

地盤のひずみ依存性が大型基礎の入力損失効果 に与える影響に関する評価

齊藤正人¹・池亀真樹²・棚村史郎³・渡邊啓行⁴

¹正会員 博(工) 埼玉大学助手 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

E-mail:saily@post.saitama-u.ac.jp

²正会員 復建エンジニアリング 第2技術部(〒104-0061 東京都中央区日本橋堀留町 1-11-12)

³正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道技術推進センター(〒185-8570 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁴フェロー会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

橋梁・高架橋に用いる大型基礎が埋設される表層地盤には、ひずみ依存性と呼ばれる非線形性が卓越することが知られている。本論文では、このひずみ依存性が入力損失効果に与える影響を明らかにするため、せん断土槽を用いた模型振動実験を実施し、直接計測に基づく入力損失効果の動特性の把握を実施した。その結果、ひずみ振幅の増加が入力損失効果を増加させるという既往の知見に反し、入力損失効果を減少させる場合があることを観測した。そこで、入力損失効果の理論解に基づきその現象説明を試みた。この理論的検討により、表層地盤の減衰増加が入力損失効果を減少させる要因になること、また剛性低下に伴う表層地盤の卓越振動数の変化が、入力損失効果に見かけ上の増減を生じさせることが明らかとなった。

Key Words: embedded foundations, effective seismic motion, input loss, strain-dependency

1. はじめに

本研究は、橋梁・高架橋に用いるケーソン基礎等の大型基礎を対象に、入力損失効果について研究を行うものである。入力損失効果とは、キネマティックな相互作用であり、基礎の剛性や幾何学的形状による周辺地盤への拘束効果により、基礎へ入射される地震動が、自由地盤の地震動と比べて低減する効果であると一般に定義される。既往の研究では、根入れのある基礎を対象に入力損失効果の特性を解析的あるいは実証的に検討しており^{1)~8)}、著者ら数名においても、より実際的な大型基礎の入力損失効果を評価するため、基礎側壁の曲げ柔性が入力損失効果に与える影響に関して理論的評価を行い、その特性を明らかにした⁹⁾。

しかし、こうした大型基礎が埋設される表層地盤には、ひずみ依存性と呼ばれる非線形性を有することが知られている。一般にひずみ振幅が増加することで地盤の剛性は低下し、反対に減衰は増加する性質がある。しかし、地盤のひずみ依存性に着目した

入力損失効果に関する既往の研究は非常に少なく、十分な検討が行われていないのが現状である。こうした背景のもと、田中ら¹⁰⁾は、浅い根入れのある基礎について、有限要素法による地盤-基礎系のモデル化と、等価線形化法に基づく数値解析を実施している。この検討によれば、非線形性が卓越することで、入力損失効果が増加する傾向にあることが報告されている。その理由として、ひずみ振幅の増加に伴いせん断波速度が小さくなることで、同じ振動数に対する地動の波長が見かけ上小さくなり、基礎周辺の地動の振幅差、位相ずれが相対的に大きくなるためであるとしている。また安井ら¹¹⁾は、兵庫県南部地震の実観測記録と、薄層要素法に基づく等価線形化法を用いた逆解析により、建物基礎の入力損失効果を評価している。この検討結果によれば、地盤のひずみ依存性が卓越すると、地盤の微小ひずみ時の剛性および減衰に対応する入力損失効果に比べて、長周期側でその効果が顕著に現れることが報告されている。以上のことから、地盤のひずみ依存性は、入力損失効果に影響を与えることは明らかであり、

橋梁・高架橋等の大型基礎に入力損失効果を導入する場合には、このひずみ依存性が入力損失効果に与える影響とその特性を十分に把握しておく必要がある。

しかし、安井らの研究のように実観測記録に解析を介して入力損失効果を把握した例はあるとしても、定義どおりの無質量基礎に対して、地盤のひずみ依存性に着目して入力損失効果を直接計測した報告は今までにない。なぜなら、こうしたキネマティック相互作用を評価するためには、剛性のみを付加した無質量状態の基礎という、実際には有り得ない物理条件を満足させる必要があるため、数値解析に頼らざるを得ないからである。しかし、ある程度の近似条件下においても、直接計測による入力損失効果を検討することは、実証的な特性把握として必要不可欠と考えられる。

そこで著者らは、せん断土槽を用いた模型振動実験を実施し、基礎内部を中空にした擬似無質量状態のアクリル製基礎のキネマティック応答を直接計測し、入力損失効果を評価した¹²⁾。本実験では、基本特性を把握するためにすべて調和加振実験とし、基礎の加振レベルを変化させて、地盤に生じるひずみレベルを変化させた。ところが本実験からは、地盤のひずみレベルが増加すると、入力損失効果が減少するという動特性が確認され、上述した既往の知見とは相反する結果となった。そのため著者らは、本実験結果に対するシミュレーション解析を実施することでその現象の解明を試みた¹²⁾。しかしこの解析では、実験結果を模擬するためのパラメータ抽出とその要因の推測に留まり、上述した現象を解明するには至らなかった。

そこで本研究では、ひずみ依存性が入力損失効果に与える影響について、著者数名が提案した大型基礎の入力損失効果に関する理論解⁹⁾を用いて検討を行い、その現象解釈を試みた。このなかで著者らは、ひずみ振幅の増加に伴う表層地盤の剛性低下と減衰増加が、それぞれ入力損失効果にどのような影響を与えるのかという点に着目し、その特性を理論的考察により明らかにした。そしてこの考察結果に基づき、模型実験で観測された現象が生じる理由を解明するに至った。またこれに付随して、表層地盤を構成する土の種類や拘束圧等の諸条件により異なるひずみ振幅と剛性・減衰曲線の変化特性の違いによる影響について検討を行った。本論文はこれら一連の検討内容について報告するものである。

表-1 香川¹³⁾、国生・岩橋¹⁴⁾の相似則に基づく
1/40 スケール 実験模型の諸元一覧

物性	相似則	物性値			
		実寸値	目標値	再現値	
表層地盤	層厚 (cm)	λ (0.026)	17.00	0.43	0.43
	密度 (t/m^3)	η (0.16)	1.80	1.37	1.376
	1次縦断振動数 (Hz)	$\eta^{-0.4} \lambda^{-0.4}$	2.21	37.24	45.20
基礎層	せん断弾性波速度 (cm/s)	$\eta^{-0.5} \lambda^{0.5}$	150.00	64.04	77.74
	層厚 (cm)	λ	7.69	0.20	0.20
	密度 (t/m^3)	η	2.0	1.52	1.63
円筒基礎	せん断弾性波速度 (cm/s)	$\eta^{-0.5} \lambda^{0.5}$	150.00	170.79	142.2
	長さ (cm)	λ	17.00	0.43	0.43
	直径 (cm)	λ	11.00	0.29	0.35
円形頂版・底板	直径 (cm)	λ	0.80	0.02	0.02
	ヤング率 (kN/cm ²)	$\eta^{1.2} \lambda^{1.2}$	2.50×10^7	1.47×10^6	1.03×10^6
	直径 (cm)	λ	13.85	0.35	0.35
円形頂版・底板	板厚 (cm)	λ	0.80	0.02	0.02
	ヤング率 (kN/cm ²)	$\eta^{1.2} \lambda^{1.2}$	2.50×10^7	1.47×10^6	1.03×10^6

