

成層地盤における群杭効果を考慮した構造物—杭—地盤系の三次元振動解析

長谷川 正 幸
(大崎研究室)中 井 正 一
(大崎研究室)

§ 1. はじめに

杭は、建物構造体の一部として常時建物の自重ならびに積載荷重を支え、支持力を確保するとともに、地震時には地動を建物に伝え、その結果生じる建物の振動荷重を負担してこれを地盤に伝える役割も有している。つまり、建物と地盤とは杭を介して相互に影響し合うわけで、この動的相互作用効果は杭の地震時挙動を把握するうえで、地盤の増幅特性、土の非線形性ととも重要な評価項目となっている。近年に建設される建物の過半数は杭基礎といわれており、日本国土の特徴ならびに最近見られる大規模構造物の軟弱地盤立地等を考えると、今後も杭基礎の採用は増加することが予想され、杭の耐震安全性に関する評価は重要な研究課題といえる。

ところで、杭に作用する地震力には上部構造からの慣性力と地盤の変形に伴い生じる動土圧とが考えられる。このうち、慣性力によるものは現行の耐震規定に取り入れられ設計上考慮されているが、動土圧によるものは未だ明確な規定はなく、現行設計法の問題点の一つとされている。地震時における表層地盤の増幅を考えれば、地盤の変形により杭に大きな地震力が作用することは十分に予想され、事実このことは多くの震害報告において指摘されているところでもある^{1)~3)}など。また、田蔵ら⁴⁾はこの点に早くから注目し、観測と解析の両面から杭基礎の地震時挙動を検討しており、地盤振動が杭の地震時応答におよぼす影響は多大であることを指摘している。

さて、このように杭の地震時挙動を把握するうえで地盤振動の影響は無視し得ないものといえるが、この影響を耐震設計へ反映させるためには、地盤の成層性や群杭効果を適切に考慮できる動解手法の開発が急務となる。現状で地盤構造を考慮できる手法としては、Winkler foundation を仮定した Penzien 型モデル⁵⁾による簡易的な方法、または弾性波動論に基づいた Novak ばね⁶⁾、もしくは薄層要素モデル⁷⁾による方法が代表といえる。しかしながら、これらの方法では厳密な意味で群杭を扱

うことができず、現実の系を忠実にモデル化するには至らない。この点、FEM 解析を用いれば現実の系が内包する様々な要因をモデル化することは可能であるが、三次元の場合には膨大な計算量を要するために実用的とはいえず、二次元解析に終始しているのが実状といえる。これらの問題点は、杭間相互の連成効果を手法上取り入れることがはなはだ困難なことに集約される。ところが最近、先の薄層モデルを用いて任意層境界面上の点に正弦的な点加振力を作用させたときの波動伝搬の解が解析的に導き出され^{8)~10)}、その結果成層地盤を対象とした三次元相互作用解析が著しく簡易化されることになった。この成果は主に埋込み基礎の解析に応用されてきたが¹¹⁾¹²⁾、Wass ら¹³⁾はこれを杭基礎に適用し、実に356本もの群杭の解析を行なっている。ここで Wass が用いた方法は、すでに Wolf ら¹⁴⁾が杭基礎のインピーダンス関数の算出に用いたサブストラクチャー手法を踏襲したものであるが、群杭効果の評価に当たり Wolf は地盤に FEM 解析を適用したのに対し、Wass は先の薄層法による加振解を採用しており、この点で計算効率が高く、現段階では最も有効な手法といえる。

本研究では、杭基礎の耐震設計における基礎的な検討を目的として、まず Wass が用いた手法と同様な解法をサブストラクチャー法の観点から定式化して紹介し、地盤の成層性と群杭効果をともに考慮した構造物—杭—地盤系の三次元振動解析が可能であることを示す。次に、本手法を適用して杭基礎を有する標準的な中高層オフィスビルの地震応答解析を行ない、建物の地震時挙動と杭の地震時応力とについて検討する。とくに、杭の地震時応力については現行設計法に議論の見られるところでもあり、また建物の慣性力と地盤振動の影響との観点から解析的に検討した例は比較的少ないと思われるので、これについては設計面からの示唆も含め、やや詳細な検討を加える。

§ 2. 解法

図-1に示すような成層地盤に杭群で支持された構造物を対象とし、これに地震力が作用する問題を扱う。解法は動的サブストラクチャー法に基づいており、成層地盤における杭間相互の連成効果は薄層法による加振解を用いて評価している。まず、サブストラクチャー法に基づいた運動方程式誘導の過程をやや詳細に記述し、次に杭基礎建物の応答を評価するうえで重要な物理量となる杭基礎の有効入力とインピーダンスの算出方法について示す。

2.1 サブストラクチャー法に基づく定式化

図-2に示すような構造物-杭-地盤系において、構造物に $\{F_s(\omega)\}$ なる外力が作用し、かつ自由地盤におい

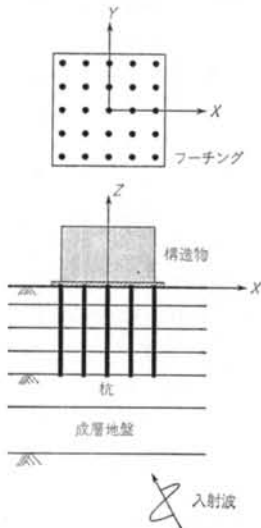


図-1 解析対象：成層地盤に杭群で支持された構造物

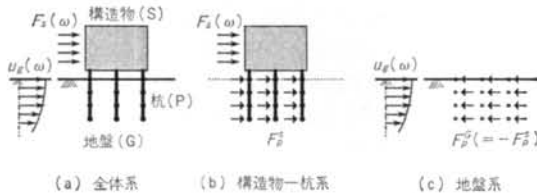


図-2 サブストラクチャー法に基づいた構造物-杭-地盤系の分離



図-3 フレキシブルボリューム法による重ね合わせの原理

て $\{u_g(\omega)\}$ なる地動が生じているものとする。このとき系に生じる変位を絶対座標でとれば、全体系の運動方程式は次のように書ける。

$$\begin{pmatrix} [K_{SS}] & [K_{SP}] \\ [K_{PS}] & [K_{PP}] & [K_{PG}] \\ & [K_{GP}] & [K_{GG}] \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} [M_S] \\ & [M_P] \\ & & [M_G] \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{U_S\} \\ \{U_P\} \\ \{U_G\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_S(\omega)\} \\ \{0\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $[K]$ 、 $[M]$ 、 $\{U\}$ はそれぞれ剛性マトリックス、質量マトリックスおよび変位ベクトルで、下添字 S, P, G はそれぞれ構造物、杭、地盤の離散化表示を意味する。また、ここで外乱はすべて調和的なものを仮定しているので、時間項 $e^{i\omega t}$ は省略する。

