

短周期地震動に対する杭基礎の入力損失効果

室野剛隆¹・宇佐美敦浩²・坂井公俊²・小長井一男³

¹正会員 博（工） （公財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 （公財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

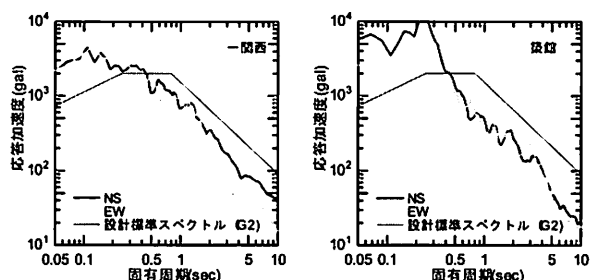
³正会員 横浜国立大学大学院教授 都市イノベーション研究院
（〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、地震観測網が整備され、地震が発生するたびに貴重な強震記録が多数得られるようになった。2008年には岩手・宮城内陸地震が発生し、一関西では短周期側で5%減衰の加速度応答スペクトルが5,000galにも達している（図-1(a)）。そして、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震においては、防災科学技術研究所の強震観測網K-NET、KiK-net¹⁾で、最大加速度が1,000galを超える強震動を観測した地点が約20箇所もあった。また、短周期成分が卓越しており、特にK-NET築館では周期0.2秒の5%減衰加速度応答スペクトルが5,000galに及んでいた（図-1(b)）。このように近年では、鉄道²⁾や道路³⁾の耐震設計で規定されている標準的な設計地震動の加速度応答スペクトルを短周期側で大幅に超える記録が多数観測されている。

これらの設計地震動の加速度応答スペクトルは観測記録をベースに決められていることが多いが、短周期領域においてはある閾値でカットされていることが多いようである⁴⁾など。この理由としては、土木構造物の固有周期が0.5～1.0秒程度のものが多いこと、短周期側では逸散減衰を大きく見積もることが可能であること、幾何学的相互作用（Kinematic相互作用）による入力損失効果があること等を期待した工学的判断がある。

ここで、「入力損失」とは構造物が存在することにより、地震動による地盤の動きが拘束されることにより、自由地盤と比較して構造物に入射される地震動が低減される現象を指し、実際に入射されるものを「有効入力」と呼ぶ。入力損失効果は、山原⁵⁾



(a) 岩手内陸地震 (b) 東北地方太平洋沖地震

図-1 短周期が卓越する地震動の例

⁶⁾が地盤と建物基礎における地震記録の分析から最初に見出したものである。その後、解析的研究^{7) 8)}などや実地震観測に基づく検討⁹⁾などが進められた。

短周期成分が設計地震動を超えた近年の地震においても構造物の揺れによる被害は限定的であったことから、上記の工学的判断は正しいと言える。しかし、設計地震動の中にこのような動的相互作用の結果として得られる減衰特性や入力損失を陰に含めることは性能設計を前提とした設計体系化では不都合である。これは、動的解析を用いた場合には、入力損失効果などは動的相互作用の結果として自動的に考慮されるためである。よって、解析に用いる設計地震動は自然現象としての地震動である必要がある。なお、このような背景によりISO23469¹⁰⁾では人間活動に依らない自然現象と設計行為との境界を明確化するために、新たに「参照地震動」という概念を導入している。