2. せん断土槽を用いた模型振動実験

(1) 実験装置と模型の特性

本実験で対象としたケーソン基礎構造物はニューマチックケーソン基礎である。ケーソン基礎が埋設された地盤の平均的地質は、せん断弾性波速度が400m/s程度の厚い洪積層の上に厚さ17m相当の沖積層が堆積した構造であり、地盤の平均せん断弾性波速度は150m/s、単位体積密度は1.8t/m³である。地盤と基礎の詳しい諸元を表-1(実寸値)に示す。実験は力の比を一定とした香川¹³⁾、国生・岩橋¹⁴⁾の相似則を用い、地盤と基礎諸元を1/40(詳しくは0.026)スケールで作成した(表-1)。ここで、表中の目標値とは、実寸値を基準に相似則から求めた模型諸元の計算値であり、再現値とは、本実験で使用した実模型の諸元を示している。模型地盤材料は岐阜砂を用い、表層地盤は気乾状態、また基礎層は含水比 $w=8\%$ で湿潤状態にして使用した。模型地盤の作成では、後述するせん断土槽内において、基礎層については土槽底から厚さ0.2mで、相対密度 $D_r=0.925$ で締め固め、表層地盤については地盤厚さ0.2m毎に約300Gal程度で一定時間締め固めた。本実験では一連の実験ケースをすべて同じ模型地盤を用いて実施するため、実験の繰り返しにより模型地盤物性が各ケースで過度に変化することを避ける理由から、模型地盤を十分に締め固めた。そのため相似則により想定される地盤剛性よりも模型地盤の方が大きな値となっている。ケーソンく体模型には、中空円筒形に加工したアクリル板を用いた。アクリル材の単位体積密度は1.19t/m³である。このく体と同じくアクリル材で作成した円形の頂版と底板を螺子止めした。内部土に相当する模型重量は、擬似無質量状態を模擬するため考慮せず、ケーソン模型内部を中空状態とした。

これにより、基礎模型質量をその体積で除した平均単位体積密度は 0.057t/m^3 となり、基礎体のイナーシャルな影響は無視できると考えられる。これら模型を油圧サーボ型振動台(寸法 $1.8\text{m}\times 1.8\text{m}$, 最大変位 50mm , 最大速度 0.3m/s , 振動数範囲 $1\sim 120\text{Hz}$)の上で水平に加振した。このせん断土槽は 16 枚の軽量形鋼矩形枠をボールベアリングを介して重ねその内壁と外壁にゴム膜を貼ったものである。土槽の内方寸法は長さ 1.2m , 幅 0.8m , 深さ 0.96m であり、土槽単体の固有振動数は 1.6Hz である。

(2) 実験ケースおよび実験方法

本実験は、地盤のひずみ依存性が入力損失効果に与える影響についての基本特性を評価することを目的とするため、すべての入力を正弦波入力とした共振実験を実施した。図-1 に示すように、加速度計を振動台に 1 箇所(AC-SHAKE), 地盤内 3 箇所(上層から, AC-S1, AC-S2, AC-S3), 基礎天端に水平用 1 箇所(AC-FH), 回転加速度計測用に 2 箇所(AC-FVL, AC-FVR)を設置し計測を行った。加速度計には容量 5G のボックス型加速度計を用いた。本研究では入力損失効果の評価指標として、有効入力動係数を用いることにする。有効入力動係数とは、自由地盤の地表面加速度応答に対するフィルター関数として、入力損失効果を振動数領域で評価した係数であり、自由地盤の地震加速度波形のフーリエ振幅スペクトルにこの係数を乗じ、時間領域に変換した時刻歴波形は有効入力動、或いは有効地震動と呼ばれている。また根入れのある基礎は水平成分のみならず、回転成分のキネマティック応答が生じることからこれも同様に有効入力動と呼称し、それぞれ \ddot{u}_{CT} , $\ddot{\varphi}_{CT}$ とする。詳細については著者らによる論文⁹⁾に記載されているが、以下に有効入力動係数の定義式(水平方向: η_{eff} , 回転方向: φ_{eff})を示す。

$$\eta_{eff}(\omega) = \frac{|\ddot{u}_{CT}(H, \omega)|}{|\ddot{u}_s(H, \omega)|} \quad (1a)$$

$$\varphi_{eff}(\omega) = \frac{|\ddot{\varphi}_{CT}(\omega)H|}{|\ddot{u}_s(H, \omega)|} \quad (1b)$$

ここで、 \ddot{u}_s は表層地盤の絶対加速度応答振幅である。本研究では、原田ら¹⁵⁾による大型基礎の研究に代表されるように、基礎天端位置において有効入力動を定義することにする。

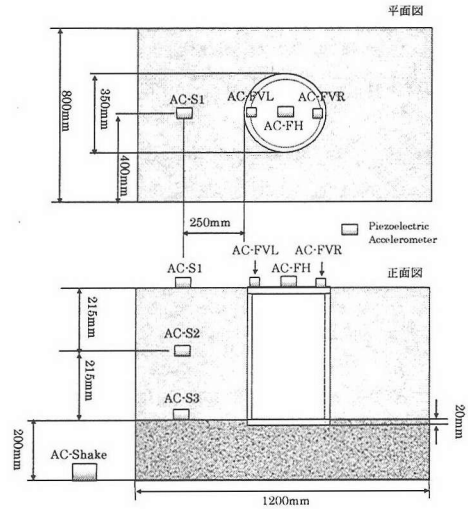


図-1 実験模型とセンサー配置

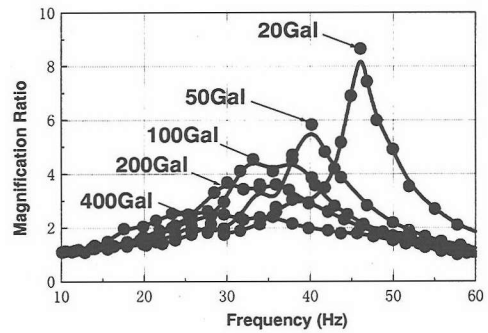
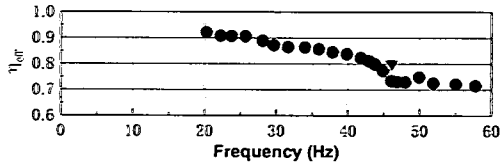


図-2 入力レベルの違いによる表層地盤の共振曲線の変化

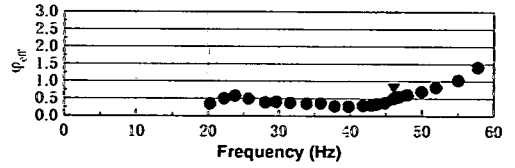
表-2 入力レベルの違いによる表層地盤に生じる平均ひずみと等価せん断弾性係数・等価減衰定数の一覧

入力加速度 (m/s^2)	0.20	0.50	1.00	2.00	4.00
1次卓越振動数 (Hz)	46.1	39.4	35.7	32.4	27.0
平均ひずみ γ	4.95×10^{-5}	1.22×10^{-4}	2.16×10^{-4}	4.51×10^{-4}	1.00×10^{-3}
等価せん断弾性係数 (kN/m^2)	8.65×10^3	6.32×10^3	5.19×10^3	4.27×10^3	2.97×10^3
等価減衰定数 $1/2M$	0.057	0.086	0.107	0.125	0.192

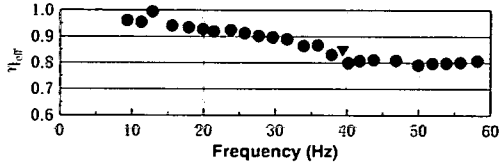
本実験では、まず地表面地震動(AC-S1)と有効入力動(水平方向: AC-FH, 回転方向: 鉛直振動成分を消去するため、左右の鉛直加速度計測値の差(AC-FVL-AC-FVR)を取り、これを $2a$ で除して回転加速度応答を求めた。ただし a は基礎半径)を加振振動数毎の共



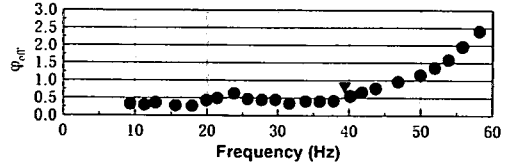
(a)



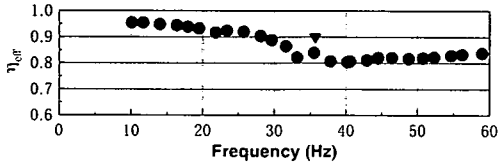
(a)