さて、ここで式(1)を図-2に示すように、構造物-杭系と地盤系とに分離することを考える。分離手法として、図-3に示すようなフレキシブルボリューム法¹⁵⁾を適用すると、杭の剛性マトリックスおよび質量マトリックスはそれぞれ次のように置くことができる。

$$\begin{cases} [K_{PP}] = [K_{PP}^G] + ([K_{PP}] - [K_{PP}^G]) \\ [M_P] = [M_P^G] + ([M_P] - [M_P^G]) \end{cases} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 $[K_{PP}^G]$ ：杭と同体積の排土剛性マトリックス
 $[M_P^G]$ ：杭と同体積の排土質量マトリックス
 式(2)を式(1)に代入し、変位の連続条件を考慮すると、式(1)は次のように構造物-杭系と地盤系の運動方程式にそれぞれ分離することができる。

$$\begin{aligned} \text{構造物-杭系: } & \begin{pmatrix} [K_{SS}] & [K_{SP}] \\ [K_{PS}] & [K_{PP}] - [K_{PP}^G] \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} [M_S] \\ [M_P] - [M_P^G] \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{U_S\} \\ \{U_P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_S(\omega)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{F_P^s\} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{地盤系: } & \begin{pmatrix} [K_{PP}^G] & [K_{PG}] \\ [K_{GP}] & [K_{GG}] \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} [M_P^G] \\ [M_G] \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{U_P\} \\ \{U_G\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_P^g\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

ここに、 $\{F_P^s\}$ 、 $\{F_P^g\}$ はそれぞれ分離したことにより構造物-杭系および地盤系に働く相互作用力ベクトルで、これらは全体系では内力として釣り合うから、次の関係を満足する。

$$\{F_P^s\} + \{F_P^g\} = \{0\} \quad \dots\dots(5)$$

そこで、式(5)の関係を利用し、式(3)中の未知量 $\{F_P^s\}$ を地盤系の解析から求めることを次に考える。式(4)に着目すると、杭はすでにこれと同体積の排土剛性および排土質量で置き換えられているから、これは単に自由地盤

の運動方程式と見ることができる。このようにフレキシブルボリューム法に従い分離すると、地盤系の解析が構造物による攪乱のない、いわゆる自由地盤として扱えるところに利点を有する。さて、式(4)は図-2(c)に示すとおり自由地盤において地動 $\{u_0\}$ が生じ、かつ相互作用力 $\{F_P^G\}$ が強制的に作用する問題であるから、これは入射問題と加振問題の2段階に分けて解けばよい。入射系の変位ベクトルを $\{u^*\}$ 、加振系でのそれを $\{\Delta u\}$ とすれば、式(4)の変位ベクトルは次のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} \{U_P\} \\ \{U_G\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{u_P^*\} \\ \{u_G^*\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \{\Delta u_P\} \\ \{\Delta u_G\} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(6)$$

式(4)は、そもそも自由地盤の運動方程式であるから、入射系の変位ベクトル $\{u^*\}$ は与えられた地動の変位ベクトル $\{u_0\}$ そのものとなる。一方、加振問題による変位ベクトル $\{\Delta u\}$ は、 $\{u^*\} = \{0\}$ と置いて式(6)を式(4)に代入し排土部分の自由度に縮合して整理すれば、次のように表わすことができる。

$$\{\Delta u_P\} = [A(\omega)] \{F_P^G\} \quad \dots\dots(7)$$

ここに、

$$[A(\omega)] = \left[\left([K_{PP}^G] - \omega^2 [M_{PP}^G] \right) - [K_{PG}] \cdot \left([K_{GG}] - \omega^2 [M_{GG}] \right)^{-1} [K_{GP}] \right]^{-1} \quad \dots\dots(8)$$

式(7)は、図-4に示すとおり地盤内に分布した杭・地盤節点間における力と変位の関係を示しており、したがって $[A]$ はこれら節点間の影響係数マトリックスとなる。群杭効果を適切に表現するためにはこの影響係数を厳密に評価する必要があり、本手法では地盤の成層性と計算効率とを考慮、Tajimi⁹⁾の薄層解を採用して $[A]$ を作成している(付録参照)。したがって、式(8)は単に離散系の表示式にすぎないことを断っておく。

さて、式(6)を式(7)に代入し、かつ

$$[A(\omega)]^{-1} \{u_P^*\} = \{f_P^*\} \quad \dots\dots(9)$$

とおけば、地盤系に働く相互作用力ベクトル $\{F_P^G\}$ は次

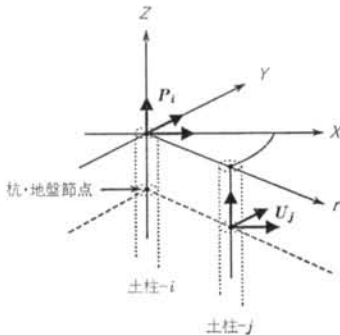


図-4 杭・地盤節点間における力と変位の関係

のように書くことができる。

$$\{F_P^G\} = [A(\omega)]^{-1} \{U_P\} - \{f_P^*\} \quad \dots\dots(10)$$

そこで、式(5)を考慮して式(10)を式(3)に代入すれば、最終的に次のような運動方程式を導くことができる。

$$\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SP}] \\ [K_{PS}] & [K_{PP}] - [K_{PP}^G] + [A(\omega)]^{-1} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} [M_S] & \\ & [M_P] - [M_P^G] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{U_S\} \\ \{U_P\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_S(\omega)\} \\ \{0\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{f_P^*\} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(11)$$

式(11)の $\{f_P^*\}$ は、一般にドライビングフォースと呼ばれ、物理的には式(10)において $\{U_P\} = \{0\}$ と置けば分かるように、空間的に杭を拘束するのに必要な力を表わしている。また、工学的には地盤の変形に伴い杭に作用する地震時土圧を意味する。

2.2 杭基礎の有効入力とインピーダンスの算出方法

地震時における杭基礎構造物の応答は、図-5に示すように構造物を無質量としたときの入射波による応答と、構造物の質量を考慮したときの慣性力による応答との和で表わすことができる。前者は一般に入力の相互作用と呼ばれ、構造物に対する入力(杭基礎の有効入力)を与える。一方、後者は慣性の相互作用と呼ばれ、構造物の慣性力に抵抗して働く杭基礎のばね効果と地下逸散減衰の双方(杭基礎のインピーダンス)を表わしている。したがって、構造物の応答を求めるには図-6に示すような手順に従い、あらかじめ杭-地盤系の解析から杭基礎の有効入力とインピーダンスを別途求めておき、これを用いて応答計算を行なえばよい。構造物の応答のみを問題とする場合には、これは実用上便利な方法といえる。

ところで、同図に示すとおり、杭基礎の有効入力とインピーダンスは構造物を無質量としたときの入射問題と加振問題とによりそれぞれ得られるから、これらは式(11)において構造物をいったん取り去り、基礎を無質量として同式を適用すれば求めることができる。すなわち、