そこで本論文では、近年観測されている短周期地震動に対する入力損失効果の影響を把握することを目的とする。

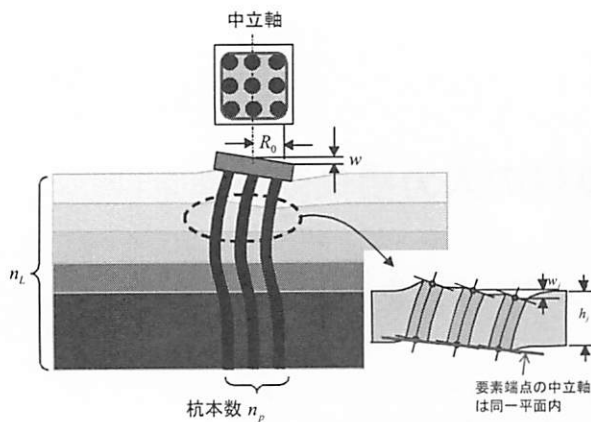


図-2 等価梁法を求めるための仮定

2. 計算方法

(1) 定式化

近年の鉄道構造物の多くは杭本数が1フーチングにつき1～4本程度、杭間隔 $s/d=2.5\sim3$ のものが多く、この範囲では著者らは提案した等価梁法は良い近似解を与えることが分かっている¹¹⁾¹²⁾。そこで、本研究では等価梁法により検討を行った。この手法は群杭を等価な梁に置き換えて考えるものであり、以下の仮定を行っている（図-2参照）。

(a) 群杭は変形時に杭間隔を変えず、杭の間に挟まれた土とともに変形する。

(b) 杭間に挟まれた土から杭に作用する摩擦力によって生じるモーメントは無視できる。

(c) 杭頭は剛なフーチングに固定され、回転が拘束される。

(d) 地盤・杭は水平に分割された要素からなる。各要素の端面と杭の中立軸が交わる点は同一平面上にある。

このような仮定を置くと、等価梁の各断面は並進と回転の2自由度のみを考えればよいことになる。

(a) (b) から杭の水平変位は杭によらず一律に変位ベクトル $\{u_x\}$ で表される。また、梁のロッキングは梁側面の鉛直変位ベクトル $\{w\}$ によって記述できる。曲げ剛性 EI を有する n 本の杭からなる群杭を考えた場合の等価梁の全体系の運動方程式は次式で与えられる。

$$([F_H] - \omega^2[M_H]) \begin{Bmatrix} \{u_x\} \\ \{w\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_x\} \\ \{M_y/R_0\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $[F_H]$ は等価梁全体の剛性マトリクス、 $[M_H]$ は質量マトリクス、 $\{P\}$ は外力ベクトルである。その他の記号は図-2を参照のこと。

次に、地盤の剛性は、水平方向に半無限の広がりを持つ成層地盤を仮定し、その半解析解が得られる薄層要素法¹³⁾により表現する。このとき、基礎に相当する円筒状の穴における側面の力と変位は以下のように得られる。

$$\begin{Bmatrix} \{P_x\} \\ \{M_y/R_0\} \end{Bmatrix} = [R_H] \begin{Bmatrix} \{v_r\} \\ \{v_z\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、

$$[R_H] = \pi R_0 [D_H [J_H]]^{-1} \quad (3)$$

である。また、 $\{v_r\}$ および $\{v_z\}$ は円筒表面における半径方向ならびに鉛直方向の変位ベクトルである。

等価梁の運動方程式と地盤の運動方程式を重ね合わせることで、地盤～基礎系の全体系の運動方程式が以下のように得られる。

$$([R_H] + [F_H] - \omega^2[M_H]) \begin{Bmatrix} \{v_r\} \\ \{v_z\} \end{Bmatrix} = \{P\} \quad (4)$$

ただし、 $\{v_r\} = \{u_x\}$ 、 $\{v_z\} = \{w\}$ である。

(2) 有効入力動の算定

地盤中に杭基礎と全く同一の寸法・形状を有した仮想土柱を考える。自由地盤の変形 $\{v_r^*\}$ が作用した場合（鉛直変位は無視）、その仮想土柱は自由地盤と同一の変形をする。仮想土柱を杭に置き換えると剛性および質量は土柱の分だけ低減されるので、等価梁の剛性マトリクス $[F_H]$ は $[F_H^*]$ に、質量マトリクス $[M_H]$ は $[M_H^*]$ に変化する。ただし、剛性の変化は一般に小さいのでここでは無視する。その結果、基礎と地盤の接触面上で以下の関係が成り立つ。

$$([F_H] - \omega^2[M_H^*]) \begin{Bmatrix} \{v_r\} \\ \{v_z\} \end{Bmatrix} = -[R_H] \left(\begin{Bmatrix} \{v_r\} \\ \{v_z\} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \{v_r^*\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \right) \quad (5)$$

