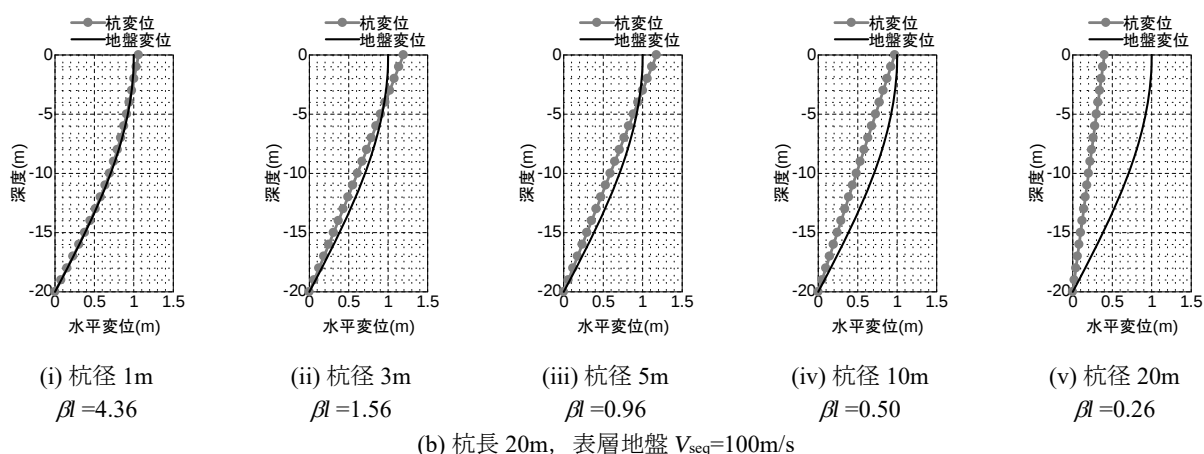
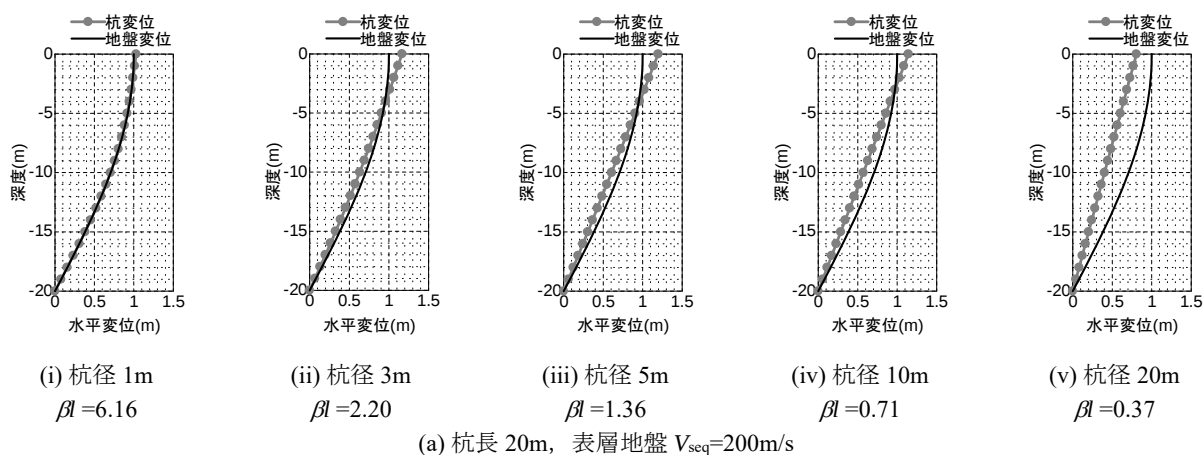
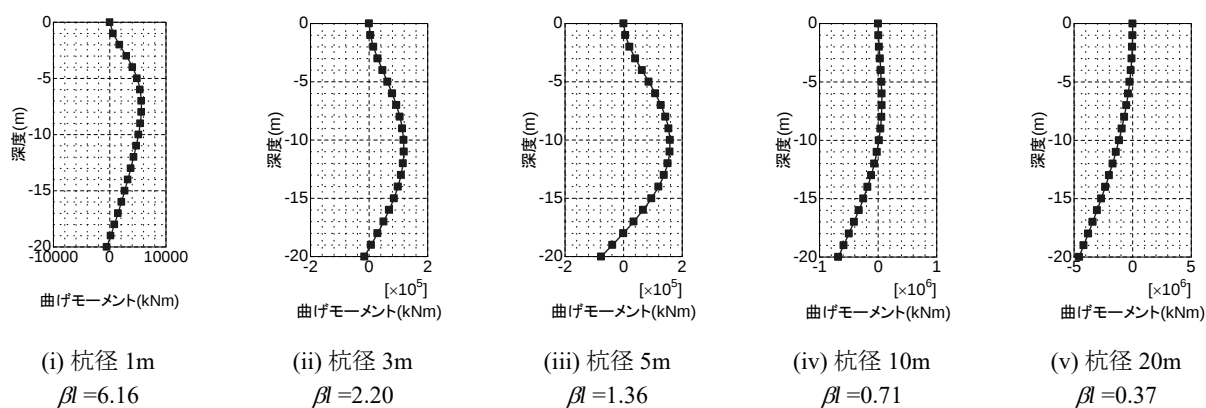