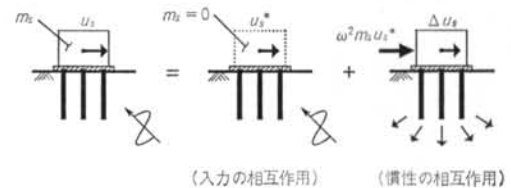


図-5 杭基礎構造物における入力の相互作用と慣性の相互作用の概念

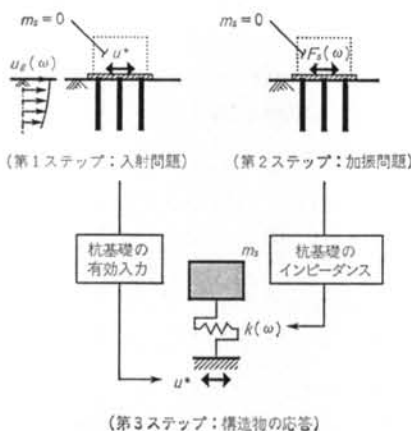


図-6 杭基礎のインピーダンスと有効入力を用いた構造物の応答解析手順

$$\left[[K_{PP}] - [K_{PP}^G] + [A(\omega)] \right]^{-1} - \omega^2 [M_P] - [M_P^G] \{U_P\} = \{F_P\} \quad \dots\dots(12)$$

ここで、 $\{F_P\} = \begin{cases} \{f_P^*\} & : \text{入射問題} \\ \{F_S(\omega)\} & : \text{加振問題} \end{cases}$

ただし、インピーダンスは式(12)において基礎にのみ単位の正弦的加振力を与え、これより得られる基礎応答変位の逆数として求めることになる。いま、式(12)より得られるインピーダンスマトリックスを $[k(\omega)]$ 、有効入力動ベクトルを $\{u^*\}$ で表わし、構造物を仮に剛体としてその質量マトリックスを $[m_s]$ とすれば、構造物の応答は次式により計算することができる。

$$([k(\omega)] - \omega^2 [m_s]) \{u_s\} = [k(\omega)] \{u^*\} \quad \dots\dots(13)$$

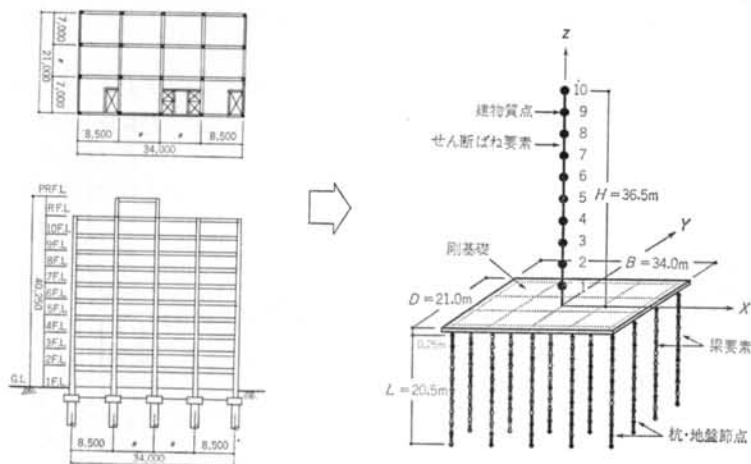


図-7 対象建物と解析モデル

§ 3. 杭基礎建物の地震応答解析

杭基礎を有する標準的な中高層オフィスビルを対象に本手法を適用して、建築基準法一次設計相当の地震応答解析を行ない、建物の地震時挙動と杭の地震時応力について検討する。

3.1 解析対象と解析条件

3.1.1 対象建物と解析モデル

対象建物とその解析モデルを図-7に示す。対象建物はSRC造10階建(塔屋1階)の事務所建築で、X方向4スパン、Y方向3スパンの均等ラーメン構造である。また、この建物は径が1.5mのRC杭に支持されており、杭は各独立フーチング下に均等配置されている。解析に当たり、建物は塔屋を最上階に含め10質点よりなるせん断型モデルに置換し、杭は梁要素でモデル化する。表-1に建物および杭の振動諸元を示す。なお、ここに建物剛性は基礎固定時の一次固有周期 T_1 が $0.02H$ となるように設定してある。

地盤は、建築基準法の第三種地盤相当となるような地層構成を想定し、表-2に示すような2層地盤(モデルA)と4層地盤(モデルB)の2ケースを考える。また、両ケースとも杭はG.L-19m以深の砂層に1.5m(1.0φ)の根入れをもった支持杭として扱う。解析に当たり地盤は薄層要素でモデル化し、その薄層分割は解析対象振動数に対するせん断波長の1/6以下となるように行なう(表-2参照)。また、薄層モデルの最下層は杭先端から長辺方向基礎幅の1.5倍の位置に設定し、この位置でKauselの半無限境界¹⁶⁾を適用して地盤の半無限性を考慮する。図-8に、杭-地盤系の解析モデルを示す。

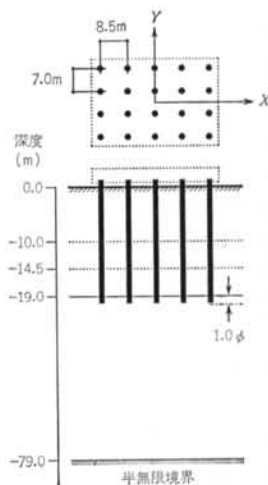
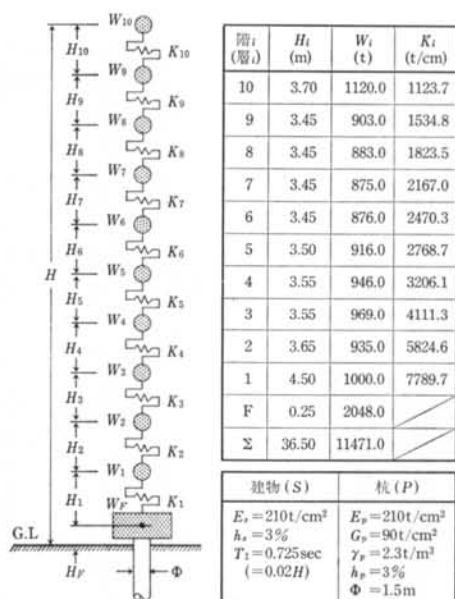


図-8 杭-地盤系解析モデル

表-1 建物および杭の振動諸元

モデル A					モデル B				
地層	H (m)	γ (t/m^3)	V_s (m/s)	ν	地層	H (m)	γ (t/m^3)	V_s (m/s)	ν
粘土	19.0	1.5	150	0.48	粘土	10.0	1.5	130	0.48
	1081.0				砂	4.5	1.9	220	
	681.5				粘土	4.5	1.5	150	
砂	∞	1.9	300	0.46	砂	∞	1.9	300	0.46
	281.5								
	1983.0								

