

地震時の地盤-構造物の相互作用解析

宇高竹和

Takekazu UDAKA

工博 阪地震工学研究所 代表取締役

地震時における地盤と構造物の相互作用解析の最新技術について分類し簡単に説明した。そして相互作用の特色と質的な影響を説明し、実構造物で観測された記録のシミュレーション解析を取り上げ解析

手法の妥当性を検討した。最後に地盤の有効応力解析や構造物の非線形性、設計への相互作用解析の応用における安全裕度等の課題を提起した。

地盤の動的解析

地盤の動的解析は大きく次の3つに分類される。爆破、機械振動、杭打ちの振動等で代表される震源がある限られた地域にある Source 問題、地震時のある地点の時間的および空間的な応答の変化を考える地盤応答 (Site Response) 問題、地盤を考慮した構造物の応答を考える相互作用問題である。ここでは主に地盤と構造物の相互作用問題について考える。ちなみにこの地盤-構造物の相互作用解析は1970年代米国の原子力発電所の耐震問題にはじめて導入された。古い基準で設計された発電所が新しい基準でも安全であることの確認のために応用されたといわれている。

解析法の分類

地盤と構造物の相互作用の問題は非常に広範囲で、いろいろな複雑かつ精巧な解法が存在するが、ここではそれらの解析手法を簡単に分類する。大きく分けてサブストラクチャー法 (Substructure Method) と一体法 (Complete Method) に分類される。サブストラクチャー法は図-1で示された3-STEP法で代表されるように、システムを構造物と地盤部に分割してa) 構造物への入力の問題、b) 地盤バネの計算、そしてc) 構造応答計算からの3段階で解く方法である。その他には Flexible Boundary Method や Flexible Volume Method が有名である。これらはシステムを2つに分割することによりマトリックスの計算時間の短縮を計っているのが特徴である。これに対して一体法は構造物と地盤とを同時にモデル化して同時に解く方法である。一体法はさらに

擬似相互作用問題と真の相互作用問題に分類されるが、詳しい説明はここでは省略する。

相互作用の影響の評価

まず始めに動的な相互作用の顕著な特色と質的な影響を説明するために、図-2に示すような「岩盤中の埋設構造物」と「比較的柔らかい地盤に埋設された全く同一の構造物」を想定して説明を行う。また説明を簡単にするために鉛直方向に伝播する水平方向の振動のみを考えることとし(図中太線は粒子の動きを示し細線は伝播方向を示す)、構造物の基礎部と埋設部の側壁は完全剛体とする。入力動は、便宜上、左端の岩盤の表面地点A (Control Point) で規定されるものと仮定する。実際問題として工学的には岩盤の中ではどの地点でも同じ動きをすると考えられる。この事実が意味することは次の3点にまとめられる。

- 1) 水平方向の地震力は直接構造物の基礎部に与えられる入力動と同じである。
- 2) 水平の慣性力の結果として生じる構造物への水平加速度は一定で地震時に生じる転倒モーメントと基礎部に働くせん断力は基礎部にいかなる余分な変位も与えない。

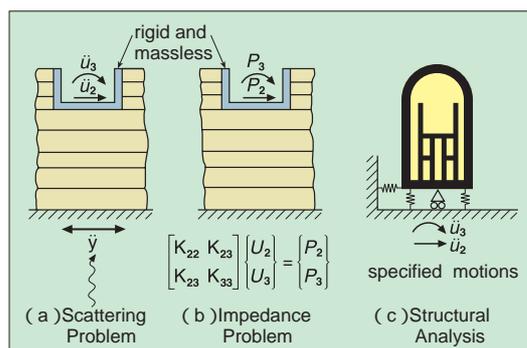


図-1 3ステップ法による相互作用解析

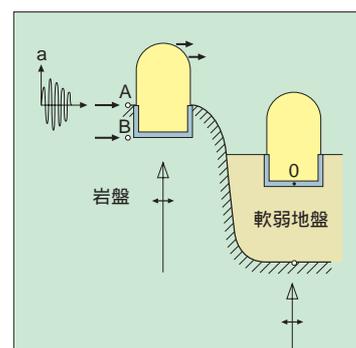


図-2 地盤-構造物の相互作用の概念

3) 構造物の応答は構造物の物性のみならず左右される。

一方、軟弱な地盤に埋設された構造物については相互作用の影響を考えなければならない。この相互作用の影響を次の2項目で簡単に説明する。

1) 軟弱地盤の存在と構造物が埋め込まれているために、波

が伝播している間にO点での振動はControl Point A点とは異なった振動になる。これをKinematic Interaction(運動の相互作用)と呼んでいる。