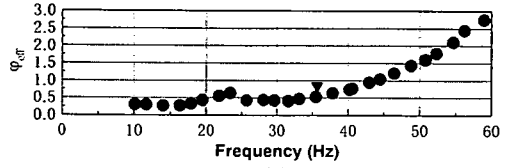
(b)



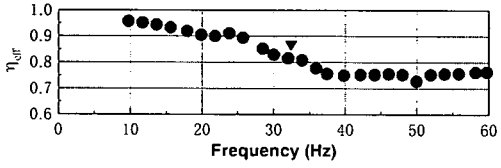
(b)



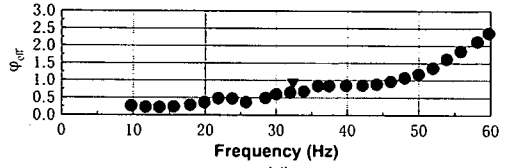
(c)



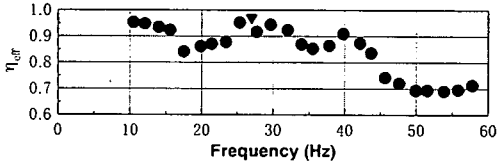
(c)



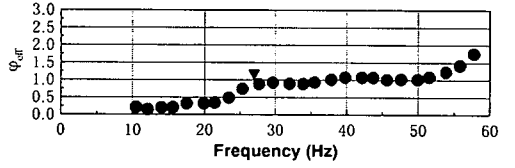
(d)



(d)



(e)



(e)

図-3 入力レベルの違いによる有効入力動係数の模型振動実験結果

(a:20Gal, b:50Gal, c:100Gal, d:200Gal, e:400Gal, ▼: 表層地盤の卓越振動数)

振実験から記録し、記録波形に加振振動数を中心としたバンドパスフィルター ($0.95 \leq f/f_0 \leq 1.05$: f_0 は加振振動数) をかけた後、その最大振幅を電算機により算出して、基盤入力(AC-SHAKE)に対する共振曲線を作成した。次に、有効入力動に関する共振曲線と、地表面地震動に関する共振曲線の比を算定した。これは上述した定義式(1a)(1b)に相当し有効入力動係数となる。本実験では、1つの共振曲線を作成する際に、基盤入力の加速度振幅を常に一定とする。そして本実験の主題である地盤材料に生じるひずみレベルの違いを表現するため、入力レベルを20、50、100、200そして400Galと変化させた計5ケー

スの共振実験を実施し、それぞれの有効入力動係数を算定した。

(3) 実験結果

図-2に、入力加振レベル毎の表層地盤の基盤入力に対する共振曲線を示す。また表-2に共振曲線と位相特性から求めた表層地盤の1次卓越振動数と、基盤層上面から地表面までの表層厚さ H で、その間に生じる相対変位の最大振幅を除した平均ひずみ γ を示す。また卓越振動数から1/4波長則を用いて求めた表層地盤の等価せん断弾性係数 μ_e 、卓越振動数での応答倍率 M を用いて1/2Mにより評価した等価

減衰定数 h_e を同時に示す。表-2 によれば、入力加振レベルが大きくなるに従い、卓越振動数が徐々に低下し、表層地盤に生じる平均ひずみ γ は、20Gal 入力のケースで 10^{-5} 程度の微小ひずみであったものが、400Gal のケースでは 10^{-3} 程度まで増幅していることがわかる。このひずみ振幅の増加に伴い、等価せん断弾性係数 μ_e は、初期の等価せん断弾性係数 (20Gal 入力) に対し、400Gal のケースでは 0.34 倍まで低下し、また等価減衰定数 h_e については、初期値 (0.057) に対して 400Gal のケースでは 3.4 倍まで増加した。これら表層地盤の剛性低下と減衰増加は、明らかにひずみ依存性の特性である。したがって本実験では、このひずみ振幅の範囲 (10^{-5} から 10^{-3} 程度) において、ひずみ依存性が入力損失効果に与える影響について評価するものと位置付けられる。

図-3 に入力レベル毎の有効入力動係数を示す。20Gal のケースでは S/N 比が非常に小さく、20Hz よりも低い振動数での計測データに信憑性が欠けると判断し、本ケースのみ 20Hz からのデータを示している。他のケースについては、同様の理由により 10Hz からのデータを示している。図-3(a)によれば、地盤の微小ひずみレベル (20Gal 入力) における有効入力動係数 η_{eff} は、表層地盤の卓越振動数よりも低い振動数領域 (20Hz~40Hz) で、表層地盤と有効入力動の加速度振幅差が 0~15% 程度であることを示している。また、加振振動数の増加に伴いその振幅差が大きくなる傾向が見られる。そして、卓越振動数近傍 (40Hz~46.1Hz) で、有効入力動係数 η_{eff} の低下率が増加するが、卓越振動数以上の高振動数領域では、有効入力動係数 η_{eff} の低下傾向が弱まり、フラットもしくは若干増加する箇所が見られる。有効入力動係数 η_{eff} は、概して増加傾向にあり (図-3(b))、卓越振動数以上の振動数領域でその増加率が上がる傾向が見られる。

一方、入力レベルを上げてひずみ依存性による影響を観察してみると、20Gal 入力から 100Gal 入力のケースまでは、入力レベルが増加し、表層地盤のひずみ振幅が増加することにより、各卓越振動数近傍から高振動数領域に至るまで、有効入力動係数 η_{eff} は増加する傾向にある。また、卓越振動数から離れた 30Hz 以下の低振動数領域においては、入力レベルの違いによる大きな差異は認められない。基礎入力が 200Gal になると、全振動数領域に亘り、これまでの増加傾向から減少傾向に変化していることがわかる。また、最大入力振幅の 400Gal 入力のケースでは、有効入力動係数 η_{eff} は概して増加傾向に変化している。ただし、15Hz から 25Hz までの低振動数領

域に、局所的な有効入力動係数 η_{eff} の減少が現れている。同時に、45Hz 以上の高振動数領域においては、有効入力動係数 η_{eff} が減少する傾向にある。一方で有効入力動係数 η_{eff} は、20Gal 入力から 100Gal 入力のケースにおいて、ひずみ振幅が増加することで、卓越振動数近傍からそれ以上の高次振動数領域で増加傾向が現れている。また、卓越振動数から離れた 30Hz 以下の低振動数領域においては、入力レベルの違いによる大きな差異は認められない。この特性は、上述した有効入力動係数 η_{eff} の特性と一致する。また、200Gal 入力と 400Gal 入力のケースでは、卓越振動数から離れた低振動数領域 (25Hz 以下) において、入力レベルの違いによる影響は現れず、卓越振動数近傍で増加する傾向が生じている。この特性は、上述した 20Gal 入力から 100Gal 入力のケースと一致している。しかし、45Hz 以上の振動数領域では、入力レベルの増加に伴い、有効入力動係数 η_{eff} が大きく低下していることが確認できる。

前述した田中らの研究¹⁰⁾によれば、ひずみ振幅の増加に伴いせん断波速度が小さくなることで、同じ振動数に対する地動の波長が見かけ上小さくなり、基礎周辺の地動の振幅差、位相ずれが相対的に大きくなることから、入力損失効果は増加すると考察している。実際、表-2 に示すように、ひずみ振幅の増加に伴い、表層地盤のせん断弾性係数が低下したことは、本実験においても確認している。しかし、上記の直接計測による本実験結果からは、同じ振動数に着目した場合に、入力レベルの違い (表層地盤に生じるひずみ振幅の違い) によって、入力損失効果が減少する可能性があることが判明した。