* 両層モデルの分別層厚(モデルA, B共通)

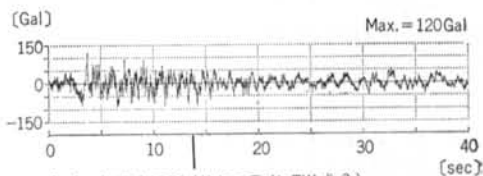
表-2 地盤モデルと地盤定数

3.1.2 入力地震動

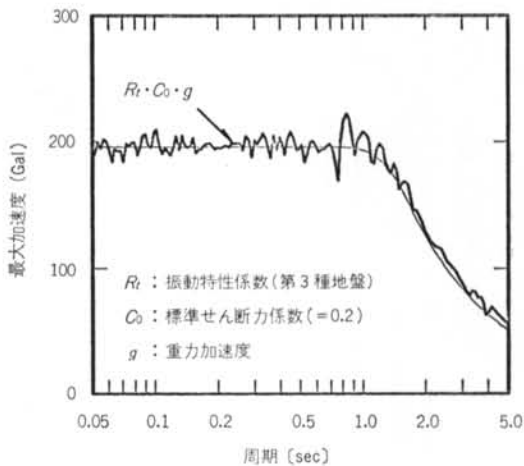
入力地震動は、建築基準法の振動特性係数 $R_t(T)$ に標準せん断力係数 $C_0 (=0.2)$ を乗じた $R_t C_0$ 曲線を5%減衰の標準化加速度応答スペクトルとみなし、これをターゲットスペクトルとしてフィッティングを図った模擬地震動とする。図-9に、作成した模擬地震動の加速度波形と応答スペクトルを示す。作成に当たり、位相は1952年 Taft EW 成分を用いた。なお、入力地震動は一般に強震記録を用いるのが通例であるが、本解析では設計との対応も考え、建築基準法一次設計相当の解析となるよう $R_t C_0$ 曲線による模擬地震動を採用している。

3.1.3 解析条件

解析に当たり、用いた仮定および条件は以下のとおり



(a) 加速度波形 (位相: Taft EW 成分)



(b) 加速度応答スペクトル ($h = 5\%$)

図-9 入力地震動: $R_t C_0$ 曲線をターゲットスペクトルとする模擬地震動

である。

(i) 解析は周波数領域で行ない、時刻歴への変換はFFT法を用いる。ここに、カットオフ振動数は10Hzとする。

(ii)杭の要素分割は薄層分割にならない、杭・地盤節点は薄層境界面で評価する。この節点において地盤はX方向並進自由度のみとし、杭はX方向並進とY軸周り回転の2自由度とする。

(iii)支持杭を対象とした場合に見られる地盤沈下、および掘削等による基礎周辺地盤の剛性低下を考慮し、基礎と地盤とは非密着とする。

(iv)基礎は剛体を仮定し、杭頭は回転拘束とする。

(v)入力地震動は自由地表面で規定し、入力は建物長辺X方向とする。

3.2 建物の地震時挙動

地震応答結果を、まず最大加速度と最大層せん断力について整理し、建物の最大応答量に見られる特性について考察してみる。図-10に、建物と杭および自由地盤の最大応答加速度分布を地盤モデルの異なる2ケース(モデルA, B)の比較で示す。同図より、応答の加速度レベルでは地盤構造の違いによる差が小さいこと、また杭の応答加速度は自由地盤のそれにほぼ等しく、建物周辺地盤は自由地盤と同様な増幅傾向にあることが分かる。これは本検討例の場合、杭の拘束効果が比較的小さいことを意味している。

図-11に、建物および杭頭の最大応答せん断力と層せん断力係数を示す。ここに、杭頭せん断力は各杭頭での最大せん断力の総和により求めた。設定した入力スペクトルの定義からすれば、本来ベースシャー係数は0.2と

なるべきであるが、相互作用の影響、さらには応答を動的に評価していることもあって、両モデルともベースシャー係数はこの8~9割に低減している。また、換算した杭頭のせん断力係数もこの8割程度で、ほぼベースシャー係数に近似した結果となっている。このことから、設計用ベースシャー係数が設定されれば、杭頭せん断力のおおよそは推定することができよう。

次に、上記の最大応答量に見られた傾向を周波数特性の観点から考察してみる。図-12に、自由地表面に対す

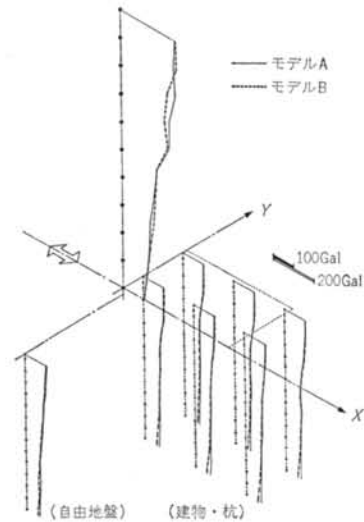
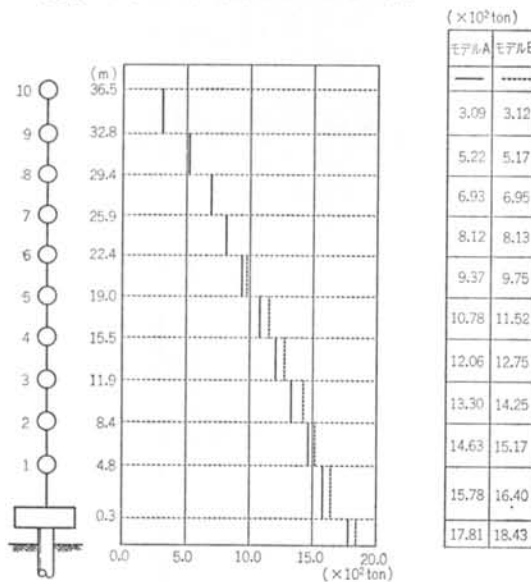
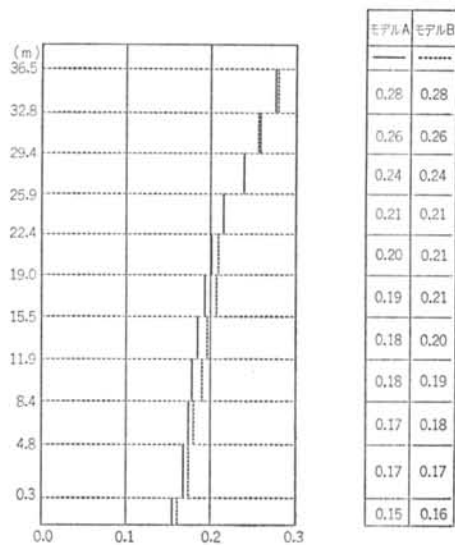


