

動的サブストラクチャー法による埋込みを有する構造物の簡易地震応答解析

市川 隆之 (大崎研究室) 廣谷 勉 (原子力設計部)

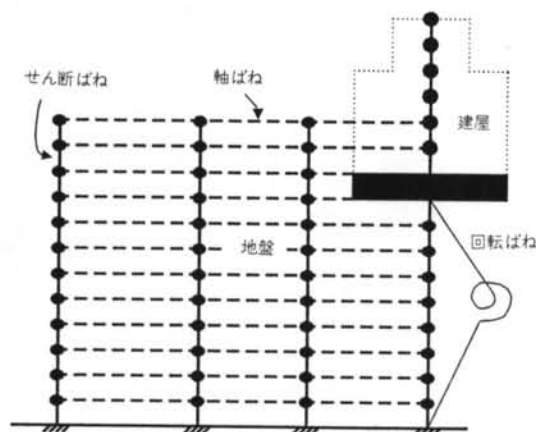
中井 正一 (大崎研究室) 室井 一夫 (原子力設計部)

渡辺 孝英 (大崎研究室)

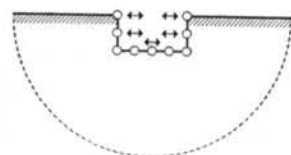
§ 1. はじめに

構造物—地盤系の地震応答解析手法は、一体解法と分離解法（サブストラクチャー法）に大別される。

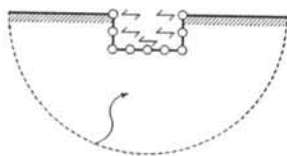
一体解法では、構造物—地盤系を一体のモデルとして解析地盤境界に入力（通常慣性入力）を与えることにより、地盤系の応答と同時に構造物系の応答も求める。一



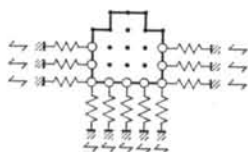
図—1 一体解法の例（格子型モデル）



ステップ1：地盤ばねの計算



ステップ2：入力動の計算

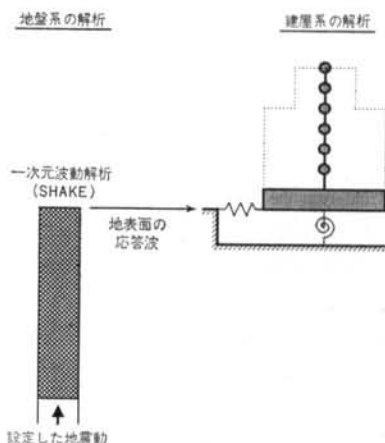


ステップ3：地震応答計算

図—2 動的サブストラクチャー法

般に大自由度のモデルとなるため、大きな計算機容量と膨大な演算時間を要するが、地盤の不整形性、地盤定数の局所の変化、埋込み形状などを厳密にモデル化することができる。一体解法の例としては、原子力発電所の耐震解析に用いられる、いわゆる格子型モデルなどがある（図—1）。一方、サブストラクチャー法では構造物—地盤系を構造物系と地盤系とに分離し、別々にこれを解析する（図—2）。したがって、構造物系と地盤系のそれぞれに適した解法を用いることができ、また一体解法と比較して自由度の小さなモデルを解析できるという利点を有している。従来より、埋込みがないか、または埋込みが浅い原子炉建屋の地震応答解析に用いられてきたスウェイ・ロッキングモデルはサブストラクチャー法による例である（図—3）。この場合には、地盤ばね、入力動として地表面のものをを用いることができるので、主として解析解の利用などにより明快かつ簡易なモデル化が可能であった。

これに対して、深い埋込みを有する構造物の地震応答解析に対してサブストラクチャー法をそのまま適用すると、地盤ばね、入力動の算定がかなり煩雑な解析となる。このため、地盤ばねおよび入力動のそれぞれについて、



図—3 従来のスウェイ・ロッキングモデル

簡略な取扱い方法の模索がなされてきた¹⁾²⁾など。

本研究は、これらの研究状況をふまえ、深い埋込みを有する建屋のスウェー・ロッキングモデルによる地震応答解析の可能性を検討する。まず、スウェー・ロッキングモデルの理論的背景となる切欠き型（構造物と地盤の接触面で両者を分離するタイプ）動的サブストラクチャー法の分類と体系化を行ない、数値的な検討を加える。次に、主として設計の観点から合理的かつ簡便な地盤ばね、入力動の算定法を示し、標準的な原子力発電所の地震応答解析を通してその有効性を確認する。

§ 2. 切欠き型サブストラクチャー法の分類

動的サブストラクチャー法には種々のバリエーションがあるが、ここでは最も一般的な構造物と地盤の接触面における分離解法を考え、これを切欠き型サブストラクチャー法と呼ぶことにする。切欠き型サブストラクチャー法では、通常切欠きを有する地盤が解析対象となる。一般に、切欠き地盤の解析は煩雑であるため、その代替手法がいくつか提案されている³⁾など。ここでは、これら切欠き型のサブストラクチャー法を体系化すると同時に、切欠きのない地盤の解析が有効に利用できることを示す⁴⁾。

2.1 基本的定式化（タイプⅠ）

図-4に示すような構造物-地盤系①を考え、この系の絶対変位を $\{u\}$ とする。このとき、構造物-地盤系①の運動方程式は次式で表される。

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sc} & 0 \\ M_{cs} & M_{cc}^s + M_{cc}^g & M_{cg} \\ 0 & M_{gc} & M_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} & 0 \\ K_{cs} & K_{cc}^s + K_{cc}^g & K_{cg} \\ 0 & K_{gc} & K_{gg} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots(1)$$