そこで次節では、著者らにより誘導した理論解⁹⁾に基づき、上述した特性について検討を行い、その物理的解釈を試みた。

3. 地盤のひずみ依存性が有効入力動係数に与える影響に関する理論的検討

本検討では、3次元弾性波動論に基づき誘導した有効入力動係数に関する理論解を用いて検討を行う。理論解の誘導については、著者等による論文⁹⁾にその詳細が述べられているので参照されたい。以下では、まず本検討で用いる有効入力動係数の理論解を概説し、その後、上述した検討内容とその結果について報告する。

(1) 大型基礎の有効入力動係数の理論解

本検討で用いる理論解析モデルを図-4に示す。この理論解析モデルは、以下の条件を仮定している。

- 表層地盤は弾性・均質であり剛な基盤層に支持されている。地盤材料の減衰特性は振動数に依存しない非粘性型 Voigt モデル¹⁶⁾とする。
- 入力はSH波の調和振動入力とし、鉛直振動については言及しないものとする。
- 基礎とその周辺地盤は水平加振時も完全密着条件を満足する。
- 基礎のロッキング運動は、基礎底面を中心に回転するものとする。
- 基礎底面のロッキング応答に対する復元力特性は、基盤層への逸散減衰効果を考慮した複素剛性¹⁷⁾を用いる。
- 基礎側壁に作用する鉛直応力と、それに付随する鉛直変位は、Nogami and Novak¹⁶⁾, Takemiya and Yamada¹⁸⁾と同様に、水平動と独立して求めるものとする。
- 基礎のロッキング運動に加えて、基礎側壁の曲げ柔性による応答を考慮する。

これらの条件を満足するように理論を展開した結果、有効入力動係数の理論解(水平方向： η_{eff} 、回転方向： φ_{eff})は最終的に、前述した式(1a)(1b)で表される。本理論解から誘導された式(1a)(1b)に関する解説を付録Aに記したので参照されたい。

(2) ひずみ依存性が有効入力動係数に与える影響

本検討では、表層地盤を一つのせん断体と仮定し、前述した平均ひずみ γ と地盤の非線形モデルによる等価な剛性と減衰の値を用いて、有効入力動係数を算定する。本検討のように、表層地盤を室内試験の供試体から得られる非線形特性で置換することの妥当性については、Mohammad and Kawakami¹⁹⁾による現地観測による表層地盤の履歴特性と、室内土質試験との整合性に関する研究により検証されている。一般に土材料のひずみ依存性は、Ramberg-Osgoodモデルで評価することが可能であり²⁰⁾、この平均ひずみ γ とせん断弾性係数 μ 、減衰定数 h の値には次の関係式が得られる。

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{1}{1 + \alpha(\tau/\tau_y)^{\beta-1}} \quad (2a)$$

$$h = (h_{\max} - h_{\min}) \left(1 - \frac{\mu}{\mu_0}\right) + h_{\min} \quad (2b)$$

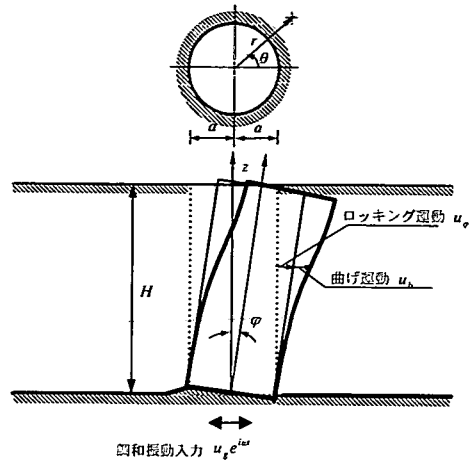


図-4 大型基礎の理論解析モデル(再掲⁹⁾)

ここで、

$$h_{\max} - h_{\min} = \frac{2}{\pi} \frac{\beta - 1}{\beta + 1} \quad (3)$$

μ_0 は初期のせん断弾性係数である。また h_{\max} と h_{\min} は各々、最大・最小減衰定数であり、初期内部減衰を下限值に設定した。 τ_y は降伏せん断耐力に相当し、本解析ではモデルパラメータを簡易的に定めるため、初期せん断弾性係数 μ_0 と基準ひずみ γ_r の積と仮定する。基準ひずみ γ_r は、 $\mu/\mu_0 = 0.5$ となる γ である。これにより、 α は $\alpha = 2^{\beta-1}$ で与えられる²¹⁾。本解析で使用した地盤と構造諸元は、地盤の密度 $\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu = 0.45$ 、初期せん断弾性波速度 $V_s = 150 \text{ m/s}$ 、最大・最小減衰定数は $h_{\max} = 0.35$ と $h_{\min} = 0.02$ 、基礎長 $H = 17 \text{ m}$ 、基礎半径 $a = 5.5 \text{ m}$ 、基礎のヤング率 $E = 2.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ であり、前述の実験模型の実寸法を用いることにした。基準ひずみ γ_r は $\gamma_r = 0.05\%$ と仮定した。平均ひずみ γ の変化に伴う、有効入力動係数の振動数特性の変化を観察するため、一方の軸を振動数とし、他方の軸を平均ひずみ(対数表記で $\log \gamma$)で表したものを図-5に示す。また図-5には、ひずみ振幅に依存する剛性と減衰が、有効入力動係数に与える各々の影響を評価するため、減衰を最小減衰定数 h_{\min} で固定し、剛性のみを平均ひずみ γ に合わせて変化させたケース(図-5(a), (d))と、剛性を初期せん断弾性係数 μ_0 で固定し、減衰のみを平均ひずみ γ に合わせて変化させたケース(図-5(b), (e))を同時に示す。