図-10 建物と杭および自由地盤の最大応答加速度分布



(a) 最大応答せん断力



(b) 層せん断力係数

図-11 建物および杭頭の最大応答せん断力と層せん断力係数

る建物各質点の周波数応答倍率をモデルAとBの比較で示す。これには杭基礎の有効入力も基礎応答との比較で示してある。同図より、建物の卓越振動数は設定した基礎固定時の一次固有振動数にほぼ等しく、建物の応答はこの一次が支配的で、二次以降の振動数成分の影響は小さいことが分かる。また、建物各質点とも両モデルの差異は極めて小さく、これは図-10, 11に示した最大応答値にそのまま反映している。さらに、同図(c)に示した杭基礎の有効入力も全周波数域にわたってほぼ1に等しく、

両モデルとも杭による入力損失効果はほとんど見られない。これは当建物の場合、杭の拘束効果が小さいことによるため、図-10に示した杭の加速度応答が自由地盤のそれと変わらないことと対応している。また、このことは両モデルの周波数応答に明確な差異が見られない原因の一つともなっている。

図-13に、杭基礎と直接基礎のインピーダンス関数を示す。杭基礎のインピーダンスを地盤のモデルの比較で見ると、建物の応答を支配している一次固有振動数まで

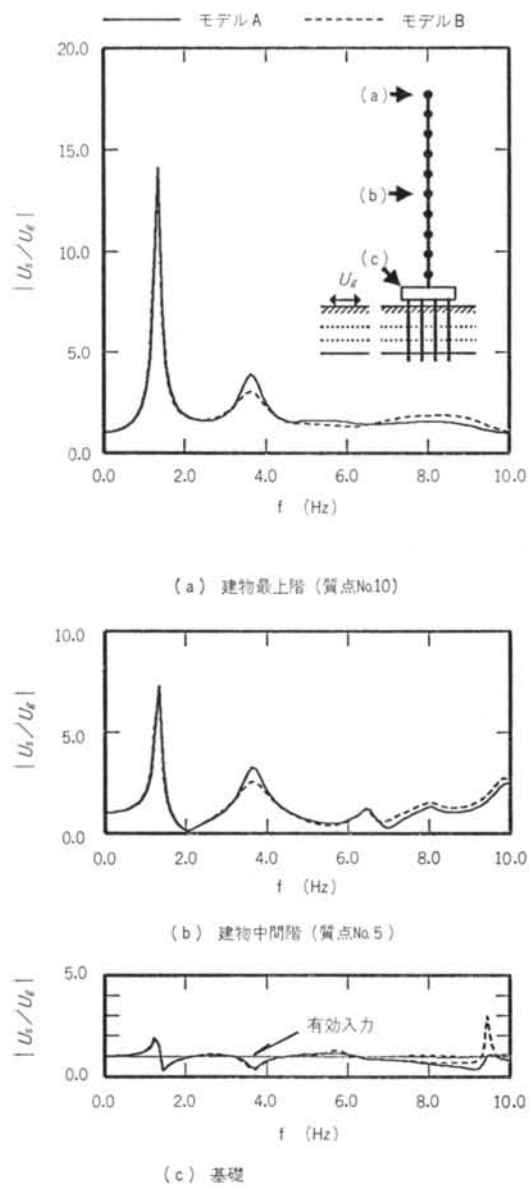


図-12 自由地表に対する建物の周波数応答倍率

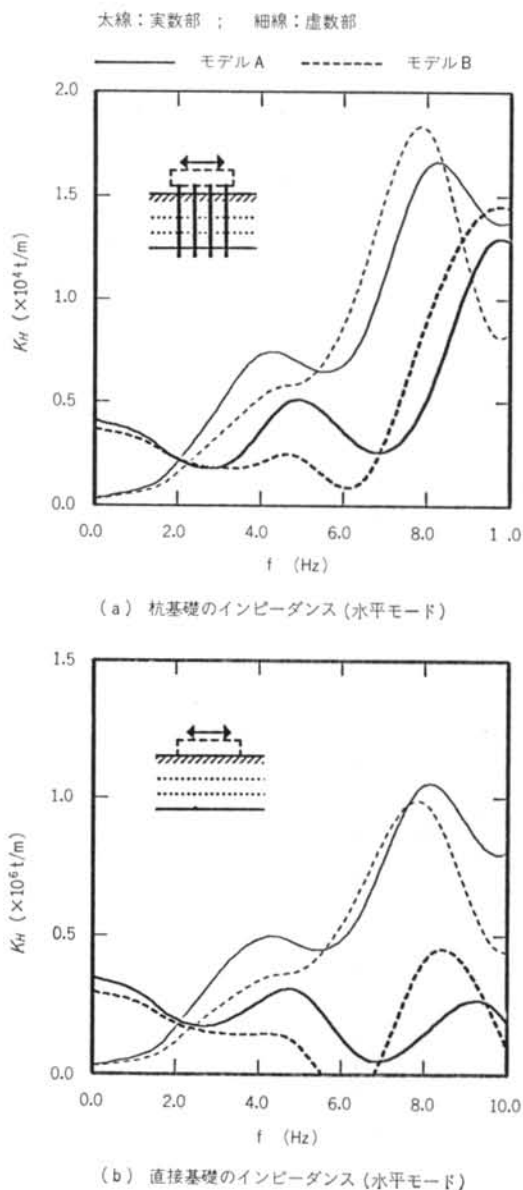


図-13 インピーダンス関数の比較

は実数部・虚数部ともにほぼ一致しており、2 Hz を越え
ると両モデルとも虚数部が増大し、地下逸散効果が大き
くなる。図-12に示した建物の周波数応答にはこの影響
がよく現われているといえよう。また、杭基礎と直接基
礎とを比較すると、これらは接地面積が異なるためばね
定数の値には隔たりがあるものの、両者の周波数特性は
両モデルともにそれぞれ良く対応しており、本検討例の
場合には杭の補剛効果が小さいこともあって、杭基礎の
インピーダンスには地盤の成層性が強く現われている。

3.3 杭の地震時応力

図-14に示すとおり、杭に作用する地震力には建物か
らの慣性力と地盤の変形に伴い生じる動土圧、すなわち



図-14 杭基礎に作用する地震力の模式図

地盤振動の影響とが考えられる。ここでは、地震応答解
析より得られた杭の応力をこれらの観点から考察する。

図-15, 16に、各杭の杭長方向最大応答せん断力分布と
最大応答曲げモーメント分布を示す。同図より、せん断
力と曲げモーメントとも杭頭部では建物からの慣性力の
影響で大きな応力が生じており、その大きさは各杭でか