図-4 杭および地盤の変位分布図

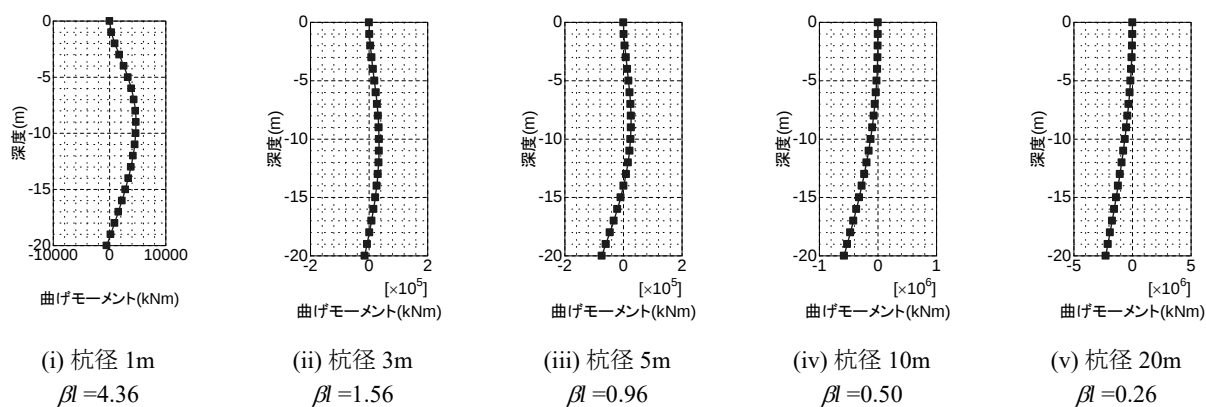
さらに、図-4(c), (d), 図-5(c), (d)より、杭長10mのケースでは杭長20mのケースに比べてより小さい杭径で、地盤変位に対して杭頭変位が増幅する傾向、杭頭変位が地表面変位より小さくなる傾向、杭先端で