まず、減衰を最小減衰定数 h_{\min} で固定し、剛性のみを平均ひずみ γ に合わせて変化させたケース

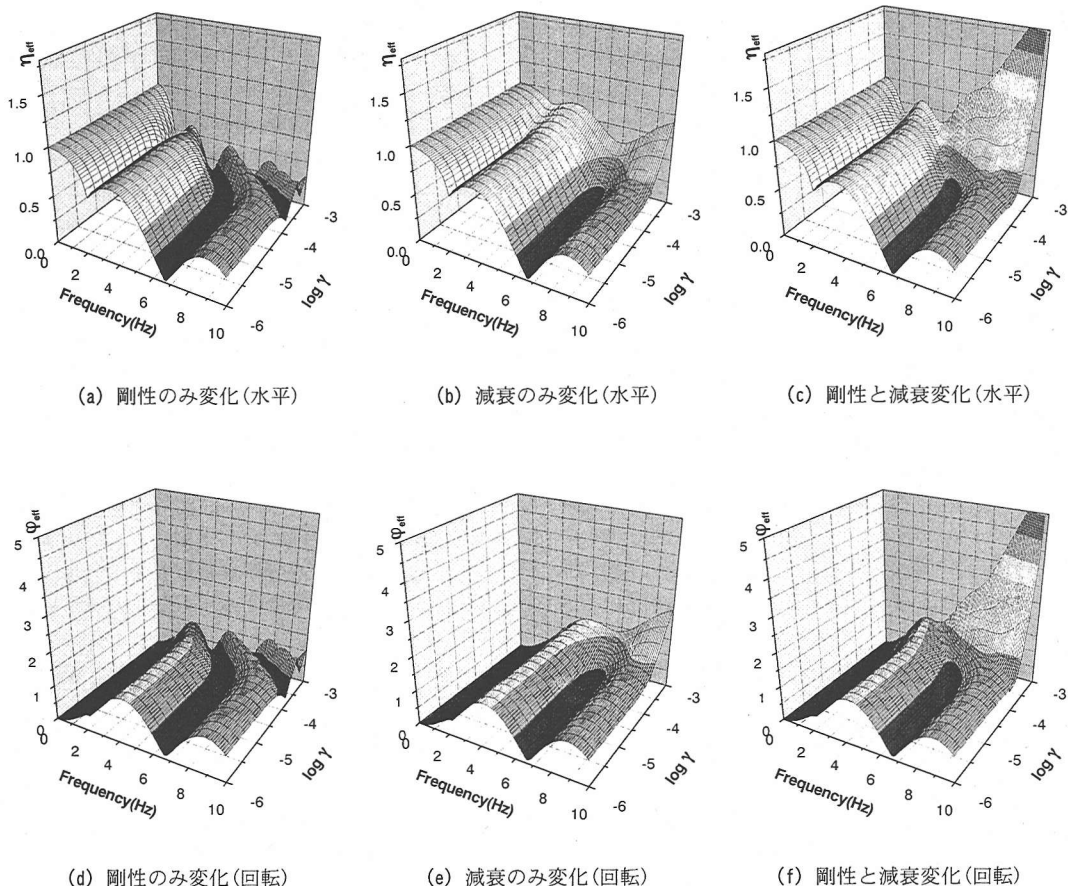


図-5 理論解に基づく地盤のひずみ依存性を考慮した有効入力動係数の変化特性

(図-5(a), (d))に着目してみる。著者数名による既往の研究⁹⁾では、地盤の剛性が低下すると、基礎側壁への作用土圧が減少し、基礎の基盤に対するキネマティック応答が零に収束することを明らかにした。それに伴い有効入力動係数は、回転方向で零、水平方向では自由地盤の基盤入力動に対する応答倍率の逆数に収束することになる。本解析で用いた微小ひずみでの減衰定数 h_{min} は0.02であり、この特性に従えば、表層地盤の1次卓越振動数では、基盤に対する地表面の応答倍率がおおよそ25倍となる。したがって、表層地盤の剛性が著しく低下した場合、水平方向の有効入力動係数 η_{eff} は、表層地盤の1次卓越振動数でおおよそ0.04(1/25)まで減少することになる。図-5(a)を観察すると、平均ひずみ γ がおおよそ 10^{-4} を超過したあたりから、凹ピーク値が徐々に減少する過程が確認できる。同様に、図-5(d)に示す回転方向

の有効入力動係数 ϕ_{eff} についても、地盤剛性の低下に伴い平均ひずみ γ がおおよそ 10^{-4} から減少する傾向が見られる。つまり、各卓越振動数に着目すると、ひずみ振幅の増加により、入力損失効果は増加することになる。しかし、図-5(a)(d)に示すように、剛性低下に伴い表層地盤の固有振動数が低下するため、各卓越モードに現れる凹ピーク値が、ひずみ振幅の増加に伴い低振動数側に移行することになる。そのため、同じ振動数に着目して有効入力動係数の変化特性を観察した場合、ひずみ振幅の増加に伴い入力損失効果が見かけ上増減することになる。この特性は、前節の模型振動実験により把握した特性に関する要因の一つと考えることができる。

一方で、図-5(b)(e)によれば、平均ひずみ γ がおおよそ 10^{-4} 以上になると、減衰の増加により水平と回転方向の有効入力動係数が増加することがわかる。

特に高振動数領域においてその増加傾向が顕著である。概してこの傾向は、ひずみ依存性による剛性低下が入力損失効果を増加させる前述の特性とは、相反するものと考えられる。この特性は、理論解に基づいて以下のように説明することができる。表層地盤の絶対系加速度応答 \ddot{u}_g は、付録 A を参照すれば次式で与えられる。

$$\ddot{u}_g(H, \omega) = -\omega^2 \left[\sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \frac{1}{\xi_n^2} \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2 + 1 \right] u_g e^{i\omega t} \quad (4)$$

式(4)の右辺第1項は基盤層からの表層地盤の相対加速度を表し、右辺第2項は基盤加速度を表している。また、右辺第1項を $-\omega^2$ で除した値は各モード変位の線形重ね合わせとなる。一般に、各モード変位は対応する卓越振動数で最大値を有し、卓越振動数以降は、入力に対する位相角が π (rad) だけ変化する。そのため、各モードを重ね合わせた表層地盤の変位応答は、振動数に対する以下の収束特性を有することになる。

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} u_g(H, \omega) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \frac{1}{\xi_n^2} \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2 u_g e^{i\omega t} = -u_g e^{i\omega t} \quad (5)$$

これにより以下の収束特性が表層地盤の加速度応答に現れる。

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \ddot{u}_g(H, \omega) = 0 \quad (6)$$

表層地盤の減衰が増加すると式(4)の ξ_n が増加し、各モード変位の振幅は小さくなる。これに伴い、各モードの卓越振動数位置での応答振幅のみならず、他のモードが卓越する振動数領域に寄与する振幅も減少することになる。これにより高次モードの応答が、見かけ上著しく低下する結果となり、式(6)の特性が比較的低い振動数領域から現れやすくなる。一方、表層地盤の変位振幅が減衰増加に伴い減少することから、基礎構造物の基盤層に対するキネマティック応答は、同時に低下することになる。しかし有限な減衰定数の範囲であれば、振動数が高くなるに従って、表層地盤は上述した逆位相の応答変位に収束し、これにより基礎のキネマティック応答は0でない有限な値に収束することになる。したがって、上記の応答特性と有効入力動係数を表す式(1a)(1b)

から、振動数の増加により分母が零へ収束すること、分子が有限の一定値に収束すること、そしてそれらの収束特性が減衰の増加により低振動数領域においても現れやすくなることにより、表層地盤の減衰増加が有効入力動係数を増加させる、つまり入力損失効果を減少させると考えることができる。

こうしたひずみ依存性による剛性と減衰の相反する入力損失効果への作用は、実際には同時に生じることになる。図-5(c)(f)によれば、平均ひずみ γ が大きくなると、a)剛性低下に伴う有効入力動係数の減少と、b)減衰増加に伴う増加が同時に生じ、さらに c)剛性低下によるピーク位置の低振動数への移行が生じている。そのため、例えば水平方向の有効入力動係数 η_{eff} について初期地盤の1次卓越振動数近傍の2.0Hzに着目してみると、ひずみ振幅が 10^{-6} で0.75であったものが、ひずみ振幅 10^{-4} で0.65、また振幅 10^{-3} で0.76と、ひずみ振幅の増加に伴い有効入力動係数が増減していることがわかる。つまり、上述した剛性と減衰の相反する入力損失効果への作用は、一様に相殺されることはなく、ひずみ振幅の違いにより増減することになる。また、同図から明らかのように、着目する振動数によって上述した特性は異なる。つまりこの相反作用が、前節の模型振動実験により把握した特性の要因と考えることができる。

以上の考察から、ひずみ依存性に伴う上述した a) から c) の3つの特性が入力損失効果の特性を支配し、模型振動実験から得られた特性を説明し得ることが明らかとなった。ただし、この a) から c) の3つの特性のみが、模型振動実験で観測された入力損失効果を支配しているということではない。つまり、本研究では、基礎側壁と表層地盤の動的相互作用に主眼を置いた検討を実施したが、他の要因も十分に考えられる。例えば、入力レベルの違いによる基礎底面の復元力特性の変化がある(羽矢・西村²²⁾)。これは、基礎底面に接する基盤層で浮き上がりや塑性化が生じ、基礎底面の回転拘束効果が減少することで基礎のキネマティック応答が増幅し、入力損失効果が減少するといった現象である。本実験においては、基礎底面の回転拘束効果が減少すると予想される200Galのケースにおいて、入力損失効果が全振動数領域に亘り増加する傾向が現れている。そのため、基礎底面の復元力特性の変化が、本実験で生じた現象の主要因ではないと推察される。しかし、こうした他の要因については、諸元の違いにより、入力損失効果に大きな影響を及ぼす可能性があることから、今後、更なる検討が必要と思われる。