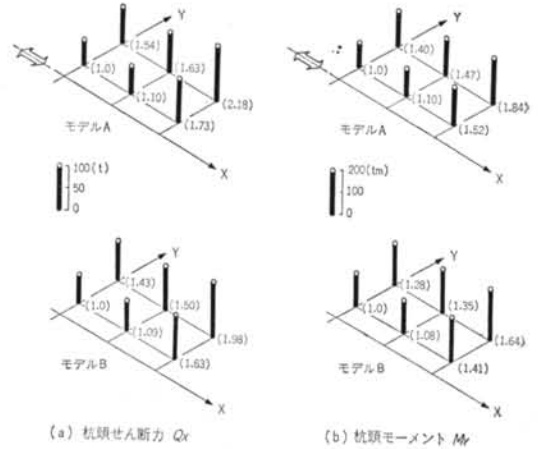


図-17 杭頭の応力分布

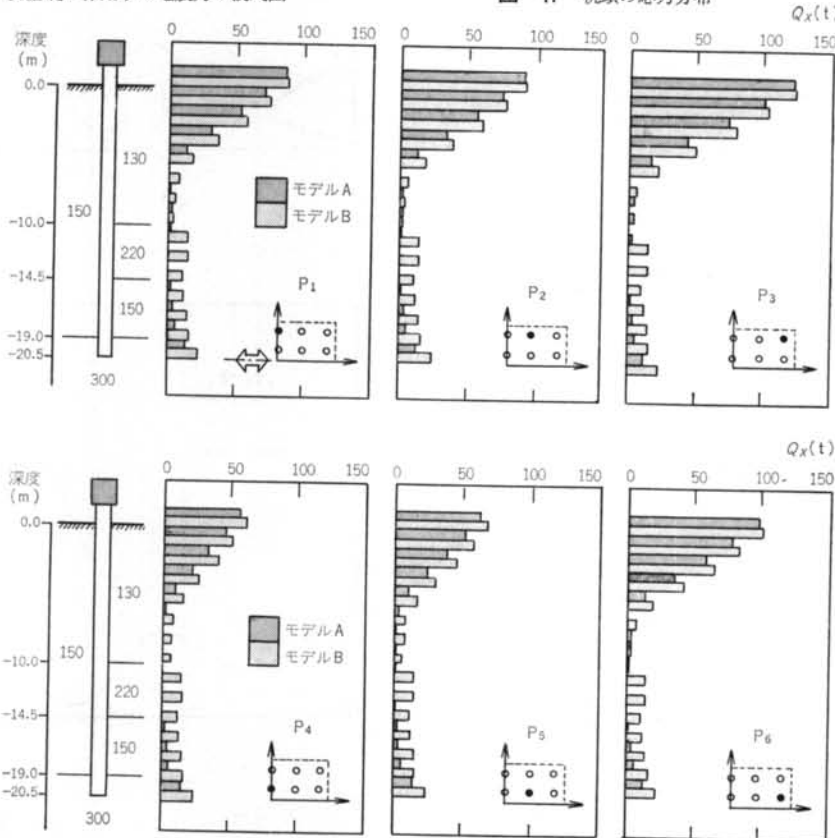


図-15 杭長方向最大応答せん断力分布

なりばらつきのあることが分かる。図-17には、杭頭応力分布をせん断力と曲げモーメントについてそれぞれ示した。これによると、コーナー杭は中央杭に対しせん断力で約2倍、曲げモーメントで1.5~2.0倍の荷重分担となっている。杭頭部におけるこれらの傾向は従来指摘されているところ¹⁷⁾、現行の耐震規定はこの点を反映したもになっている。

ところで、図-15、16に示した杭の応力分布をさらに子細に検討してみると、本解析のように支持杭を対象とする場合、杭先端は支持層にいくらかの根入れを有するため、杭先端においても設計上無視し得ない応力集中が見られる。これは、明らかに地盤振動の影響によるもので、特に4層地盤（モデルB）の場合には、中間層を挟むことにより2層地盤（モデルA）に比べ地盤の増幅度がさらに複雑になるため、層境界付近においてもこの影響による応力集中が目立つ。このように、杭の地震時応力には地盤振動の影響も含まれるため、地盤構造によって杭の応力分布はかなり異なることが予想される。事実、モデルAとBとでは杭中央部でこの違いが現われており、建物の地震時挙動において地盤構造の影響が軽微

であったことは対照的といえる。

以上の検討から、地盤構造が複雑になると地盤振動の影響が杭の地震時応力に占める割合も大きくなることが分かった。ところが、図-15、16に示した杭の応力には建物の慣性力による影響も含まれているため、同図から地盤振動の影響を定量的に把握することは困難である。そこで、この影響による応力量のみを抽出するため、解析モデルから建物を取り除き、基礎を無質量として地震応答解析を行ない、杭に生じる地震時応力を建物の慣性力により生じる応力量と動土圧により生じる応力量とに分けて検討してみる。このような解析を行なえば、杭自体の慣性力は含まれるものの、この影響は小さいと考えられるから、ほぼ動土圧のみによる応力量を抽出することができる。解析結果を、建物がある場合との比較で図-18に示す。なお、これは地盤振動の影響が顕著な例としてモデルBの場合についてのみ示した。同図より、杭頭部に生じる応力はほぼすべて建物の慣性力によるものであり、杭端部の応力はほぼすべてが動土圧により生じたものであることが分かる。また、動土圧により生じる応力量はコーナー杭と中央杭でほぼ等しく、地盤振動の

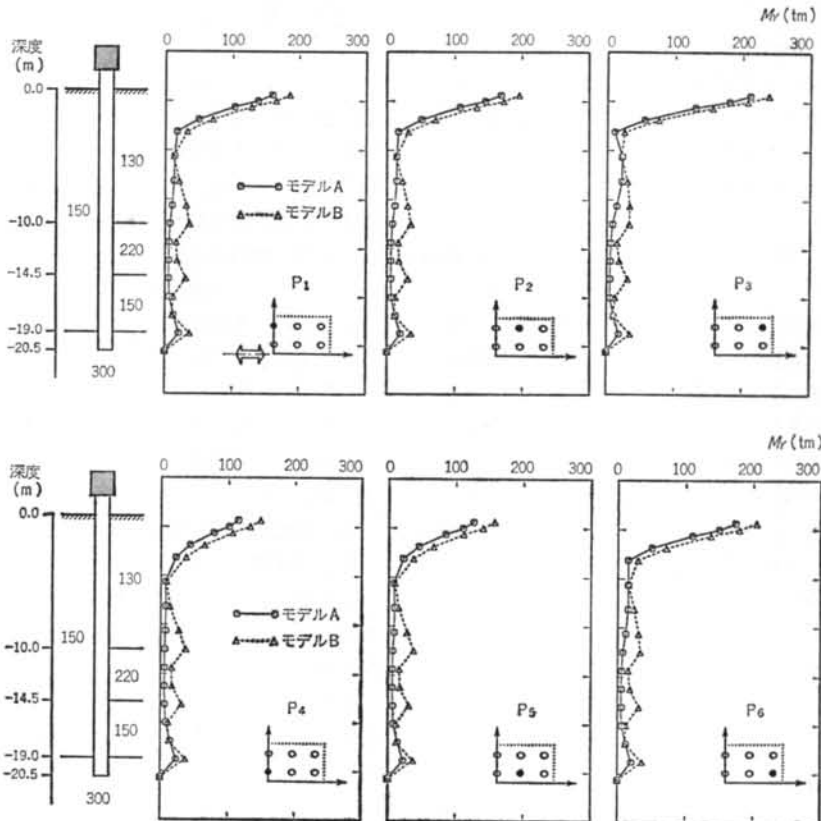
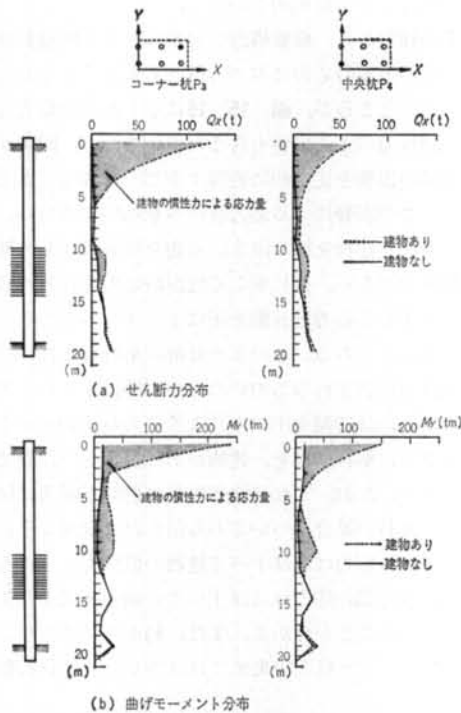