式(5)を解くことにより、幾何学的相互作用による地盤変位 $\{v_r\}$ 、 $\{v_z\}$ が求められる。

表-1 解析パラメータ

	杭諸元						地盤諸元			
	杭径 D(m)	杭間隔 s(m)	杭本数	杭長 l(m)	弾性係数 E _p (kN/m ²)	杭種 ¹⁾	初期せん断波速度 V _{s0} (m/s)	等価せん断波速度 ²⁾ V _s (m/s)	ポアソン比 Z	層厚 H(m)
Case2	1.0	3.0	2×2	15	2.5×10 ⁷	RC	270 200 130	200 150 100	0.45	15
Case3	1.5	4.5	2×2	15	2.5×10 ⁷	RC			0.45	15
Case4	1.0	3.0	2×2	10	2.5×10 ⁷	RC			0.45	10
Case5	1.0	3.0	2×2	30	2.5×10 ⁷	RC			0.45	30
Case6	1.0	3.0	3×3	15	2.5×10 ⁷	RC			0.45	15
Case7	1.0	3.0	4×4	15	2.5×10 ⁷	RC			0.45	15
Case8	外径 0.6 内径 0.582	1.5	4×4	15	2.1×10 ⁸	S	200	150	0.45	15

1) 杭種:RCは鉄筋コンクリート杭、Sは鋼管杭

2)等価せん断波速度は、地震によるせん断剛性の低下を考慮した値で初期せん断波速度の0.75倍とする

幾何学的相互作用により生じる杭頭変形と自由地盤の変形の比率は

$$\eta = \frac{v_r^* + v_r}{v_r^*} \quad (6)$$

と表される．ここで、 η は有効入力係数である．そして、 $1-\eta$ を入力損失と呼び、実際に構造物に入射される地震動の自由地盤からの低減率と考える．

なお、有効入力係数 η は虚数で求まるが、物理現象として理解しづらいため、式(7)を有効入力係数として定義しなおし、結果の考察を行うこととする．

$$|\eta| = \sqrt{\Re^2(\eta) + \Im^2(\eta)} \quad (7)$$

3. 解析条件

(1) 計算条件

検討に用いた杭基礎および地盤の条件を図-3に示す．杭は先端支持杭を想定し、また、杭頭はフーチングに剛結されているとした．

解析には薄層要素法を用いることから線形計算が前提となるが、L2地震時には地盤が塑性化することが避けられない．そこで本研究では、剛性については微小ひずみ時の値から低下させるとともに、減衰定数については履歴減衰の分だけ増大させた．具体的には、初期せん断波速度 V_s については、0.75倍した値²⁾を、減衰定数 h については10%とした値を解析に用いた．解析パラメータおよび解析ケースを表-1に示す．

(2) 入力地震波

基本検討に用いる入力地震動は、多くの耐震設計の基準の中で、設計地震動を設定する際に強く参考にされている1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された記録（KOB波）および、短周期成分