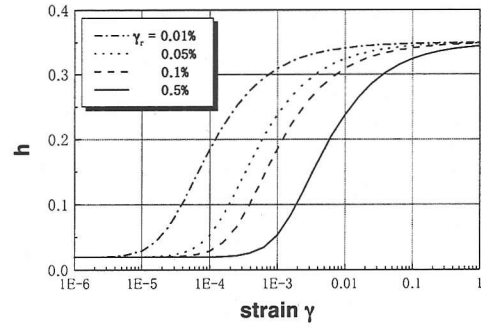
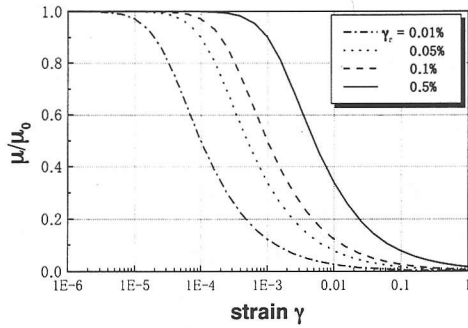


図-6 基準ひずみ γ_r をパラメータとしたひずみ振幅と剛性・減衰特性の違い

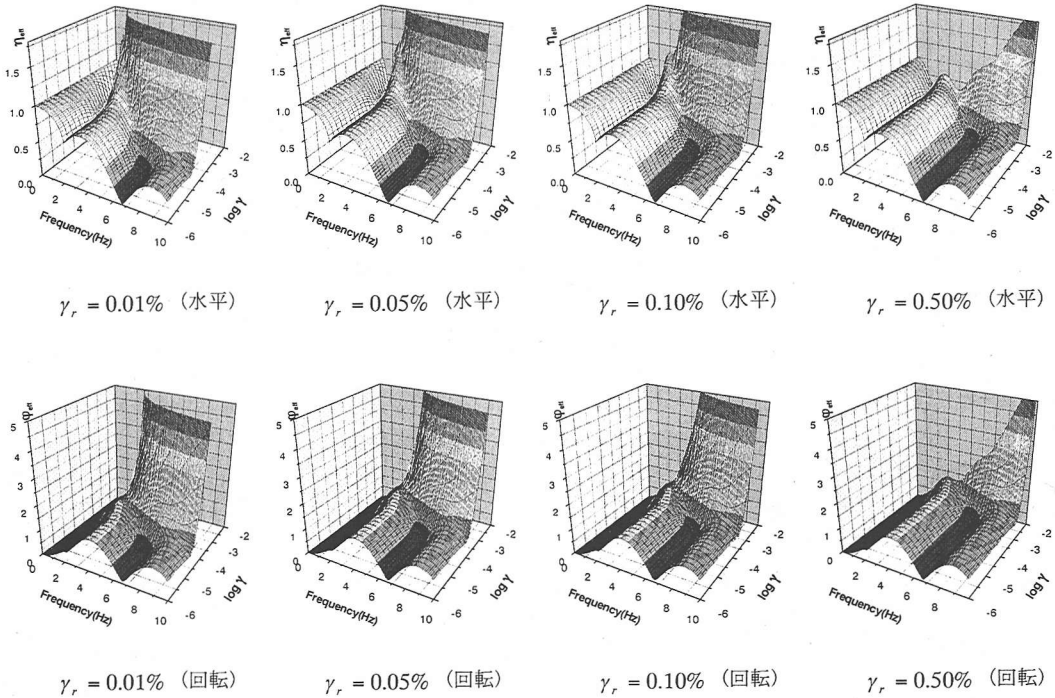


図-7 ひずみ振幅と剛性・減衰特性の違いが有効入力動係数に与える影響 (基準ひずみ γ_r を変化)

(3) ひずみ依存性による剛性と減衰の変化特性が有効入力動係数に与える影響

上述した3つの特性は、ひずみ依存性の基本特性(ここでは、ひずみ振幅の増加が剛性低下と減衰増加を生じさせることを意味する)が変わらない限り成り立つことは明らかである。しかし、ひずみ振幅と剛性・減衰曲線の変化特性は、表層地盤を構成す

る土の種類や拘束圧等の諸条件により異なることが知られている。そこで、こうした変化特性の違いが、入力損失効果に如何なる影響を与えるのかを把握しておく必要がある。既往の研究では、こうした検討を実施していないことから、本研究では以下の2つの基本的な変化特性に重点を置いて検討することにする。まず第1に、基準ひずみ γ_r の違いによる有効

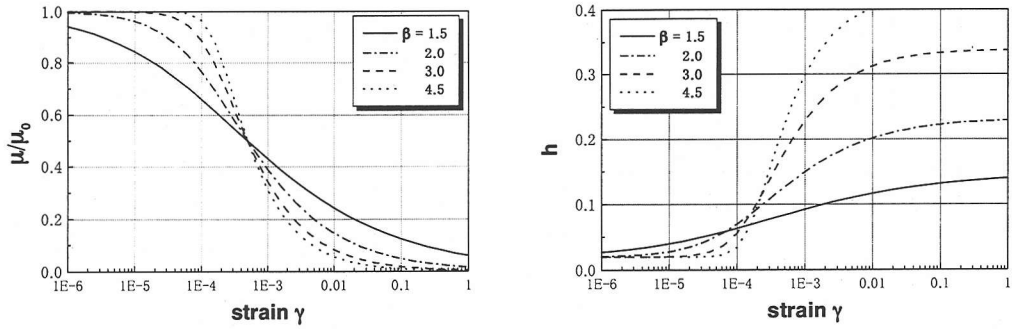


図-8 Ramberg-Osgood モデルの β をパラメータとしたひずみ振幅と剛性・減衰特性の違い

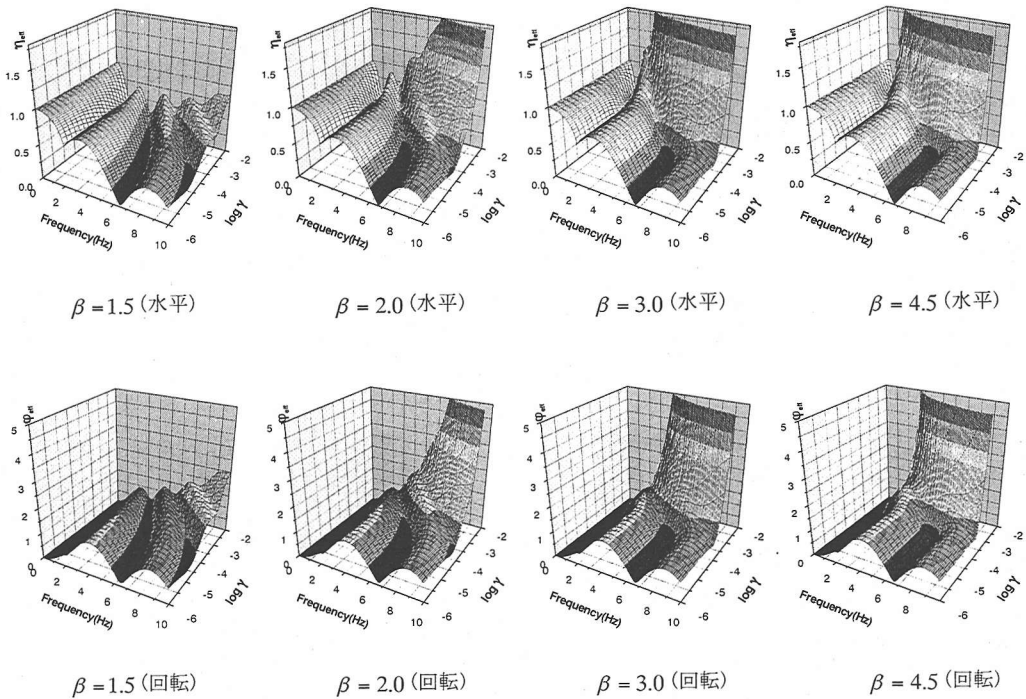


図-9 ひずみ振幅と剛性・減衰特性の違いが有効入力動係数に与える影響 (パラメータ β を変化)