ここに、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックスであり、添字 S 、 C 、 G はそれぞれ構造物系、接触面および地盤系に関する自由度であることを表す。式(1)は周波数領域における運動方程式であり、 ω は円振動数である。

いま、構造物-地盤系①を構造物と地盤との接触面に沿って、構造物系②と地盤系③とに分離する。両者の接触面には相互作用に伴う力が働いており、これを $\{f_c\}$ とする。そうすると、式(1)は次の2式に分離することができる。

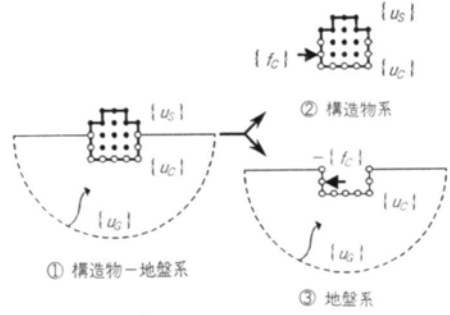


図-4 構造物-地盤系の分離

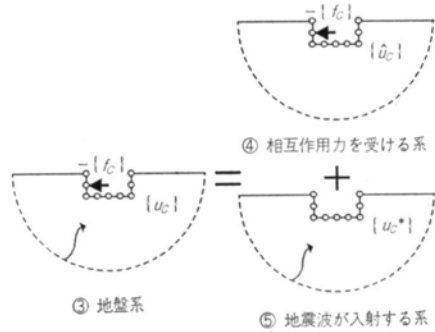


図-5 重ね合わせの原理

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sc} \\ M_{cs} & M_{cc}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc}^s \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_c \end{Bmatrix} \quad \dots(2)$$

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} M_{cc}^g & M_{cg} \\ M_{gc} & M_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{cc}^g & K_{cg} \\ K_{gc} & K_{gg} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u_c \\ u_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -f_c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots(3)$$

式(2)は構造物系②の、式(3)は地盤系③の運動方程式である。

次に、地盤系③の絶対変位 $\{u\}$ について考える。弾性論の重ね合わせの原理を用い、相互作用力を受ける系④の絶対変位を $\{\hat{u}\}$ 、入射波を受ける系⑤の絶対変位を $\{u^*\}$ とすると（図-5）,

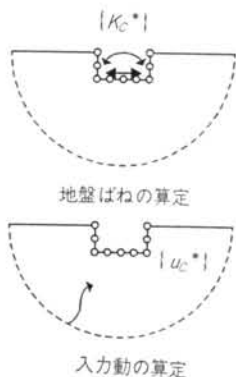
$$\{u\} = \{\hat{u}\} + \{u^*\} \quad \dots(4)$$

また、相互作用力を受ける系④、入射波を受ける系⑤の運動方程式はそれぞれ、

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} M_{cc}^g & M_{cg} \\ M_{gc} & M_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{cc}^g & K_{cg} \\ K_{gc} & K_{gg} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \hat{u}_c \\ \hat{u}_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -f_c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots(5)$$

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} M_{cc}^g & M_{cg} \\ M_{gc} & M_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{cc}^g & K_{cg} \\ K_{gc} & K_{gg} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u_c^* \\ u_g^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots(6)$$

となる。式(6)を $\{f_c\}$ について解き、式(4)を考慮すると、



図—6 切欠き地盤の解析

$$\{f_c\} = -[K_c^*]\{u_c\} - \{u_c^*\} \quad \dots\dots(7)$$

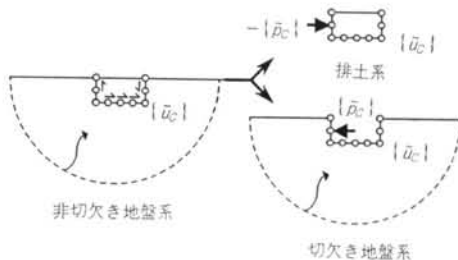
$$\begin{aligned} [K_c^*] = & -\omega^2[M_{cc}^g] + [K_{cc}^g] - (-\omega^2[M_{cc}^g] \\ & + [K_{cc}^g])(-\omega^2[M_{gg}^g] + [K_{gg}^g])^{-1} \\ & \times (-\omega^2[M_{gc}^g] + [K_{gc}^g]) \end{aligned} \quad \dots\dots(8)$$

が得られる。

$[K_c^*]$ は、切欠き地盤の接触面におけるインピーダンスマトリックスと呼ばれ、フルマトリックスの地盤ばねに相当する。 $[K_c^*]$ は式(8)から求めることもできるが、接触面の各自由度に単位の加振力を作用させて得られるコンプライアンスマトリックス(柔性行列)の逆マトリックスとして計算するのが一般的である。一方、 $\{u_c\}$ は入力動(またはインプットモーション)と呼ばれ、切欠き地盤に地震波が入射したときの接触面における応答変位を表わす(図—6)。

式(7)で $\{u_c\} = \{0\}$ のときの左辺を $\{f_c^*\}$ と表わすと、

$$\{f_c^*\} = [K_c^*]\{u_c^*\} \quad \dots\dots(9)$$



図—7 切欠きのない地盤の分離

となる。 $\{f_c^*\}$ は、空間的に固定された切欠き部分に作用する力であり、ドライビングフォースと呼ばれる。

式(7)を式(2)に代入すると、

$$\begin{pmatrix} -\omega^2[M_{ss} & M_{sc}] \\ M_{cs} & M_{cc}^s + K_c^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_s \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ f_c^* \end{pmatrix} \quad \dots\dots(10)$$

$$\{f_c^*\} = [K_c^*]\{u_c^*\}$$

が得られる。これが最終的に解くべき、基本となる方程式である(表—1のタイプI)。

2.2 切欠きのない地盤の解析の利用

前節で示された基本式を解く場合には、切欠き地盤の地盤ばね $[K_c^*]$ と切欠き地盤の入力動 $\{u_c^*\}$ を用いるのが一般的である(図—6)。しかしながら、切欠き地盤の代わりに、切欠きのない地盤を用いてこれらを算定することもできる。ここでは、入力動と地盤ばねのそれぞれについて非切欠き地盤の解析を利用する方法を示し、その組み合わせについて考える。