図-16 杭長方向最大応答曲げモーメント分布

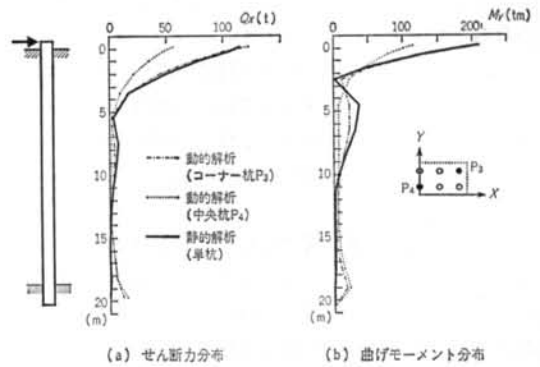


図一18 建物の慣性力と動土圧の影響
影響は各杭にほぼ均等に働くといえる。

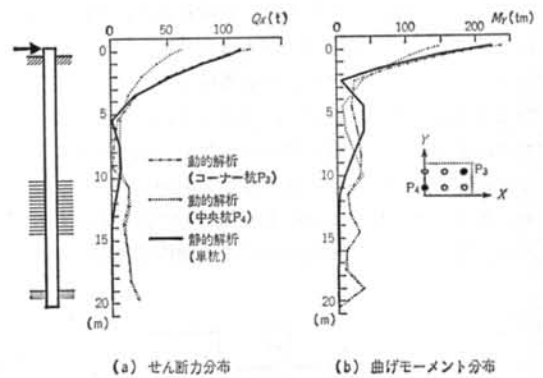
次に、設計面からの検討を加えるため、本解析より得られたベースシャーを外力として単杭の静的解析¹⁸⁾を行ない、これと本動解とを比較してみる。解析結果を、地盤モデルAとBについてそれぞれ図一19、20に示す。これを見ると、慣性力の影響が支配的な杭頭部では静的解と本動解とは良い対応を示すことが分かる。とくに、荷重分担率の一番大きなコーナー杭で両者は良い一致を示すことから、慣性力に関する限り、静的解析によっても設計的には安全側の評価が可能といえる。しかしながら、静的解析では地盤振動の影響まで考慮し得ないため、この影響が支配的となる地盤層境界部では両者の差異は明確となる。とくに、4層地盤の場合にはこれが顕著な差となって現われており、杭の耐震設計においてこの差の持つ意味は大きいといえよう。以上の検討から、杭の耐震設計において地盤振動の影響は欠くべからざるものであり、この影響を適切に反映した動的解析の重要性が示唆される。

§ 4. おわりに

本論文は、杭基礎の耐震設計における基礎的な検討を



図一19 静的解析と動的解析の比較 (地盤モデルA)



図一20 静的解析と動的解析の比較 (地盤モデルB)

目的として、まず成層地盤における群杭効果を考慮した構造物一杭一地盤系の三次元振動解析手法を紹介し、次にこの手法を適用して杭基礎建物の地震応答解析を行ない、建物の地震時挙動と杭の地震時応力とについて論じた。とくに、杭の地震時応力については設計面からの示唆も含めた。本研究を通して得られた知見は、以下のようによまとめることができる。

解析手法に関し、

(1)本解法は構造物一杭一地盤系の解析において、地盤の成層性と群杭効果をとともに考慮できる点で有効な手法である。

杭の地震時応力に関し、

(2)上部構造の慣性力による影響は杭頭に集中して大きく、このため耐震設計上は杭頭での応力がまず問題となるが、これについては静的解析によっても安全側の評価が可能である。

(3)地盤の成層状況によっては、地盤の変形に伴い動土圧が杭に大きな地震外力として作用し、地盤層境界部に設計上無視し得ない応力集中をもたらす。杭の耐震設計において地盤振動の影響は欠くべからざるものであり、この影響を適切に反映した動的解析による評価の重要性