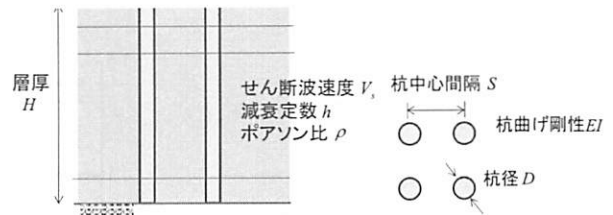
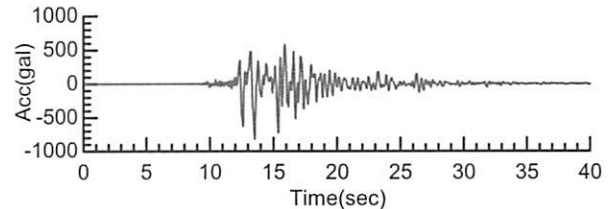
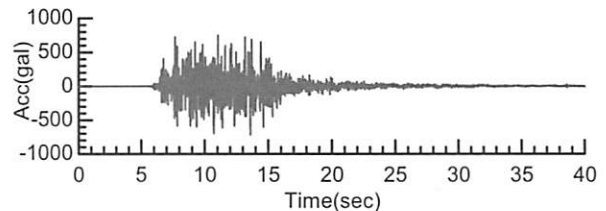


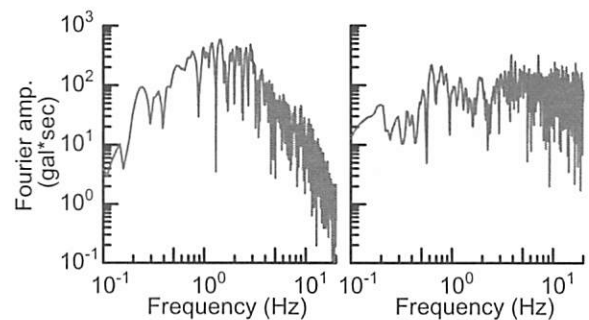
図-3 杭基礎パラメータの意味



(a) 兵庫県南部地震 (KOB 波)



(b) 岩手宮城内陸地震 (IWT 波)



(c) フーリエ振幅スペクトル

図-4 基本検討に用いた地震動

が著しく卓越する2008年岩手宮城内陸地震における一関西における記録（IWT波）の2種類を用いた．図-4に波形とフーリエスペクトルを示す．KOB波では、多くの耐震設計基準で対象としてきた1~2Hz前後の成分が卓越しており、5Hz以上の成分は十分に小さい．一方、IWT波では5Hz以上の高い振動数成分が卓越している．