(1) 入力動への非切欠き地盤解析の利用

図—7に示す切欠きのない地盤の分離を考える。図中の $\{p_c\}$ は、地中に発生している応力(仮想切欠き部の表面力)と釣合う外力である。これを逆向きに作用させれば図—6の切欠かれた状態が再現できることから、ドライビングフォース $\{f_c^*\}$ は、非切欠き地盤の入力動 $\{u_c\}$ と地中応力 $\{p_c\}$ を用いて次式で与えられる(表—1のタイプII)。

$$\{f_c^*\} = [K_c^*]\{u_c\} - \{p_c\} \quad \dots\dots(11)$$

$\{f_c^*\}$ は切欠き効果を再現する力であるから「切欠き力」と呼ぶことにする。なお、 $\sim$ 印は非切欠

タイプ	インピーダンス	入力動	ドライビングフォース	特徴
I			$f^* = K^* u^*$	切欠き地盤の解析が必要。あらゆる場合に適用可能
II			$f^* = K^* \bar{u} - \bar{p}$	入力動の計算が容易
III			$f^* = (\bar{K} - K^*) u^*$	不整形地盤など入力動を適切に評価する場合
IV			$f^* = \bar{K} \bar{u} - (\bar{K} - K^*) \bar{u} - \bar{p}$	切欠き地盤の解析が不要

表—1 切欠き型サブストラクチャー法の分類

き地盤の解析結果であることを示す。

(2)地盤ばねへの非切欠き地盤解析の利用

図一7で、分離面における排土系の地盤ばねを $[K_c^e]$ 、切欠きのない地盤の地中加振より得られる地盤ばねを $[\tilde{K}_c]$ とすれば、切欠き地盤の地盤ばね $[K_c^*]$ は次式のように求められる。

$$[K_c^*] = [\tilde{K}_c] - [K_c^e] \quad \cdots \cdots (12)$$

このとき、ドライビングフォースは次のようになる(表一1のタイプⅢ)。

$$\{f_c^*\} = ([K_c^*] - [K_c^e])\{u_c^e\} \quad \cdots \cdots (13)$$

(3)入力動および地盤ばねへの非切欠き地盤解析の利用

入力動、地盤ばねともに切欠きのない地盤のものを利用すると、地盤ばねおよびドライビングフォースはそれぞれ以下のようになる(表一1のタイプⅣ)。

$$[K_c^*] = [\tilde{K}_c] - [K_c^e] \quad \cdots \cdots (14)$$

$$\{f_c^*\} = ([K_c^*] - [K_c^e])\{u_c^e\} - \{\tilde{p}_c\} \quad \cdots \cdots (15)$$

また、これらより、

$$[K_c^*]\{u_c^*\} = [\tilde{K}_c]\{u_c^e\} \quad \cdots \cdots (16)$$

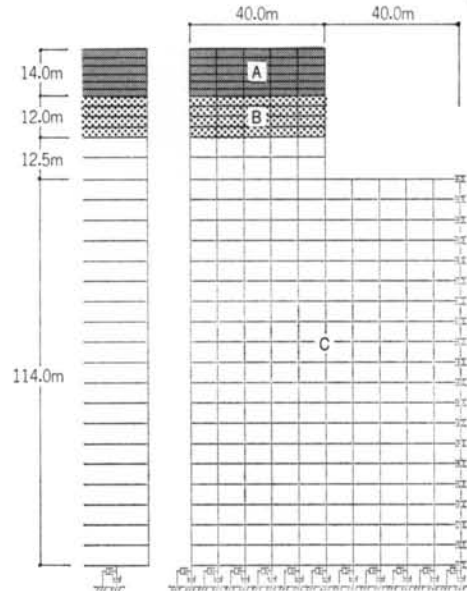
が導かれ、切欠き地盤のドライビングフォースと非切欠き地盤のドライビングフォースが等しいことが分かる。

2.3 各解法の特徴

以上をまとめると表一1のようになる。一般に、入力動の計算は成層地盤における解析解(一次元波動論など)の適用可能性を考えると、切欠きのない地盤を対象とする方が圧倒的に有利である。したがって、表一1の各タイプのうち、 $\{u\}$ を対象とするタイプⅡおよびⅣが潜在的に強力な手法といえる。一方、地盤ばねの計算については、非切欠き地盤解析の解析をベースとしたタイプⅢやⅣの方が厳密な解析は容易である。なぜなら、もしも地盤が成層地盤であれば、 $[\tilde{K}_c]$ の計算に地中点加振解が使用できるためである⁵⁾。ただし、排土の $[K_c^e]$ の計算には有限要素法などを用いる必要がある。これに対して切欠き地盤の $[K_c^*]$ の計算は、一般に煩雑ではあるものの、簡便な手法で近似的に求めることも可能である⁶⁾⁷⁾。また、地盤の不整形性の考慮なども容易である。目的に応じて使い分けののがよいと思われる。ここでは、タイプⅡをベースとした簡略手法を次節で述べる。

2.4 二次元モデルによる検討

建屋への入力について考える場合、入力動そのものをみるよりも、入力動と地盤ばねを含めて入力として建屋に作用する力、すなわちドライビングフォースの形でみることのほうが、建屋応答に与える影響という観点からはより直接的である。そこで、ここでは前述のサブスト