は高い。

今後は地震時における地盤振動の影響を、いかに簡易

的な方法で杭の耐震設計へ取り入れていくかが重要な課題となろう。

〈参考文献〉

- 1) 岸田英明：“杭基礎の地震時における挙動と被害例” カラム No.78 (1980年)
- 2) 水野二十一：“杭基礎の震害” 基礎工 (1982年)
- 3) H. Mizuno: “Pile Damage during Earthquake in Japan (1923~1983) (Proc. of Symposium on Dynamic Response of Pile Foundations)” ASCE Geotechnical Special Publication, No.11 (1987) pp. 53~78
- 4) 田藏隆他：代表例として“軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究” 清水建設技術研究所研究報告書, LR-85-5916 (1986年)
- 5) J. Penzien, C. F. Scheffery & R. A. Parmelee: “Seismic Analysis of Bridges on Long Piles” Journal of Engineering Mechanics Div., ASCE, Vol. 90, No.EM3 (1964) pp. 223~254
- 6) M. Novak: “Dynamic Stiffness and Damping of Piles” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 4 (1974) pp. 574~598
- 7) 清水信行他：“薄層要素法による単杭で支持された構造物の相互作用解析” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1978年) pp. 697~698
- 8) H. Tajimi: “A Contribution to Theoretical Prediction of Dynamic Stiffness Surface Foundations” Proc. 7th WCEE, Vol. 5 (1980) pp. 105~112
- 9) G. Waas: “Dynamisch belastete Fundamente auf geschichtetem Baugrund” VDI-Berichte, No. 381 (1980) pp. 185~189
- 10) E. Kausel: “An Explicit Solution for the Green Function for Dynamic Loads in Layered Media” Department of Civil Engineering, M. I. T., Research Report, R81-13 (1981)
- 11) 田治見宏, 泉川正裕：“点加振3次元薄層法による埋込マット基礎の振動解析” 第6回日本地震工学シンポジウム講演集 (1982年) pp. 1745~1752
- 12) E. Kausel & R. Peek: “Boundary Integral Method for Stratified Soils” Department of Civil Engineering, M. I. T., Research Report, R82-50 (1982)
- 13) G. Waas & H.G. Hartmann: “Analysis of Pile Foundations under Dynamic Loads” Trans. 6th SMiRT, K5/2 (1981)
- 14) J. P. Wolf & G. A. von Arx: “Impedance Functions of a Group of Vertical Piles” Speciality Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE (1978)
- 15) J. Lysmer: “Analytical Procedures in Soil Dynamics” Earthquake Engineering Research Center, University of California, Report No. EERC 78-29 (1973) pp. 23~30
- 16) S. W. Hull & E. Kausel: “Dynamic Loads in Layered Halfspaces” ASCE Engineering Mechanics Division Speciality Conference (1984)
- 17) 河村壮一：“構造物と地盤の動的相互作用の理論的背景(杭基礎)” 構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム論文集 (1985年) pp. 11~20
- 18) 岸田英明, 中井正一：“地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗” 日本建築学会論文報告集 第281号 (1979年) pp. 41~55

付録 薄層法による加振解

付図-1に示すような N 層からなる薄層モデルに、レーレー波またはラブ波タイプの表面波が伝搬する問題を考える。このとき、任意の振動数のもとで radiation condition を満足する離散的な波数および相当する波動モード形を、レーレー波に対し α_k ; $\{X\}_k$, $\{Z\}_k(k=1, 2, \dots, 2N)$, ラブ波に対し β_k ; $\{Y\}_k(k=1, 2, \dots, N)$ とすれば、薄層境界第 S 節面上の原点に正弦的な点加振力 (P_x, P_y, P_z) が作用したときの第 0 節面上の任意点に生じる変位 (u_x, u_y, u_z) は、次のように書ける (付図-2参照)。

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \cos 2\theta + V_2 & V_1 \sin 2\theta & V_4 \cos \theta \\ V_1 \sin 2\theta & -V_1 \cos 2\theta + V_2 & V_4 \sin \theta \\ V_3 \cos \theta & V_3 \sin \theta & V_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} \quad \dots\dots (付1)$$

ここに、

$$V_1 = -\frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{2N} \frac{\alpha_k^2}{D_{k\alpha}} X_{Sk} X_{Ok} F_1(\alpha_k r) + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^N \frac{1}{D_{k\beta}} Y_{Sk} Y_{Ok} F_1(\beta_k r)$$

$$V_2 = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{2N} \frac{\alpha_k^2}{D_{k\alpha}} X_{Sk} X_{Ok} F_2(\alpha_k r) + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^N \frac{1}{D_{k\beta}} Y_{Sk} Y_{Ok} F_2(\beta_k r)$$

$$V_3 = -\frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{2N} \frac{\alpha_k^2}{D_{k\alpha}} X_{Sk} Z_{Ok} F_3(\alpha_k r); \quad V_4 = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{2N} \frac{\alpha_k^2}{D_{k\alpha}} Z_{Sk} X_{Ok} F_3(\alpha_k r)$$

$$V_5 = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{2N} \frac{\alpha_k^2}{D_{k\alpha}} Z_{Sk} Z_{Ok} F_3(\alpha_k r); \quad F_1(z) = -\frac{2}{z^2} - i \frac{\pi}{2} H_2^{(2)}(z)$$

$$F_2(z) = -i \frac{\pi}{2} H_0^{(2)}(z); \quad F_3(z) = -i \frac{\pi}{2} H_1^{(2)}(z); \quad H_\nu^{(2)} = \text{第2種 } \nu \text{ 次のハンケル関数}$$

$$D_{k\alpha} = \alpha_k^2 [X]_k^T [A_P] \{X\}_k + \alpha_k^2 [Z]_k^T [A_S] \{Z\}_k - \{X\}_k^T ([G_S] - \omega^2 [M]) \{X\}_k - \{Z\}_k^T ([G_P] - \omega^2 [M]) \{Z\}_k; \quad D_{k\beta} = \{Y\}_k^T [A_S] \{Y\}_k$$

$$[A_S]^e = \frac{GH}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}; \quad [G_S]^e = \frac{G}{H} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad [M]^e = \frac{\rho H}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$[A_P]^e = \frac{(\lambda + 2G)H}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}; \quad [G_P]^e = \frac{\lambda + 2G}{H} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad H = \text{層厚}$$

$[A_S]$ = 層要素マトリックス $[A_S]^e$ を各層について重ね合わせた全体マトリックス (他の表記も同様)

上記の点加振の場合、加振点自身の変位は発散となるので、これについてはリング加振または等分加振により評価する。リング加振の場合は式(付1)を半径 r_0 の杭周方向に1周積分し、等分布加振の場合には杭断面について面積積分することにより、それぞれ次のように導くことができる。

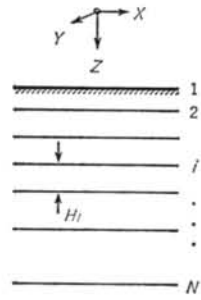
$$\text{リング加振解: } \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} V_2(r=r_0) & & \\ & V_2(r=r_0) & \\ & & V_3(r=r_0) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} \quad \dots\dots (付2)$$

$$\text{等分布加振解: } \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} V_6(r=r_0) & & \\ & V_6(r=r_0) & \\ & & V_7(r=r_0) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} \quad \dots\dots (付3)$$

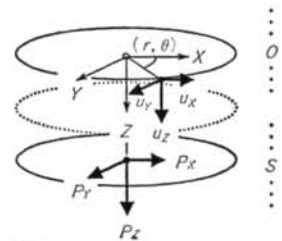
ここに、

$$V_6 = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{2N} \frac{\alpha_k^2}{D_{k\alpha}} X_{Sk} X_{Ok} F_4(\alpha_k r) + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^N \frac{1}{D_{k\beta}} Y_{Sk} Y_{Ok} F_4(\beta_k r)$$

$$V_7 = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{2N} \frac{\alpha_k^2}{D_{k\alpha}} Z_{Sk} Z_{Ok} F_4(\alpha_k r); \quad F_4(z) = -i \frac{\pi}{z} H_1^{(2)}(z)$$



付図-1 薄層モデル



付図-2 式(付1)における加振点と受振点の幾何学的関係