入力動係数の変化特性を検討する。基準ひずみ γ_r の違いは、本モデルにおいて土の応力-ひずみ関係における骨格曲線上の降伏耐力の違いを意味し、基準ひずみ γ_r が大きいほど降伏耐力は大きくなる。ここでは、基準ひずみを $\gamma_r = 0.01\%$ 、 0.05% 、 0.10% 、 0.50% の4つのケースについて解析する。図-6 に各々の $\mu/\mu_0 - \gamma$ 曲線、 $\mu/\mu_0 - \gamma$ 曲線を示す。また図-7 にそのときの有効入力動係数を示す。図-7 によれば、基準ひずみ γ_r が小さく降伏耐力が小さいと想定

した場合 ($\gamma_r = 0.01\%$)、剛性低下と減衰増加が相対的に小さいひずみレベルから生じることから、前節で述べた入力損失効果に関する3つの特性が小さいひずみレベルから顕著に現れる。一方、基準ひずみ γ_r が大きい場合 ($\gamma_r = 0.50\%$)、耐力増加により、相対的に大きなひずみが生じなければ、基準ひずみ γ_r が小さい場合と同程度の入力損失効果は現れない。つまり、表層地盤に生じるひずみレベルが同じでも、地盤の降伏耐力が異なれば、地盤のひずみ依

存性が入力損失効果に与える影響に差が生じることがわかる。ただしこのひずみ依存性モデルでは、降伏点の違いはひずみ振幅に対する剛性と減衰の変化形状そのものに違いを生じさせない。したがって図-6から容易に推測できるように、有効入力動係数は基準ひずみ γ 、でひずみ軸を無次元化すれば、有効入力動係数は全てのケースで一致することになる。

第2に、基準ひずみ γ を固定し、Ramberg-Osgoodモデルの β をパラメータに、 $\mu/\mu_0-\gamma$ 曲線、 $\mu/\mu_0-\gamma$ 曲線を変化させたものを図-8に示す。パラメータ β の違いは、土の応力-ひずみ関係の曲率の違いを意味し、 β が大きいほど剛性と減衰の変化が大きくなり（曲率が大きくなり）、 β を無限大とすれば、バイリニア型の応力-ひずみ関係となる。これらの特性を用いた有効入力動係数の解析結果を図-9に示す。図-8によれば、パラメータ β が大きくなるに従い、基準ひずみ近傍において剛性と減衰の変化が著しくなる。図-9によれば、パラメータ β の値が小さい場合には、ひずみ振幅の増加に対する剛性変化が緩やかなため、凹凸ピーク値が低振動数側に緩いカーブを描いて変化している。反対にパラメータ β の値が大きい場合には、剛性が基準ひずみ γ 近傍で急に变化するため、凹凸ピーク値が基準ひずみ γ を境に低振動数側へ急激に変化している。つまり前節で把握した入力損失効果に関するc)の特性は、パラメータ β の違い、換言すれば土の応力-ひずみ関係の曲率の違いに影響を受けると考えられる。同時に、本モデルにおいては応力-ひずみ曲線の曲率が大きくなると、減衰の上限値が増加することになる。よってパラメータ β が大きくなると、前述した特性b)の減衰増加による入力損失効果の減少が顕著に現れることになる。このとき、特性a)の剛性低下による入力損失効果の増加よりも、特性b)の減衰増加による入力損失効果の減少が卓越し、特に高振動数領域において有効入力動係数の増幅が水平・回転の2方向で同時に現れている。このように、基準ひずみ γ が同じでも、応力-ひずみ曲線の曲率の違いにより、入力損失効果が大きく異なることが判明した。

以上の検討から、入力損失効果がひずみ振幅と剛性・減衰曲線の変化特性に大きく影響を受けることが明らかとなった。そのため、実構造物の耐震設計では、基準ひずみ γ 、や土の応力-ひずみ関係の曲率の実際との乖離が、入力損失効果を実際よりも過大に評価する危険性が予想される。こうした危険性を回避するためには、現地の表層地盤について、物理試験や変形試験等を実施し、ひずみ振幅と剛性・減衰曲線の変化特性を、精度良く把握することが望まし

いと考える。

4. 結論

上記所論を要約すると以下ようになる。

(1) 模型振動実験による有効入力動の直接計測結果によれば、基盤入力加速度の増加に伴い表層地盤のひずみ振幅が増加した場合、同一振動数成分に着目すると、振動数によっては入力損失効果が減少する場合があることを観測した。これは既往の研究による知見に反する現象である。

(2) 3次元弾性波動論に基づく有効入力動係数の理論解を用いた検討によれば、ひずみ振幅の増加に伴う表層地盤の剛性低下は、入力損失効果を増加させる。なぜなら、剛性低下が生じると、基礎側壁への作用土圧が減少し、最終的に基盤に対する基礎のキネマティック応答が零に収束するためである。

(3) 剛性低下に伴い表層地盤の固有振動数が低下するため、各卓越モードに現れる有効入力動係数のピーク値が、ひずみ振幅の増加に伴い低振動数側に移行する。これにより、各ひずみレベルで卓越振動数近傍に着目した場合には、ひずみ振幅により入力損失効果が増加するが、同一振動数成分に着目した場合には、入力損失効果が見かけ上増減することになる。

(4) ひずみ振幅の増加に伴う表層地盤の減衰増加は、入力損失効果を減少させる。なぜなら、表層地盤の各モード変位は、その卓越振動数以降に基盤入力と逆位相同振幅の応答に収束するため、表層地盤の絶対加速度応答は零に収束する。そして表層地盤の減衰の増加が、表層地盤の応答倍率を減少させることで、その収束特性が低振動数領域においても現れやすくなる。表層地盤の絶対応答加速度は有効入力動係数の定義式の分母に相当することから、減衰増加により分母が零に近づくことで有効入力動係数は増加する、つまり入力損失効果が減少する結果となる。

(5) 表層地盤に生じるひずみ振幅が同じでも、地盤の降伏耐力が異なれば、地盤のひずみ依存性が入力損失効果に与える影響に差が生じる。つまり、降伏耐力が小さい場合、剛性低下と減衰増加が相対的に小さいひずみレベルから生じることから、本結論の(2)から(4)の入力損失効果に関する3つの特性が、小さいひずみレベルから顕著に現れる。反対に降伏耐力が大きい場合には、相対的に大きなひずみが生じなければ、降伏耐力が小さい場合と同程

度の入力損失効果は現れない。ただし、本結論および以下に示す(6)の結論は、本検討で用いた非線形モデルとそのパラメータ近似を前提とした結論であることを明記する。

(6) 表層地盤の降伏耐力が同じでも、応力-ひずみ曲線の曲率の違いにより、入力損失効果が大きく異なることが判明した。特に曲率が大きくなると減衰の上限値が増大することから、本結論の(4)に示す特性が顕著に現れるようになり、入力損失効果が減少する傾向になる。

(7) 以上により表層地盤のひずみ依存性が大型基礎の入力損失効果に与える影響の基本的特性が明らかにされたと考えられるが、基礎側壁や底面近傍の局所非線形性や境界部の滑りや剥離等の影響については未解明な点が残されたままであり、今後の課題とする。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、(株)ジェイアール総研エンジニアリングの西村昭彦氏、(財)鉄道総合技術研究所の室野剛隆氏から貴重なご意見を頂いた。また中央復建コンサルタンツ(株)の畠中 仁氏には模型実験に際して貴重なアドバイスとご協力を頂いた。ここに深謝の意を表する。

付録A 大型基礎の有効入力動係数の理論解について(再掲⁹⁾)

式(1a)(1b)で示される有効入力動係数の理論解について、その詳細を以下に示す。まず、各式の分子は水平と回転の有効入力動の最大振幅であり、次式で与えられる。

$$\ddot{u}_{CT}(H, \omega) = -\omega^2(u_f + u_g) \quad (A-1)$$

$$\ddot{\varphi}_{CT}(\omega) = -\omega^2\varphi \quad (A-2)$$

ここで、 ω は角振動数、 u_g は地動入力振幅、 u_f は無質量基礎の基盤に対するキネマティックな水平変位応答、 φ は無質量基礎のキネマティックな回転変位応答であり、次式で表される。