図一8 FEM モデル図

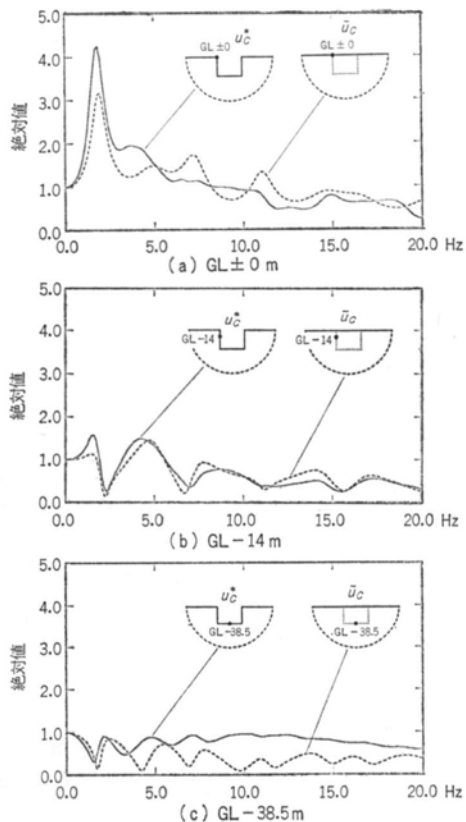
	A	B	C
$V_s(\text{m/s})$	125	250	500
$\gamma(\text{t/m}^3)$	1.8	2.0	2.0
ポアソン比 ν	0.4	0.4	0.45
減衰定数 h	0.03	0.03	0.02

表一2 地盤定数

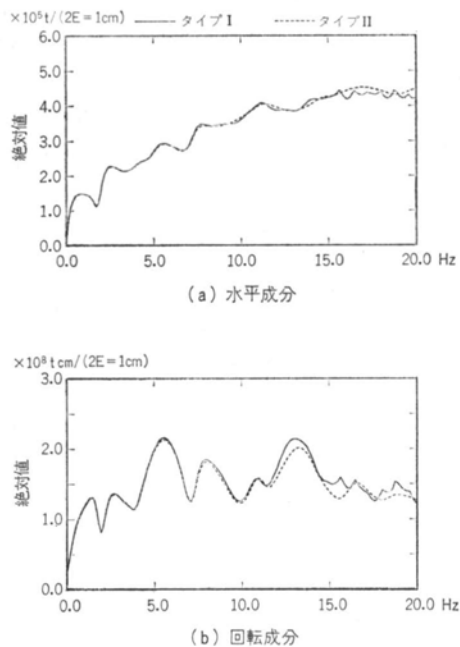
ラクチャー法のタイプによる入力の差、特性についてドライビングフォースで検討する。なお、ばねのみの検討として $[\tilde{K}_c]$ と $[K_c^e]$ による $[K_c^*]$ の計算も行なったが、結果は直接求めた $[K_c^*]$ にほとんど一致したので、ここでは示さない。

ドライビングフォースは、水平成分と回転成分の2自由度に集約した形で検討する。水平成分については個々の水平成分のドライビングフォースを合計して求める。回転成分については建屋底面の中心位置に集約することにし、個々の水平成分のドライビングフォースによる建屋底面中心回りのモーメントと、底面の回転成分のドライビングフォースの総和として求める。

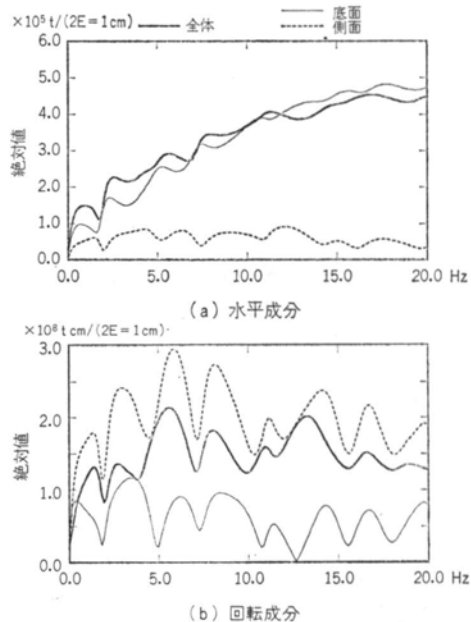
集約ドライビングフォースの算定を図一8に示す対象について行なった。地盤定数を表一2に示す。用いた解析手法は、 $[K_c^*]$ 、 $\{u_c^*\}$ については二次元 FEM (プログラム TERA⁸⁾)、 $\{u_c^e\}$ 、 $\{\tilde{p}_c\}$ は一次元波動論 (プログラム SHAKE) である。 $\{u_c^e\}$ および $\{u_c^e\}$ の比較を図一9に示す。 $\{u_c^e\}$ は切欠きのため、 $\{u_c^e\}$ とくらべて地表付近の増幅が大きくなっているのが分かる。ドライビングフォースを図一10～12に示す。図一10はタイプⅠ、Ⅱの比較で、解析手法の差がドライビングフォースに与える影響



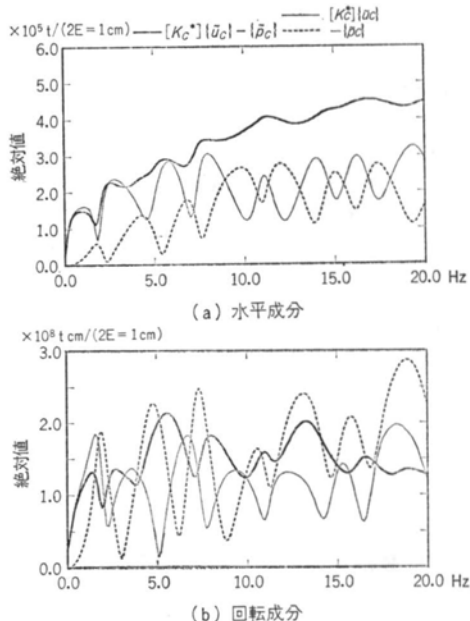
図—9 地盤の変位応答の比較(u_c^* と $\bar{u}_c$)