曲げモーメントの最大値が現れる傾向が確認できる。

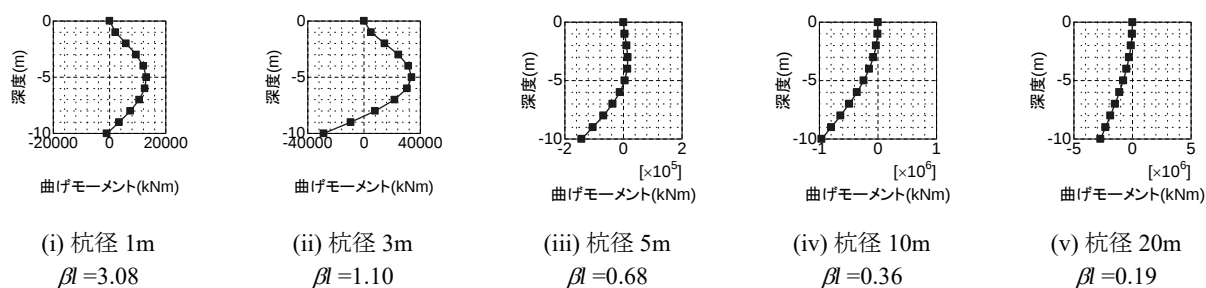
以上の傾向をより明確に把握するために、図-4の結果から得られた地盤1次モードにおける有効入力係数 η を、杭径との関係として整理した結果を図-6



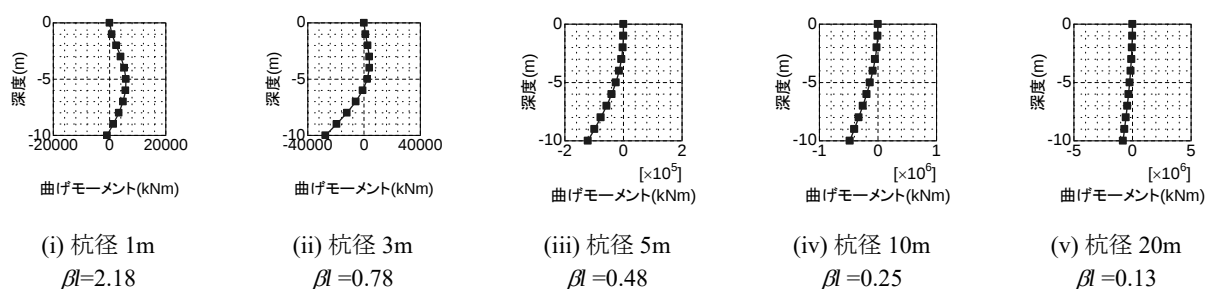
(a) 杭長 20m, 表層地盤 $V_{seq}=200\text{m/s}$



(b) 杭長 20m, 表層地盤 $V_{seq}=100\text{m/s}$



(c) 杭長 10m, 表層地盤 $V_{seq}=200\text{m/s}$



(d) 杭長 10m, 表層地盤 $V_{seq}=100\text{m/s}$

図-5 曲げモーメント分布図

に示す。図-6より、①杭長が短いほど、②表層地盤の剛性が低いほど、地盤1次モードにおける有効入力係数 η が最大となる杭径が小さくなることがわかる。また、①杭長が短いほど、②表層地盤の剛性が低いほど、杭径5m、10m、20mでの地盤1次モードにお

ける有効入力係数 η が小さくなることがわかる。

また、図-7に杭先端の回転角と杭径の関係を示す。いずれの杭長、 V_{seq} の条件でも、杭径が大きくなるほど杭先端の回転角が小さくなる傾向を示しており、図-5で考察した、杭径が大きいほど杭先端が固定条