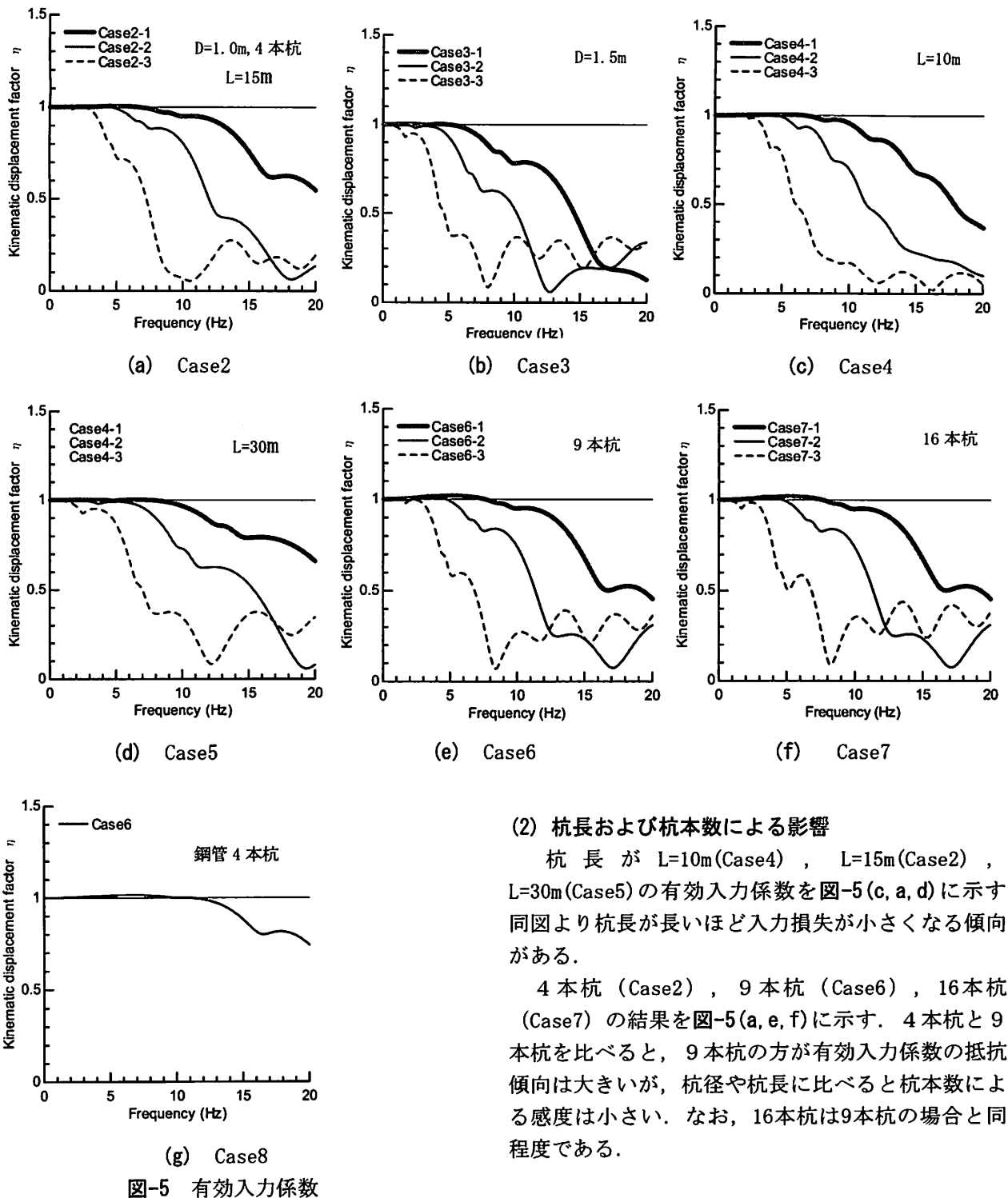


図-5 有効入力係数

4. 基本検討結果

(1) 杭径および地盤剛性の影響

Case2 ($D=1.0\text{m}$) と Case3 ($D=1.5\text{m}$) における有効入力係数の振幅を算出した結果を図-5(a, b) に示す。振幅は低振動数側では1.0であるが、ある振動数から低下し、入力損失効果が確認できる。なお、入力損失効果は、杭径が大きいほど、地盤が軟弱なほど顕著である。

(2) 杭長および杭本数による影響

杭長が $L=10\text{m}$ (Case4) , $L=15\text{m}$ (Case2) , $L=30\text{m}$ (Case5) の有効入力係数を図-5(c, a, d) に示す。同図より杭長が長いほど入力損失が小さくなる傾向がある。

4本杭 (Case2) , 9本杭 (Case6) , 16本杭 (Case7) の結果を図-5(a, e, f) に示す。4本杭と9本杭を比べると、9本杭の方が有効入力係数の抵抗傾向は大きい。杭径や杭長に比べると杭本数による感度は小さい。なお、16本杭は9本杭の場合と同程度である。

(3) 杭種による影響

RC杭と鋼管杭について比較する。図-5(g) に鋼管杭4本の結果を示すが、図-5(a) と比較すると、鋼管杭の方がRC杭よりも入力損失効果が小さいことが分かる。ちなみに、今回の設定では、杭体の剛性は鋼管杭の方が大きい。鋼管杭は中空断面であり、曲げ剛性は鋼管杭が小さくなっている。この設定は概ね既往の設計事例を参考に設定しており、今回の傾向は一般性のあるものとして捉えても差し支えないと考える。

(4) 総括

振動数が高くなると、杭長に対して波長が相対的に短くなることから、杭の深さ方向の挙動には位相差が生じ、その結果として杭は周辺地盤の変形を拘束し、これを平均化しようとする働きにより、入力損失効果の特性が生じることが分かっている。つまり、上記特性は、