図—10 ドライビングフォース (タイプ I, II の比較)



図—11 ドライビングフォース $[K^*] \{u^*\}$ に対する側面と底面の寄与



図—12 ドライビングフォースに占める切欠き力 $-\{\bar{p}_c\}$ の比率

($[K_c^*] \{u_c^*\}$ と $[K_c^*] \{\bar{u}_c\} - \{\bar{p}_c\}$ との差) をみたものである。理論的には一致すべきものであるが、離散化誤差のため高振動数部分で差が生じていることが分かる。図—11は、タイプ I の集約ドライビングフォースに占める底面と側面の割合をみたものである。これより、全体とし

ては底面の占める割合が大きいことが分かる。また、図-12はタイプIIの場合に、 $\{u_c\}$ による項と $\{p_c\}$ による項がどの程度の割合になっているかをみたものである。両者の周波数特性は山谷が逆転していること、切欠き力 $\{p_c\}$ がかなり大きいことなどが分かる。

§ 3. 埋込みを考慮したスウェイ・ロッキングモデルによる地震応答解析

本章では、埋込みを有する構造物の簡易な地震応答解析について示す。地盤ばねの算定手法としてはFEMを基に簡易化したものと、解析的方法を利用したさらに簡易な手法の2通りについて示す。いずれの方法においても、地盤ばねは相互の連成を無視した独立ばねとして扱う。入力動の算定については、実用的と考えられるタイプIIのサブストラクチャー法に基づき、一次元波動論による自由地盤の変位応答 $\{u_c\}$ とともに切欠き力 $\{p_c\}$ も作用させる。一般に、建屋側面の摩擦力は解析上考慮されないことが多いため、この場合には底面のせん断力 $\{p_{cs}\}$ のみが考慮されることになる(図-13)。この力を「底面切欠き力」と、また $\{u_c\}$ と $\{p_{cs}\}$ を用いる入力の考えを「底面切欠き入力」と呼ぶことにする。以上

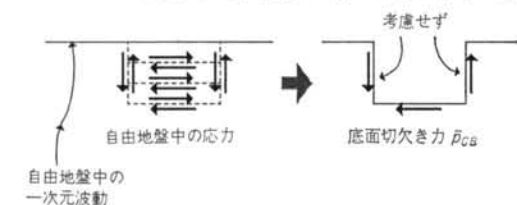


図-13 底面切欠き力

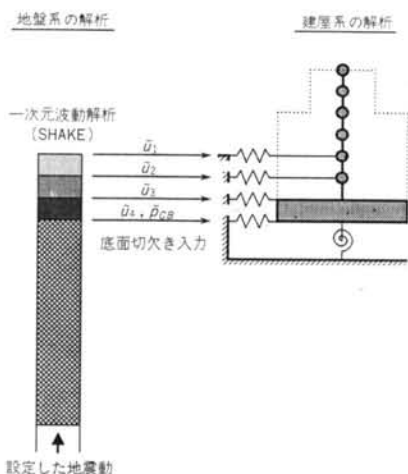


図-14 埋込み考慮のスウェイ・ロッキングモデル

の考え方をを用いた埋込みを考慮したスウェイ・ロッキングモデル(図-14)により地震応答解析を行ない、結果を比較検討する。

3.1 FEMによる地盤ばねの対角化

建屋周辺の埋戻し土の存在や、地盤定数の局所的变化を直接取込んだ解析を行なえることはFEM解析の大きな利点であるが、FEMによる地盤ばねは一般にフルマトリックス(連成ばね)で表わされるため扱いは煩雑である。しかし、時刻歴解析、特に地盤ばねの非線形性を考慮した解析への応用を考慮すると、独立ばねとして扱うのが望ましい。そこで、ここではFEMによる地盤ばねを対角化により簡易化することにする。具体的には、図-15に示すように建屋を剛と仮定し、その重心に集中荷重を作用させたときの各点の地反力と変位との比から独立ばねを作成する⁹⁾。

対角化の影響を見るため、3.4に示す二次元FEMモデルの基礎底面に集約した連成ばねと独立ばねの比較を図-16に示す。両者は全振動数範囲でよく一致しており対角化の影響は小さいことが分かる。

3.2 Novak ばねと振動アドミッタンスの利用

履歴減衰を含む全無限弾性体中の剛円筒が振動するときの抵抗係数(インピーダンス)が水平、上下、回転およびねじりの各成分に対して解析的に与えられている(Novakのばね)(図-17)⁶⁾⁷⁾。このばねの利点は、水平方向の地盤の無限性を表現できること、波動逸散が考慮されておりばねの実部とともに虚部も得られること、および解が陽な形で与えられており数値計算が容易であることなどである。そこで、側面ばねとしては地盤定数

