

氏 名	源 栄 正 人
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 63 年 2 月 10 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 52 年 3 月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	埋込み構造物と地盤の動的相互作用解析に関する 研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 柴田 明德      東北大学教授 和泉 正哲 東北大学教授 平井 和喜

## 論 文 内 容 要 旨

エネルギー関連の発電用大型構造物の耐震設計の合理化のために、構造物自身や内蔵する重要機器の地震応答量をできるだけ低減させることが重要となり、そのための一方法として構造物を地盤中に埋込む方法があげられる。この場合、産業施設としての重要性、および重要機器を内蔵するという機能上の重要性の両面から、高振動数領域に及ぶ地震応答性状を、地盤と構造物の動的相互作用を考慮して正しく評価することが極めて重要となる。そのために、地盤の 3 次元性や埋込み部の柔性を考慮した埋込み構造物－地盤連成系の動的性状を正確に反映しうるより精密な数理モデルによる検討が強く要請されている。このような観点から構造物と地盤の相互作用解析に関する従来の研究をみると、地表面に設置された構造物に対してはその動的特性はかなり解明されている。しかし、埋込みを有する場合の動的特性については実際問題からの要求に即した十分な知見を与えているとはいえず、さらに、非線形性を考慮した動的性状を解明するための解析法についての検討も十分とはいえない。

本研究の目的は、(1)埋込み構造物と地盤の 3 次元動的相互作用に関し、埋込み基礎の動的地盤剛性や基礎入力地動、および構造物の応答に対する埋込み効果の基本特性を明らかにすること、(2)埋込み部の 3 次元形状や柔性を考慮した構造物と地盤の連成解析による発電用大型構造物の高振動数領域に及ぶ 3 次元地震応答性状を検討すること、(3)強震時に予測される非線形問題への発展を考慮し、非線形構造物－地盤連成系の地震応答解析法を検討すること、の 3 点であり、発電用の大型構

造物の耐震設計の合理化・高度化のために、構造物と地盤の動的相互作用に関する今日の多くの工学的問題を解決しようとするものである。

本論文は全編7章より構成されている。

## 第1章 緒 論

本研究の目的、意義、研究方法を述べるとともに、本研究に関連する既往の研究について概観し、その成果と問題点を示している。

## 第2章 基礎理論

本研究における解析手法の基礎理論として、境界要素法を埋込み構造物と半無限弾性地盤の3次元動的相互作用解析へ適用する方法について述べている。

先づ、加振問題と入射問題に対する境界積分方程式を誘導し、次に、半無限弾性体の内部点加振解である Green 関数を 3次元弾性体の波動伝播に関する妹沢の一般解に基づき、有限円板加振の極限として点加振解をもとめる Lamb の方法を適用して誘導している。この方法により得られた波数に関する無限積分として表現された Green 関数の数値解析法について、特異点を含む被積分関数に対して特異点回りの処理と収束性を早めるための処理を行って数値積分する方法ばかりでなく、被積分関数に対応する特有の複素関数を導入し、コーシーの積分定理を適用して有限積分化して積分する方法、さらに地盤に減衰を仮定して一般のハンケル変換を2重フーリエ変換に置換した後、通常の高速フーリエ変換アルゴリズムを適用する方法が述べられている。

また、境界積分方程式を離散化して境界上の力と変位の関係を導く際に問題となる、Green 関数の  $R \rightarrow 0$  における特異項の取り扱い方が示されている。特に、半無限弾性体の Green 関数の特異項は全無限弾性体の Green 関数の特異項に帰着され、しかも静的解の特異項に帰着されることを示し、変位解の  $1/R$  の特異項の処理については、特異点を含む要素内積分法としてサブ要素に分割して積分する方法を示すとともに、表面力解の  $1/R^2$  の特異項の処理は剛体移動許容条件を用いることにより回避できることを示している。

## 第3章 埋込み構造物と地盤の3次元動的相互作用に関する基本特性解析

先づ、従来の理論解析では得られなかった半無限弾性体に埋め込まれた矩形剛基礎の加振問題と平面波入射問題の解としての動的地盤ばね特性と基礎入力地動特性を示し、さらに、これらの解を用いて周波数領域におけるサブストラクチュア法に基づいた解析手法により埋込み構造物の応答特性に及ぼす埋込み効果の検討を行っている。