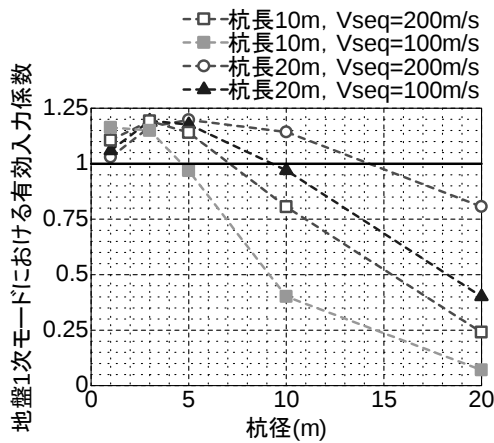


図-6 杭径と地盤1次モードにおける有効入力係数 η の関係

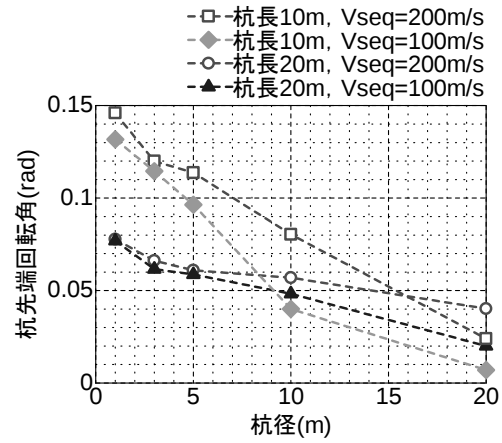


図-7 杭径と杭先端回転角の関係

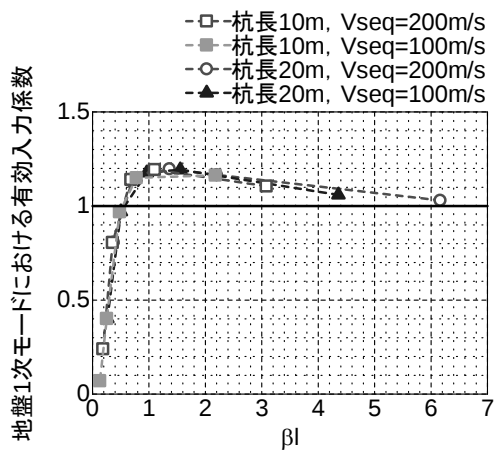


図-8 βl と地盤1次モードにおける有効入力係数 η の関係

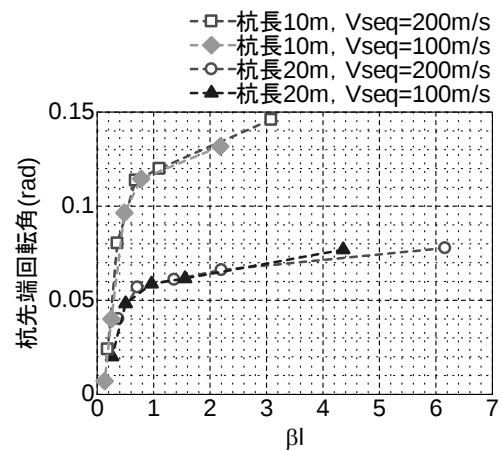


図-9 βl と杭先端回転角の関係

件に近づく傾向と整合している。また、①杭長が短いほど、②表層地盤の剛性が低いほど、杭径を1mから増加させたときの回転角の減少量が大きい。

次に、図-4～図-7で考察した事項を、表層地盤と杭の剛性比の観点で考察する。表層地盤の剛性に対する杭の剛性は、杭の特性値 $\beta(=\sqrt[4]{k_h D/4EI})$ と杭長 l の積 βl で表現でき、 βl が小さくなるほど表層地盤の剛性に対して杭の剛性が高くなる。 βl が1.0を下回ると、杭の曲げ変形はほとんどなくなり、計算上は剛体として振舞うことが知られている⁶⁾。

図-8に、この βl と地盤1次モードにおける有効入力係数 η の関係を示す。図-8より、今回実施したケースにおける地盤の1次モードにおける有効入力係数 η の傾向は、杭長および表層地盤の等価せん断波速度によらず、 βl の値によって明確に傾向が分かれている。 βl が3程度以上の場合、有効入力動の増幅は1割未満と小さい。一方、 βl が0.7～3程度の範囲では、杭の曲げ変形が小さくなることにより、地盤の変形に杭が追従しづらくなり、有効入力動が1～2

割程度増幅している。しかし、 βl が0.7程度以下の範囲では、杭がほぼ剛体となり地盤変位に追従しづらい点は βl が0.7～3程度の場合と同じであるものの、杭先端の回転抵抗の影響が卓越するようになり、入力損失が生じるようになる。

また、図-9に βl と杭先端回転角の関係を示す。今回の地盤変位荷重や境界条件においては、 βl が0.7程度を境に、勾配が急変する傾向がある。これは、 βl が小さくなるにつれ杭の挙動が剛体的になり、杭先端の固定条件の影響を受けることに加え、杭径を大きくするにしたがって杭先端の回転ばねの値が増大することが原因と考えられる。