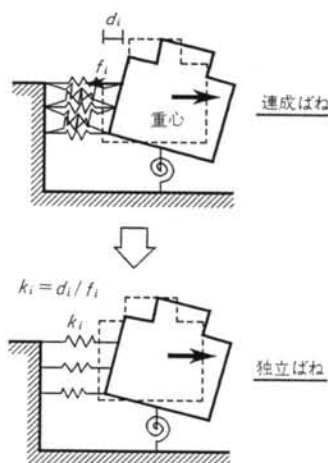
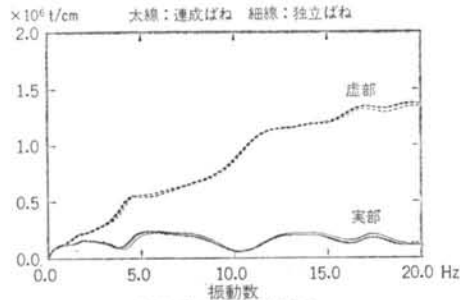
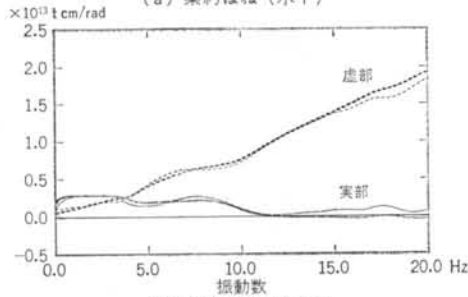


図-15 地盤ばねの対角比



(a) 集約ばね (水平)



(b) 集約ばね (回転)

図-16 地盤ばねの対角比の影響

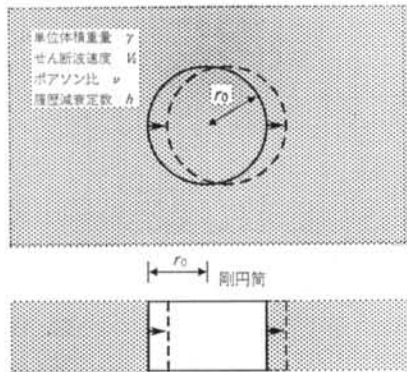


図-17 Novak ばね (水平成分)

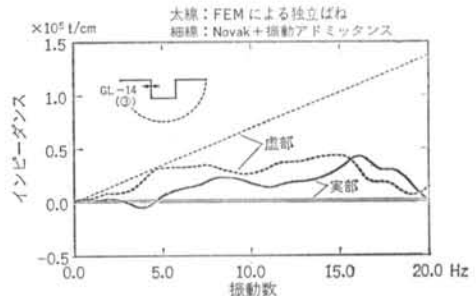
と支配厚さに対応した値をもつ Novak のばねを、建屋埋込み部側面の各階床位置に取り付けることにする¹⁰⁾。通常、原子炉建屋の平面は正方形に近いので、Novak ばねの算定には面積等価置換を用いればよい。タービン建屋など縦横の長さが異なるときは、適切な等価半径 (例えば見付け幅をとるなど) を決めることになる。なお、円形以外の任意形状の断面のばねはそのまま解析的に求めることはできないが、境界要素法などを用いて求めることは可能である。

底面ばねとしては、従来行なわれてきたのと同様に解析解を利用することにし、埋込みを無視して建屋底面以下の地盤からなる半無限弾性体上の基礎の動的コンプライアンスの逆数 (以下、振動アドミタンスと呼ぶ) を用いる¹¹⁾。多層地盤上のコンプライアンスを用いること

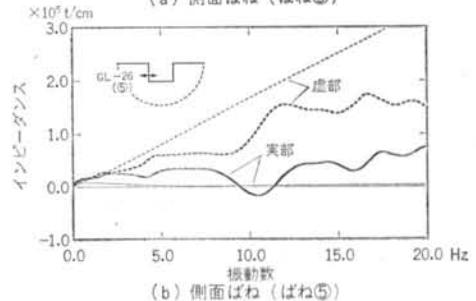
もできるが¹²⁾、基礎下地盤の V_s (せん断波速度) のコントラストが小さいときには、成層補正による等価 V_s をもつ一様地盤として扱うことができる¹³⁾。

3.3 地盤ばねの比較

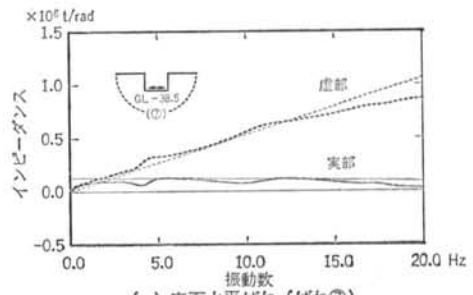
3.4に示す解析対象について、二次元 FEM による独立ばね (3.1) と、Novak ばね+振動アドミタンスばね (3.2) の比較を図-18に示す。これらの図より、ま



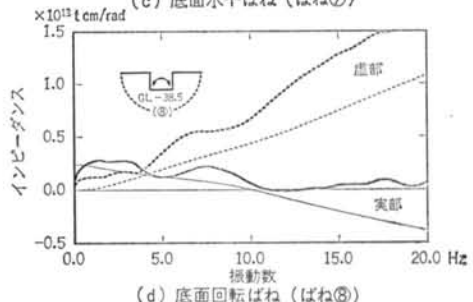
(a) 側面ばね (ばね③)



(b) 側面ばね (ばね⑤)

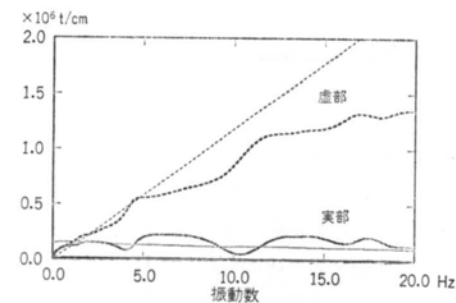


(c) 底面水平ばね (ばね⑦)

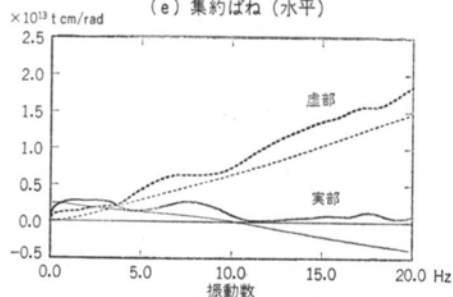


(d) 底面回転ばね (ばね⑨)