- ・ 杭径が大きいほど ・ 杭長が短いほど
- ・ 地盤が軟らかいほど ・ 杭本数が多いほど
- ・ 杭の曲げ剛性が大きいほど、

地盤に対数する基礎の相対的な剛性が大きくなり、基礎の存在が地盤の挙動を拘束する効果が大きく発揮され入力損失効果が大きくなったと解釈できる。

5. 入力係数が加速度応答スペクトルに与える影響

入力損失を考慮することにより、構造物の応答がどの程度影響を受けるか検討する。そこで、有効入力係数を地表面地震動のフーリエスペクトルに乗じて、それを逆フーリエ変換することで有効入力動を算出し、有効入力動に対して応答スペクトルを算出した。その結果を図-6(a, b)に示す。同図より、

- ・ 兵庫県南部地震のように、元々の波形に高振動数成分が少ない場合には、入力損失による影響はほとんど表れない。
 - ・ 岩手内陸地震のように高振動数成分が多く含まれる地震動に関しては、高振動数成分の入力損失効果が有効に作用して、短周期の構造物の応答を低減させている。
- ことが分かる。

これまで、杭基礎の入力損失は、構造物の応答にはそれほど大きな影響はなく、設計という観点で見た場合には、ある種の安全率として捕らえるべきと解釈されることが多かった。KOB波を対象とした場合には、今回の結果は従来の解釈と調和的であり、これまでの考え方を支持するものとなった。しかし、IWT波などの短周期成分が卓越する地震動を対象とした場合には、この影響が無視できないレベルであると言える。このことから、近年の短周期が非常に卓越した地震動に対しては、幾何学的相互作用としての入力損失を考慮しないと不合理な設計になることが示唆された。

次に東北地方太平洋沖地震を対象として、同様な検討を行う。代表的な例として、Case3-3の場合について、図-7に示す。0.3秒以下を対象として入力損失効果が発揮され、応答スペクトルは大幅に低減