4. 支持杭を有する高架橋およびケーソン基礎を有する橋脚と単杭モデルの比較^{2), 3)}

3. 解析結果および考察で考察した事項を実構造物を対象とした入力損失の検討結果と比較するため、

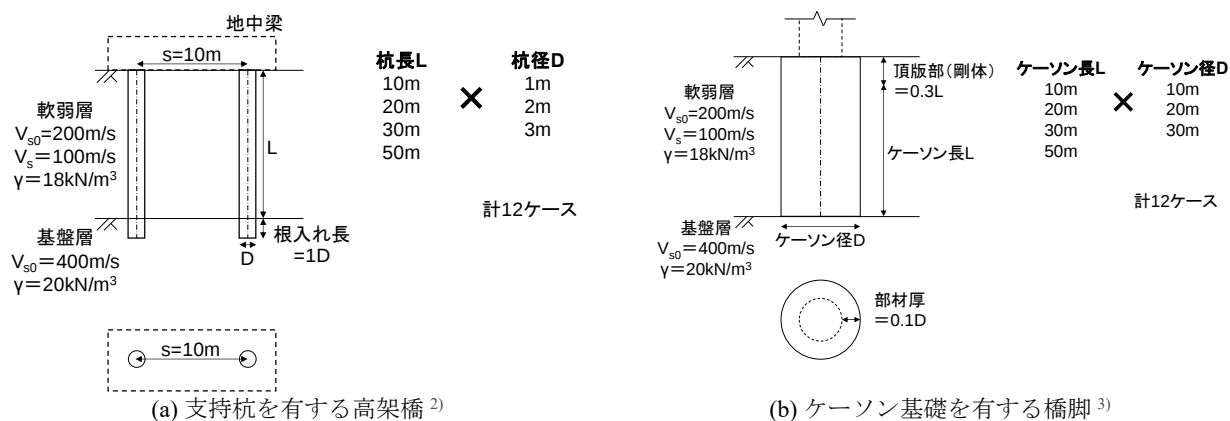


図-10 検討条件

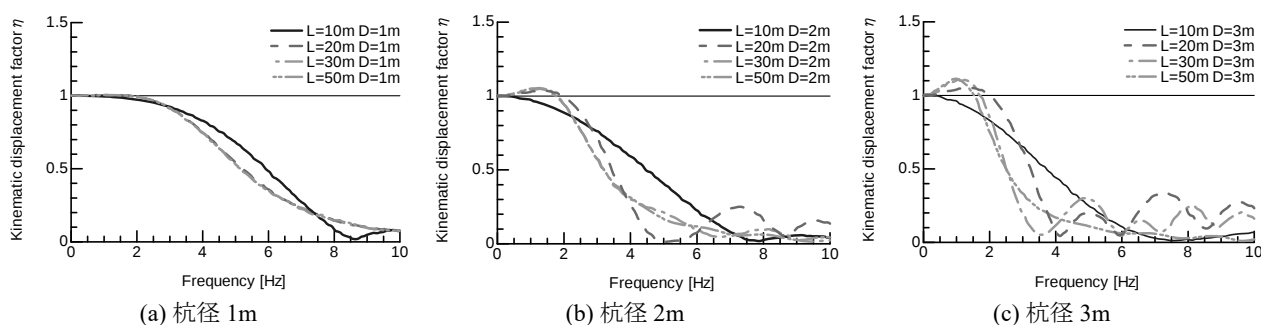


図-11 支持杭を有する高架橋の有効入力係数 η の検討結果²⁾

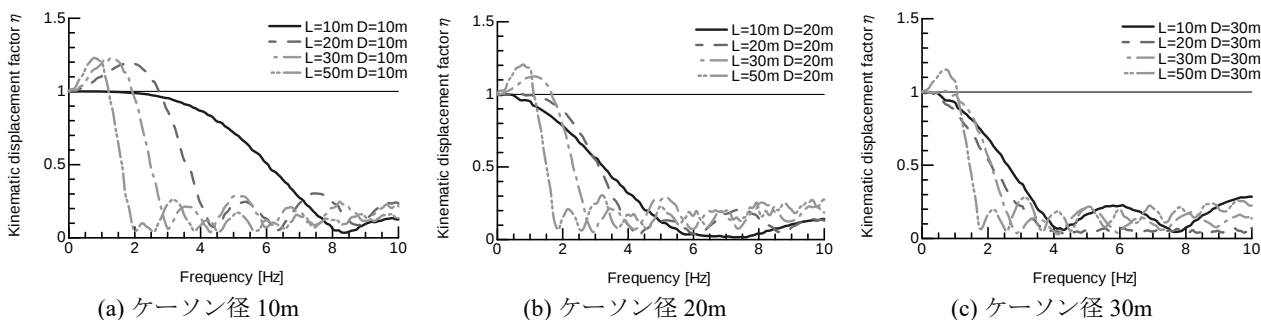


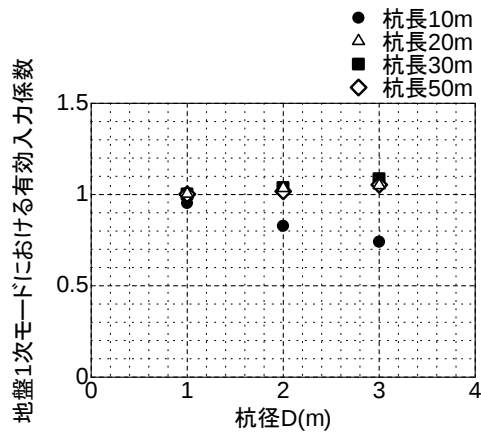
図-12 ケーソン基礎を有する橋脚の有効入力係数 η の検討結果³⁾

支持杭を有する高架橋およびケーソン基礎を有する橋脚を対象とした既往の入力損失の検討結果^{2), 3)}と単杭モデルの検討結果との比較を行う。

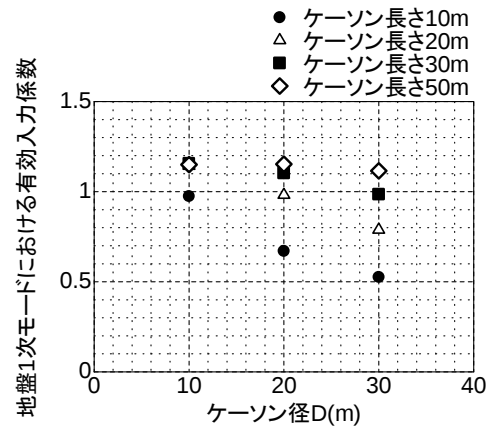
支持杭を有する高架橋では、図-10(a)に示すように、杭長 L を10m, 20m, 30m, 50m、杭径 D を1m, 2m, 3mとした計12ケースを実施した。ケーソン基礎を有する橋脚では、図-10(b)に示すように、ケーソン長さ L を10m, 20m, 30m, 50m、ケーソン径 D を10m, 20m, 30mとした計12ケースを検討した。動的解析はいずれの検討も、一体型モデルによる2次元動的線形解析モデルにより行い、有効入力係数 η は、自由地盤地表面加速度に対する杭頭またはケーソン天端の絶対加速度のフーリエ振幅スペクトル比とした⁴⁾。なお、解析では動的相互作用のうち幾何学的相互作用の影響のみを考慮するため、く体の重量を無質量

とし、慣性の相互作用の影響を取り除いた。自由地盤とく体の間の相互作用ばねは、鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物⁵⁾により設定した。入力波形はホワイトノイズとし、モデルの基盤面に加振した。

図-11に支持杭を有する高架橋の有効入力係数 η の検討結果を示す。図-11(a)より、杭径1mの条件では、いずれの杭長においても有効入力係数 η はすべての振動数で1.0を下回っている。一方、図-11(b), 図-11(c)より、杭径が2mおよび3mの条件では、杭長10mの条件では有効入力係数 η はすべての振動数で1.0を下回っているが、杭長20m, 30m, 50mの条件では、有効入力係数 η が1.0を上回る(有効入力動の増幅が生じる)振動数が存在することがわかる。また、有効入力動の増幅は、杭径2mより杭径3mのほうが