図-18 地盤ばねの比較



(e) 集約ばね (水平)



(f) 集約ばね (回転)

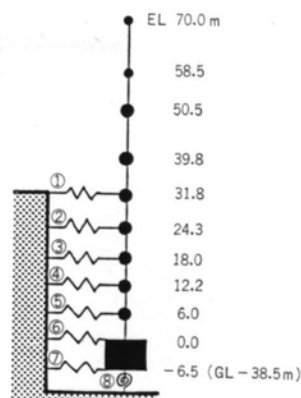
図一18 地盤ばねの比較

ず側面ばねについては Novak ばねの実部は FEM による値に比べてやや小さめであるが、虚部は低振動数域でほぼ一致することが分かる。高振動数域では両者にかんりの差が生じているが、この範囲では FEM による解の精度は比較的低いことに注意する必要がある。一方、底面水平ばねについては振動アドミタンス (+Novak ばね) による値と FEM による値はおおむね一致しているとみてよい。底面の回転ばねは、FEM による結果の方が虚部がやや大きめである。最後に、これらを基礎底面位置に集約したばねについてみると、水平・回転ともにおおまかな傾向はほぼ対応していることが分かる。ただし、低振動数部については、FEM によるばねは Novak ばね + 振動アドミタンスばねに比べて等価な減衰が大きいといえる。

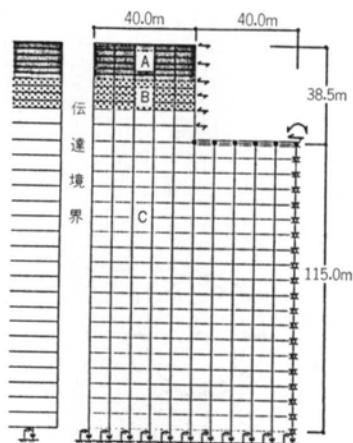
3.4 地震応答解析

本節では、埋込みを考慮したスウェイ・ロッキングモデルによる地震応答解析例を示す。二次元 FEM による独立ばね (3.1) による場合と、Novak ばね + 振動アドミタンスばね (3.2) による場合とを比較する。併せて二次元 FEM による解析 (表一のタイプ I) も行ないこれらと比較する。なお、Novak ばね + 振動アドミタンスばねにおいては履歴減衰は考慮しない。また、振動アドミタンスは剛版仮定とする。

解析対象は、埋込み深さ 38.5m の BWR MARK II 型原子炉建屋である。埋込み考慮のスウェイ・ロッキング



図一19 建屋モデル



図一20 二次元 FEM 地盤モデル

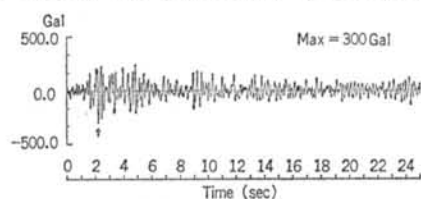
モデル、二次元 FEM とも解析はサブストラクチャー法を用い、振動数領域で行なう。建屋モデルを図一19に示す。地盤の FEM モデルを図一20に、また地盤定数を表一2に示す。入力波には、大崎スペクトルを用いて作成したマグニチュード 7.0、震央距離 20km の人工地震波を用いる (図一21)。

得られた建屋応答のうち、図一22に最大応答加速度、最大応答せん断力、最大応答モーメントを、また図一23に床応答スペクトル (減衰定数 1%) をそれぞれ示す。最大応答加速度はいずれのモデルによってもほぼ同程度の値となっているが、せん断力とモーメントには若干差が現れている。Novak ばね + 振動アドミタンスばねを用いた埋込み考慮のスウェイ・ロッキングモデルは、他の 2 つに比べて 1~2 割大きめの応力となっている。FEM に基づく独立ばねを用いた埋込み考慮のスウェイ・ロッキングモデルと FEM モデルの差は比較的小さい。連成ばねを対角化することにより、スウェイ・ロッキングモデルでは回転成分の入力がなくなっているが、

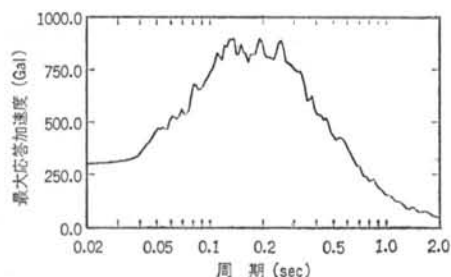
その影響はそれほど大きくないものと判断される。床応答スペクトルについては、いずれの解析によっても周波数特性に大きな差を生じてはいない。ただ建屋上部(EL 50.5 m)の0.2秒付近にモデルの差が現れており、これは地盤ばねの特性の差に起因しているものと思われる。

§ 4. まとめ

1) 切欠き型サブストラクチャー法のパリエーションを示し、これを体系づけることができた。また、地盤解析について切欠きのない地盤の解析が有効に利用できるこ



(a) 加速度波形

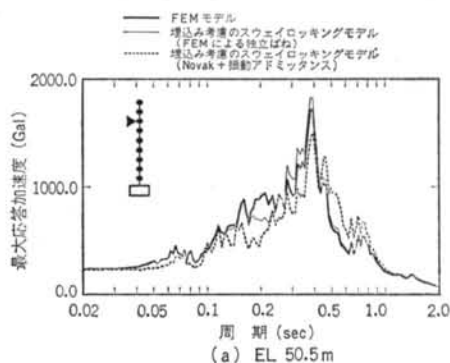


(b) 加速度応答スペクトル ($h=0.05$)