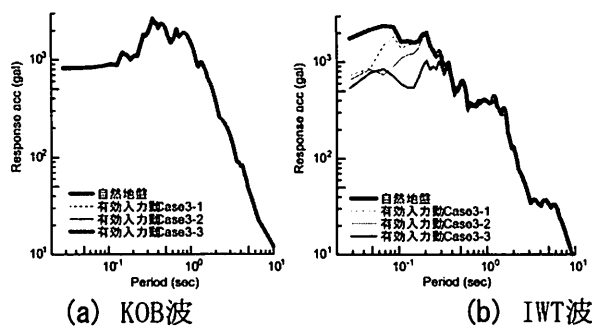


図-6 有効入力を考慮した応答スペクトル

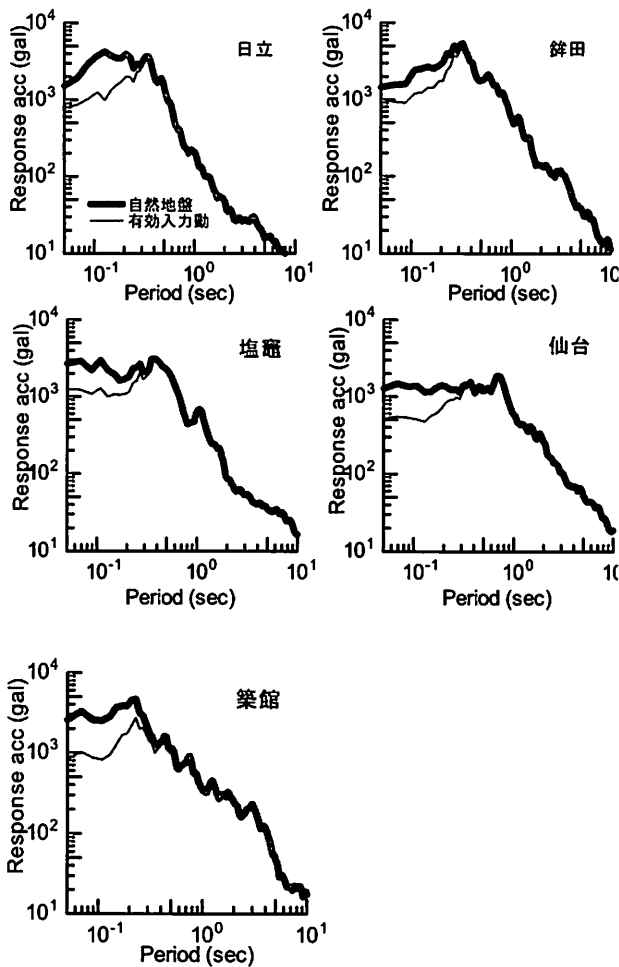


図-7 有効入力を考慮した応答スペクトル
(東北地方太平洋沖地震)

されている。

今回の地震では最大加速度が1,000galを超える地震動を記録した地点が約20箇所もあったにも関わらず、土木構造物が振動により壊滅的な被害を受けた事例は限定的であった。これは、耐震補強が着実に実施されていたこと、構造物の周期帯と地震動の卓越周期がずれていたことなど、いくつかの要因が考えられるが、このように入力損失効果が構造物への入射波を減じたことも1つの要因であったと思われる。

6. おわりに

本論文では、昨今の地震では短周期成分が多く観測されていることから、Kinematic相互作用（幾何学的相互作用）による入力損失に着目して、応答がどのように変化するか検討するとともに、簡易な有効入力係数モデルを提案した。主な成果を以下に示す。

(1) 杭基礎の径が大きいほど、地盤が軟弱なほど、杭長が短いほど、地盤に対する基礎の相対的な剛性が高く、地盤挙動を拘束する効果が大きいため、入力損失効果は大きい。

(2) 従来の耐震設計で考えている1~2(Hz)が卓越するような地震動に対しては、入力損失効果は無視できる程度であるが、近年の短周期成分が卓越した地震動に対しては、入力損失効果が無視できない。特に、2011年東北地方太平洋沖地震では、1,000galを超えるような観測記録が多数得られたにもかかわらず、構造物の揺れによる被害はそれほど大きくなかった。もちろん、構造物の固有周期と地震動の卓越周期がズレていたことも1つの理由であるが、入力損失効果が大きかったことも、理由の1つである可能性が分かった。

入力損失効果を考慮した耐震設計の実務への展開については別途報告する。

参考文献

- 1) 防災科学研究所 強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012.
- 3) 道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.
- 4) 王海波，西村昭彦，長縄卓夫：基盤入力地震動の考え方と応答スペクトルの設定，鉄道総研報告 Vol.13, No.2, 1999.
- 5) 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，第165号，pp.61-66，1969.
- 6) 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，第167号，pp.25-30，1970.
- 7) 田蔵隆，若原俊裕，清水勝美，松崎雅彦：群杭基礎の有効入力動と動的相互作用を考慮した加速度応答スペクトル，清水建設研究報告，第46号，pp.25-34，1987.
- 8) 長谷川正幸，中井正一：杭基礎の有効入力に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第422号，pp.105-115，1991.
- 9) 安井謙，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，第512号，pp.111-118，1998.
- 10) ISO23469: Bases for design of structures—Seismic actions for designing geotechnical works, 2005
- 11) Kazuo Konagai: An Upright Single Beam Equivalent to Grouped Piles, 生産研究 50巻9号, PP.13-16, 1998
- 12) Konagai, K., Yin, Y. and MURONO, Y.: Single beam analogy for describing soil-pile group interaction, soil Dynamics and earthquake engineering, 23(3), 213-221, 2003
- 13) H. Tajimi: A Contribution to Theoretical Prediction of Dynamic Stiffness Surface foundation, Proc. of 7th WCEE, Vol.5, pp.105-112, 1980