(a) 支持杭を有する高架橋



(b) ケーソン基礎を有する橋脚

図-13 杭径またはケーソン径と地盤1次モードにおける有効入力係数 η の関係 (図-11, 図-12 より読み取り)

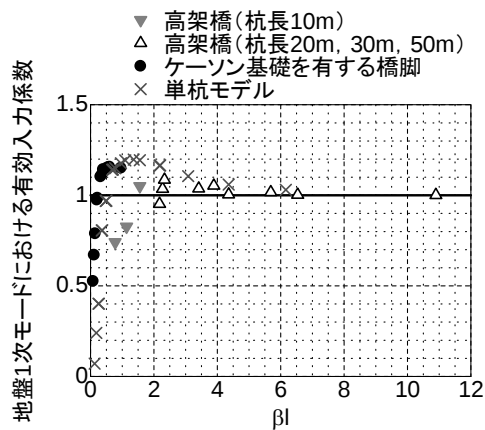


図-14 βl と地盤1次モードの有効入力係数 η の関係
(図-8, 図-13 の結果の再整理)

やや大きいことがわかる。つまり、杭径が大きいほうが有効入力動の増幅が生じやすい傾向がある。

図-12 にケーソン基礎を有する橋脚の有効入力係数 η の検討結果を示す。図-12(a)より、ケーソン径が10mのケースでは、ケーソン長さ10mの条件では有効入力係数 η はすべての振動数で1.0を下回っているが、ケーソン長さ20m, 30m, 50mの条件では、有効入力係数 η が1.0を上回る(有効入力動の増幅が生じる)振動数が存在することがわかる。しかし、図-12(b)より、ケーソン径が20mのケースでは、有効入力係数 η が1.0を超えるのはケーソン長さ30m, 50mのケースだけである。また、図-12(c)より、ケーソン径が30mのケースでは、有効入力係数 η が1.0を超えるのはケーソン長さ50mのケースだけである。つまり、ケーソン径が大きいほど有効入力係数 η の増幅が生じにくくなっている。この傾向は、支持杭を有する高架橋とは逆になっている。

また、図-13 に図-11, 図-12 の結果から杭径と地

盤1次モードにおける有効入力係数 η の関係を整理した結果を示す。ただし、地盤の1次モードの振動数は、地盤の $V_{\text{seq}}=100\text{m/s}$ の条件と軟弱層の層厚から1/4波長則より、杭長10mのケースでは2.5Hz、杭長20mのケースでは1.25Hz、杭長30mのケースでは0.83Hz、杭長50mのケースでは0.5Hzとした。図-13(a)より、支持杭を有する高架橋においては、杭長10mのケースでは杭径が大きいほど地盤1次モードにおける有効入力係数 η が低下するものの、杭長20m, 30m, 50mのケースでは杭径が大きいほど地盤1次モードにおける有効入力係数 η がやや大きくなる。一方、図-13(b)より、ケーソン基礎を有する橋脚においては、ケーソン径を大きくするほど、地盤1次モードにおける有効入力係数 η が小さくなる。このように、図-11, 図-12 から読み取れた「支持杭を有する高架橋では杭径が大きいほど有効入力動の増幅が生じやすく、ケーソン基礎を有する橋脚ではケーソン径が大きいほど有効入力動の増幅が生じにくい」傾向は、図-13 から読み取れる。

次に、支持杭を有する高架橋およびケーソン基礎を有する橋脚の解析結果と単杭モデルの解析結果を比較し、支持杭を有する高架橋およびケーソン基礎を有する橋脚における有効入力動の増幅メカニズムについて考察を行う。図-13の結果に対して、横軸を βl に変更して整理した結果を図-14に示す。図-14には単杭モデルの結果も併記している。図-14より、ケーソン基礎を有する橋脚に対しては、ある βl を境に地盤1次モードにおいて有効入力動の増幅が生じる場合と入力損失が生じる場合に分かれる点で、単杭モデルと類似した傾向がみられる。このため、図-13(b)にでみられるようにケーソン基礎を有する橋脚において杭径を大きくするほど有効入力係数 η が減少するのは、単杭モデルで考察したように、底面