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 e^{i\omega t} \\ &= \frac{16a^2 \rho H^2}{\pi^2} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{n^4}{n^4 + \alpha_2 \Omega_n \xi_n^2} \frac{(-1)^{(n-1)/2}}{n^3} \Omega_n \\ &= \frac{K_R + \frac{32a^2 \rho H^2}{\pi^3} \omega_g^2 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{n^4}{n^4 + \alpha_2 \Omega_n \xi_n^2} \xi_n^2 \frac{\Omega_n}{n^4} + \frac{\Psi_n}{n^2} \right)}{K_R + \frac{32a^2 \rho H^2}{\pi^3} \omega_g^2 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{n^4}{n^4 + \alpha_2 \Omega_n \xi_n^2} \xi_n^2 \frac{\Omega_n}{n^4} + \frac{\Psi_n}{n^2} \right)} u_g e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (A-3)$$

$$\begin{aligned} u_f &= \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\alpha_2 \Omega_n}{n^4 + \alpha_2 \Omega_n \xi_n^2} \frac{4u_g}{n\pi} \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2 \sin \frac{n\pi}{2H} z e^{i\omega t} \\ &+ \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{n^4}{n^4 + \alpha_2 \Omega_n \xi_n^2} \frac{8H}{\pi^2} \frac{(-1)^{(n-1)/2}}{n^2} \varphi_0 \sin \frac{n\pi}{2H} z e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (A-4)$$

ここで、

$$\alpha_2 = \frac{\rho \pi a^2}{EI} \left(\frac{2H}{\pi} \right)^4 \omega_g^2$$

$$\Omega_n = \frac{K_1(x_n) + K_1(y_n) \frac{2K_1(x_n) + x_n K_0(x_n)}{2K_1(y_n) + y_n K_0(y_n)}}{x_n K_0(x_n) + K_1(x_n) - K_1(y_n) \frac{2K_1(x_n) + x_n K_0(x_n)}{2K_1(y_n) + y_n K_0(y_n)}}$$

$$\Psi_n = \frac{K_1(y_n) + y_n K_0(y_n)}{K_1(y_n)}$$

ただし、

$$x_n = \frac{\omega_g \xi_n a}{\sqrt{1 + i2h} V_p}, \quad y_n = \frac{\omega_g \xi_n a}{\sqrt{1 + i2h} V_s}$$

$$\xi_n = \sqrt{n^2(1 + i2h) - \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2}$$

ρ と ω_g は表層地盤の密度と非減衰固有角振動数、 V_p と V_s は表層地盤のP波速度とS波速度、 K_m は第2種変形 m 次ベッセル関数、 a と EI は基礎の断面半径と側壁の曲げ剛性である。

また、式(1a)(1b)の分母は自由地盤の絶対加速度応答であり、次式で表される。

$$\ddot{u}_g(H, \omega) = -\omega^2 \left[\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \frac{1}{\xi_n^2} \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2 + 1 \right] u_g e^{i\omega t} \quad (A-5)$$

参考文献

- 1) 星谷 勝, 石井 清: RC 階校舎の実測資料による地震波の入力損失の効果の検討, 土木学会論文報告集, No. 327, pp13-20, 1982.
- 2) 山原 浩: 地震時の地動と地震波の入力損失(第1報),

- 日本建築学会論文報告集, No. 165, pp. 61-66, 1969.
- 3) 山原 浩:地震時の地動と地震波の入力損失(第2報), 日本建築学会論文報告集, No.167, pp.25-30, 1970.
 - 4) 岩崎敏男, 川島一彦, 高木義和:強震記録を用いた道路橋井筒ケーソン橋脚の地震応答解析, 土木学会論文報告集, No. 293, pp.35-47, 1980.
 - 5) 石井 清, 山原 浩:大型地下タンクの実測記録による地震波の入力損失の検討, 日本建築学会論文報告集, No. 312, pp.54-62, 1982.
 - 6) 石井 清, 小山和夫:地下タンクの常時微動観測による入力損失効果の検討, 土木学会論文報告集, No. 339, pp.51-57, 1983.
 - 7) 原田隆典, 久保慶三郎, 片山恒雄:有効地震動の計算式とその実測例による検討, 土木学会論文集, No. 362/1-4, pp. 435-440, 1985.
 - 8) 大平 彰, 田蔵 隆, 中桧 新, 清水勝美:軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 362, pp.417-426, 1985.
 - 9) 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, pp.317-329, 2003.
 - 10) 田中宏志, 吉田 一, 山原 浩, 平島新一, 石井 清:FEMを用いたパラメータスタディによる入力損失効果の定量的評価, 第6回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1585-1591, 1982.
 - 11) 安井 譲, 井口道雄, 赤木久真, 林 康裕, 中村 充:1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, No. 512, pp.111-118, 1998.
 - 12) 齊藤正人, 池亀真樹, 棚村史郎, 渡邊啓行:地盤の非線形性を考慮した有効入力動に関する模型振動実験とそのシミュレーション, 第45回地盤工学シンポジウム論文集, pp.125-130, 2000.
 - 13) 香川崇章:土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, 第275号, pp.69-77, 1978.
 - 14) 国生剛治, 岩橋敏広:軟弱地盤の非線形震動特性についての模型振動実験と解析, 土木学会論文報告集, 第285号, pp.57-67, 1979.
 - 15) 原田隆典, 山下典彦, 坂梨和彦:地盤との動的相互作用を考慮した道路橋橋脚の周期と減衰定数に関する理論的研究, 土木学会論文集, No. 489/1-27, pp.227-234, 1994.
 - 16) Novak, M. and Nogami, T.: Soil-pile interaction in horizontal vibration, *Int. J. Earthquake Engrg. and Structural Dynamics*, Vol.5, pp.263-281, 1977.
 - 17) Veletsos, A. S. and Wei, Y. T.: Lateral and rocking vibration of footings, *Proc. ASCE*, No.97, SM9, pp.1227-1248, 1971.
 - 18) Takemiya, H. and Yamada, Y.: Layered soil-pile-structure dynamic interaction, *Int. J. Earthquake Engrg. and Structural Dynamics*, Vol.9, pp.437-457.
 - 19) Mohammad, G. H. and Kawakami, H.: On-site nonlinear hysteresis curves and dynamic soil properties, *J. of Geotech. and Geoenvironmental Engrg.*, ASCE, Vol.126, No.6, pp.543-555, 2000.
 - 20) Jennings, P. C.: Periodic response of a general yielding structure, *J. of Engrg. Mech. Div.*, ASCE, EM2, pp.131-163, 1964.
 - 21) 日本建築学会:入門・建物と地盤との動的相互作用, pp.250-252, 丸善, 1996.
 - 22) 羽矢洋, 西村昭彦:大地震力を考慮した直接基礎の設計法の提案, 土木学会論文集, No. 595/VI-39, pp.127-140, 1998.

(2002.10.4 受付)

EVALUATION OF INPUT LOSS OF DEEPLY EMBEDDED FOUNDATIONS REFLECTED TO STRAIN DEPENDENCY OF SOIL

Masato SAITOH, Masaki Ikegame, Shirou TANAMURA and Hiroyuki WATANABE

The present study focuses on the input loss of deeply embedded foundations that support bridges and viaducts. It is widely known that the strain dependency of soil dominates in surface layers supporting the foundations when subjected to strong motions. Therefore, it is desirable to know how the input loss is affected by the strain dependency accompanied by changes in stiffness and damping of soil. This study investigates the influence of strain dependency on the input loss by means of vibration tests and a theoretical approach of a closed form solution of input loss with a constitutive model for the nonlinearity of soil. The present study gives physical understanding for the relation of the strain dependency and the input loss.