次に、これらの結果を基本にして、2次元解析との比較による3次元効果、埋込み部の柔性の影響、埋込み部側面と地盤との境界条件の違いに着目した埋込み構造物の応答特性の検討を行っている。

埋込み基礎の動的地盤ばね特性に関しては、埋込み深さが増大するほど構造物を支持する地盤ばねとしての拘束効果と地下逸散減衰としての減衰量が増大することを種々の加振モードに対して定

性的かつ定量的に示し、埋込みによる応答の低下が期待できることを示し、さらに、2次元解析と3次元解析による比較により2次元解析では地盤ばねは弱めに評価され、地下逸散減衰は大きめに評価されることを示し、モデル化時における3次元効果の把握の重要性を指摘している。

埋込み基礎への入力地動特性に関しては、通常の鉛直に入射するせん断波に対しては埋込み深さが増大するほど、また、入射波の振動数が高くなるほど水平入力基礎の拘束を受けて減少するが、回転が励起されることを示すとともに、平面SH波の斜め入射の場合にはねじれ動のような入力地動成分が生ずることを定性的かつ定量的に示している。したがって、位相差をもって入射する波動を拘束することにより生ずるこれらの基礎入力地動成分に対する応答の重要性を示唆している。

埋込みによる応答低減の効果は埋込み部の柔性や埋込部側面と地盤の境界条件によってかなり異なることを示し、剛仮定、完全密着仮定が応答の過少評価につながることを指摘するとともに、密着度が小さく、極端の場合、側面がフリーの状態でも埋込みのない構造物よりは応答量の低下することを示している。

#### 第4章 大型埋込み構造物の3次元動的解析

構造物の埋込み部と地盤の境界面において、変位と応力を未知関数としたまま直接、地盤と構造物を連成させて3次元動的相互作用を評価する新しい数理モデルとして、構造物を3次元有限要素モデル(FEM)で表現し、半無限地盤との境界面において境界要素モデル(BEM)と結合して解析するという周波数領域におけるサブストラクチャ法に基づく解析手法が示されている。この数理モデルにより、発電用のRC造大型構造物の高振動数領域に及ぶ3次元動的解析の適用例を示している。

解析例として、75m平方のプランをもつ標準的な発電用RC造大型構造物を対象に、この構造物がせん断波速度が1000m/secの地盤に20m埋込まれ、埋戻し土が存在する場合の3次元地震応答性状の検討を行ない、埋込みのない場合と比較している。この検討により、20mの埋込みを有する場合は埋込みのない場合に比べて高振動数領域に及ぶ全振動数領域において応答が低減することを確認するとともに、一般階床における面内変形や面外変形により同じ床内でも7~8Hz以上の振動数領域では挙動が異なること、基礎版の水平地反力は埋込み部端部(前後面)に集中し、上下地反力はシールド壁と内壁と外壁の端部直下に集中するなど、大型埋込み構造物に関する幾つかの特徴的現象を指摘している。

さらに、この新しい数理モデルを用いて、実存する発電用のRC造大型構造物の強制振動試験のシミュレーション解析の実施例を示している。この解析において、試験により得られている建屋各部の共振曲線、および位相曲線を20Hzに及ぶ高振動数領域までよくシミュレートすることができると示し、解析法の適用性を実証している。

#### 第5章 非線形構造物-地盤連成系の地震応答解析法

第3章、第4章の解析方法は、周波数領域におけるサブストラクチャ法であり、線形の構造物-地盤連成系のみ適用されるのに対し、構造物の非線形性を考慮するために、周波数領域におい

で発達した理論体系を利用して、これを時間領域に変換する方法に基づく時間領域におけるサブストラクチャ法による地震応答解析法が示されている。

この方法では、半無限地盤の運動方程式への寄与分は、相互作用力として周波数領域における動的剛性（又は動的柔性）をフーリエ逆変換して得られる時間領域における動的剛性（又は動的柔性）を含んだコンボリューション積分の形で組み込まれる。このコンボリューション積分の計算に関しては、多くの計算機上の労力（演算回数と記憶容量）が必要となるため、その効率的な評価法としての再帰的評価法を第6章で提案している。地震応答は各時間ステップにおいて、構造物に加わる慣性力と構成方程式より定まる内力、および相互作用力のつり合いを示す運動方程式を解くことにより得られる。