の回転抵抗の影響が卓越したためと考えられる。

支持杭を有する高架橋に対しては、杭長20m以上のケースでは概ね単杭モデルと類似した傾向を示す。このようなケースでは、単杭モデルで考察したように、杭の曲げ変形が小さくなり、地盤の変形に杭が追従しづらくなることにより、有効入力動の増幅が生じていると考えられる。一方、杭長10mのケースでは、単杭モデルの傾向と異なり、有効入力動の増幅が生じていない。原因としては、高架橋モデルにおける地中梁による杭頭の回転拘束の影響などが考えられるが、今後、単杭モデルに杭頭の回転拘束を追加した解析などにより、検討を深度化する必要がある。

5. まとめ

基礎く体の曲げ剛性および基礎底面の回転抵抗が入力損失効果に及ぼす影響を考察するため、杭の前面抵抗および杭先端の回転抵抗を考慮した単杭モデルに対して、静的線形解析により地盤の1次モードの入力損失効果を評価した。さらに、支持杭を有する高架橋およびケーソン基礎を有する橋脚を対象とした既往の有効入力係数 η の検討例と本結果を比較した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 単杭モデルにおいて杭径を1mから増加させていくと、まず杭の剛性が地盤に対して剛体に近づくことにより、杭体が地盤変位に追従しづらくなり、地表面の地盤変位に対して杭頭変位が増幅する。さらに杭径を大きくしていくと、杭先端の回転抵抗の影響が卓越することにより、入力損失が生じる。
- (2) 単杭モデルにおいて杭径が大きいほど、最大曲げモーメントが杭先端で生じるようになり、杭先端の回転角は小さくなる。すなわち、下端固定条件に近づく。
- (3) (1), (2)の傾向は、杭長および表層地盤の等価せん断波速度によらず、杭の特性値 β と杭長 l の積

βl の大小で表現できる。

- (4) ケーソン基礎を有する橋脚においてケーソン径が大きいほど有効入力動の増幅が小さくなる原因は、ケーソン底面の回転抵抗が卓越することであると考えられる。
- (5) 支持杭を有する高架橋における有効入力動の増幅は、杭の剛性が地盤に対して剛体に近づくことにより、地盤の変形に杭が追従しづらくなるのが原因と考えられる。ただし、杭長が短い場合は、 βl が小さくても有効入力動の増幅が生じない場合がある。原因として、地中梁による杭頭の拘束効果の影響などを考えられる。

今後は、杭頭の回転抵抗ばねを追加して検討を行い、①基礎く体の曲げ剛性、②基礎の前面抵抗、③基礎底面の回転抵抗、④基礎頂部の回転抵抗のそれぞれが、入力損失に及ぼす影響を解明することが課題である。

参考文献

- 1) 齊藤正人, 西村昭彦, 渡邊啓行: 曲げ柔性の影響を考慮した大型基礎の入力損失効果に関する理論的評価, 土木学会論文集 No. 731/I-63, 317-330, 2003.
- 2) 土井達也, 押田直之, 山田聖治, 室野剛隆, 日野篤志: ケーソン基礎に対する入力損失効果の簡易評価手法の適用性, 第74回土木学会年次学術講演会, 2019 (投稿中)。
- 3) 押田直之, 土井達也, 山田聖治, 室野剛隆, 日野篤志: 杭基礎における有効入力係数の増幅条件に関する検討, 第74回土木学会年次学術講演会, 2019 (投稿中)。
- 4) 實地雄大, 室野剛隆: 杭基礎による入力損失効果の実務的評価手法の提案, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 73, No. 2, 473-482, 2017.
- 5) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, 2012.
- 6) 杭基礎の設計法とその解説, 土質工学会, pp. 409, 1985.