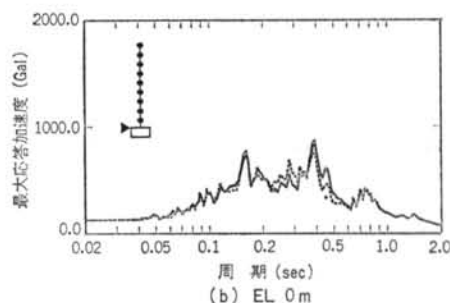
図-21 入力地震動

とを示した。ここに示した考え方を利用することにより、埋込みを有する構造物の簡易な地震応答解析が可能となる。

2) 埋込みを有する構造物の簡易な地震応答解析の具体化として、埋込み考慮のスウェイ・ロッキングモデルの考え方を示した。地盤ばねについては、二次元 FEM による地盤ばねを簡易化したばねを用いる方法と、側面に Novak ばね、底面に振動アドミッタンスばねを用い

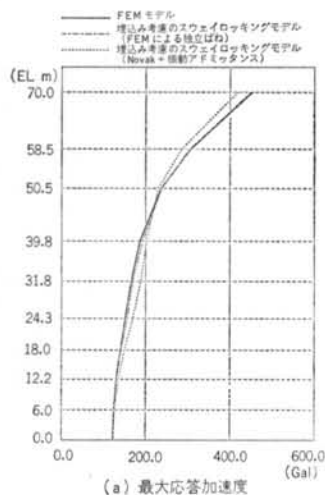


(a) EL 50.5m

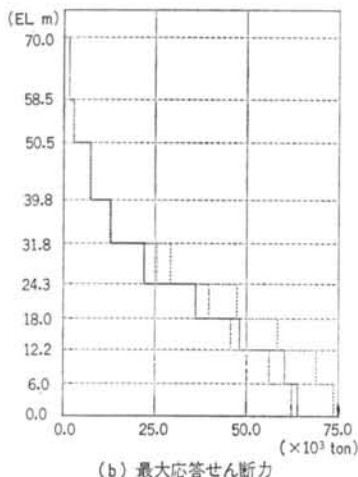


(b) EL 0m

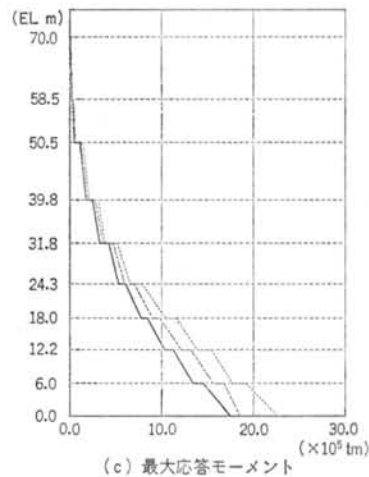
図-23 床応答スペクトル ($h=0.01$)



(a) 最大応答加速度



(b) 最大応答せん断力



(c) 最大応答モーメント

図-22 建屋の応答

る方法とを用いた。また、入力動の算定については、一次元波動論による変位応答およびせん断力を用いる底面切欠き入力の手法を用いている。以上の簡易なモデルと二次元 FEM モデルで地震応答解析を行なった結果、今回のケースでは前者の方がやや大きめの応答を示した。

なお、今後は埋込み考慮のスウェイ・ロッキングモデルについて、三次元 BEM による地盤ばねの比較検討や

地震観測シミュレーションなどによる実証的検討を行なっていくほか、時刻歴での非線形解析への応用についても検討を行なう予定である。

謝辞 Novak ばねの算定などについて、大崎研究室の吉田一博氏に協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

＜参考文献＞

- 1) 市川他：“埋込みを有する構造物の設計入力地震動に関する考察”日本地震工学シンポジウム講演集(1982年) pp.1433~1439
- 2) 長谷川他：“動的サブストラクチャー法による埋めこみを有する構造物の時刻歴地震応答解析(その1),(その2)”日本建築学会大会学術講演梗概集(1984年) pp.759~762
- 3) J.P.Wolf: “Dynamic Soil-Structure Interaction, Chap. 3” Prentice-Hall (1985)
- 4) 中井他：“切欠き型サブストラクチャー法の分類と適用(その1),(その2)”日本建築学会大会学術講演梗概集(1985年) pp.349~352
- 5) 長谷川他：“薄層法による2次元点加振解の誘導とその応用”同上(1983年) pp.785~786
- 6) M.Novak et al.: “Dynamic Soil Reaction for Plane Strain Case” Reserch Report, BLWT-1-77, Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario (June, 1977) pp.1~26
- 7) M.Novak et al.: “Dynamic Soil Reaction for Plane Strain Case” Proc. of ASCE, EM 4, (1978) pp.953~959
- 8) 福和他：“FEM による構造物地盤系連成解析システム”第6回電子計算機利用シンポジウム論文集(1984年) pp.85~90
- 9) 市川他：“埋込みを有する構造物の時刻歴地震応答解析”日本建築学会大会学術講演梗概集(1985年) pp.785~786
- 10) H.Tanaka et al.: “Forced Vibration Test of a Reactor Building and its Analytical Studies” Proc. 8th WCEE, Vol.6 (1984) pp.985~992
- 11) 川瀬他：“境界要素法による地表面上剛基礎の相互作用連成解析”清水建設研究報告 Vol.39 (1984年4月) pp.11~22
- 12) 吉田他：“境界要素法を用いた剛基礎—地盤相互作用解析(その3),(その4)”日本建築学会大会学術講演梗概集(1984年) pp.721~724
- 13) 田治見宏他：“地震工学”彰国社 pp.74~79