相互作用力の評価法として、動的剛性を用いる剛性定式化と動的柔性を用いる柔性定式化の2つの方法を示すとともに、これらの定式化に基づくアルゴリズムを示している。さらに、これらの定式化において重要な高振動数領域における波動伝播特性を整理している。

## 第6章 コンボリューション積分の再帰的評価法

第5章に示した時間領域におけるサブストラクチャ法において必要となる各時間ステップにおける相互作用力の評価法を体系化するとともに、コンボリューション積分として表現される相互作用力の評価に関して、これをそのまま離散化して評価する直接評価法では、時刻  $t = 0$  から計算する時刻までのすべての変位を用いるので、多くの計算機上の労力（演算回数と記憶容量）が必要となるため、これらを大幅に低減させ、数値解析を効率的に行うための新しい評価手法として種々の再帰的評価法を提案し、その定式化を示している。この再帰的評価法は、時刻  $t$  における相互作用力をその時刻における変位と直前の数ステップにおける変位と相互作用力を用いて評価する手法である。

先づ、時間領域における動的剛性（又は動的柔性）を用いる方法として、インパルス・インバリエント法の発展として選点法による最適化手法を用いる方法、および動的剛性を区間ごとに分割してZ-変換の既知な内挿関数で近似して再帰係数を陽な形で導く方法（Z-変換に基づくセグメントアプローチ）を示している。

次に、周波数領域における動的剛性（又は動的柔性）を用いる方法として、Z-変換を用いて周波数分ごとに再帰方程式を導く方法を示している。

以上の再帰的評価法を用いて、第5章で示した時間領域におけるサブストラクチャ法により簡単な非線形システムの地震応答解析例を示し、その適用性を示している。

## 第7章 結 論

本研究で得られた結果・知見を要約している。

## 審 査 結 果 の 要 旨

地盤に埋込まれた構造物の耐震設計にあたっては、地盤と構造物の動的相互作用を正しく評価することが重要である。

本論文は、境界要素法を用いて、埋込みを有する構造物の動的特性を検討するとともに、地盤－非線形構造物系の地震応答解析の方法を体系的に検討したもので、全編7章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章は、境界要素法の埋込み構造物と地盤の動的相互作用解析への適用を述べている。

第3章は、半無限地盤に埋めこまれた矩形剛基礎について、埋込みによる動的地盤剛性や地下逸散減衰の基本的性状を明らかにしている。また、平面波地動が入射する場合の基礎入力特性を検討し、埋込みの拘束によって水平入力は減少するが、地動の位相差により回転入力が増加されること、及び地動が斜めに入射する場合にねじれ動が生ずることを示している。これらは、耐震設計上有用な知見である。

第4章は、発電用大型埋込み構造物と3次元弾性地盤の連成地震応答を、周波数領域の動的サブストラクチャ法により検討したものである。構造物及び周辺埋土を3次元有限要素、半無限地盤を境界要素でモデル化して解析を行い、埋込みがない場合に比べて、構造物各部の地震応答量は高振動数に及ぶ全振動数領域で減少することを示している。

さらに、この解析モデルを用いて、実存する発電用鉄筋コンクリート造大型埋込み構造物の強制振動実験のシミュレーション解析を行い、構造物各部の共振曲線及び位相曲線を20Hzに及ぶ振動数領域までよくシミュレートし得ることを示している。

第5章は、構造物の非線形性を考慮した場合の地盤－構造物連成系の時間領域における動的サブストラクチャ解析の方法を体系的に示したものである。半無限地盤からの相互作用力は、周波数領域における剛性又は柔性のフーリエ変換として得られる時間領域の動的剛性又は柔性を含むコンボリューション積分の形で表される。

第6章は、地震応答を時間ステップごとに数値的に求める場合に、相互作用力のコンボリューション積分を効率よく計算するための再帰的評価法を述べたもので、時間領域又は周波数領域における動的剛性あるいは柔性を用いた手法を系統的に示している。このうち、Z変換に基づくセグメントアプローチは、本研究で新たに開発された手法で、良好な精度を有しており、優れた成果といえる。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、埋込み構造物の地震応答特性を精しく検討するとともに、地盤－構造物系の動的解析において構造物の非線形性を考慮し得る新しい方法を示したもので、建築学ならびに耐震工学の発展に寄与する所が少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。