2) また構造物に作用する慣性力は転倒モーメントや横方向のせん断力を生み出し、周りの地盤に変位を生じさせ、結果として構造物の基礎部のO点での振動に影響を及ぼす。これをInertial Interaction(慣性力による相互作用)と呼ぶ。

これらの相互作用の影響により軟弱地盤を伝播して構造物に与えられる振動はControl Point Aでの振動とはまったく異なった振動になる。一般的には地盤の存在で水平振動は増幅され、特に埋設構造物においてはかなりの量のロッキングが認められるのが普通である。当然のことながらこの量的な評価は入力地震動の周波数特性に依存する。さらに地盤の存在は全体のシステムを柔軟にさせ、その結果固有振動数を長周期側に移動させる効果を持つ。この効果により構造物に伝わる地震力をかなり減少させる場合がある。次に考えなければならないのは、構造物から伝播する波によるエネルギーの損失効果(逸散減衰)である。岩盤の上の地盤が浅い場合はこの逸散減衰効果が期待できず、地盤の材料減衰だけに頼ることになる。相互作用の場合はこの波の逸散によるエネルギーの損失効果を考慮することが非常に大切になり、構造物の応答の減少につながる場合が多々存在する。これらを総合すると、地盤が軟弱で構造物が硬くその剛性の差が大きければ大きいほど相互作用の影響は大きくなるということが直感的に理解できる。一方、固い地盤の上に建つ柔らかい構造物は、相互作用の影響は無視してもよいと考えられる。

さてここで一番の関心は、この相互作用の考慮は構造物の応答の増加または減少のどちらに寄与するかの問題である。結論としては一般的には増減のどちらかの判定は不可能であるため、現実には即した解析を行う必要がある。

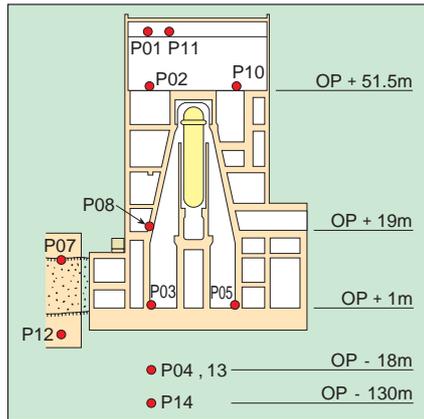


図-3 構造物の断面と地震計配置

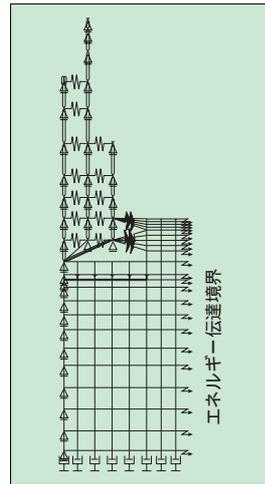


図-4 有限要素のモデル

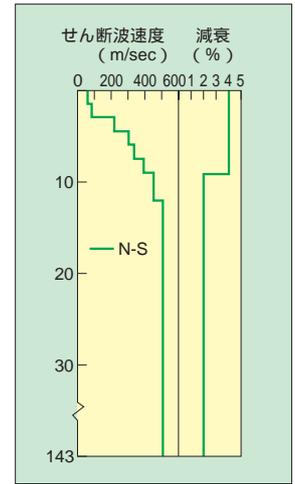


図-5 地盤物性

地盤と構造物の相互作用解析事例

構造物と観測記録

解析事例として重要構造物の観測記録のシミュレーション解析を取り上げる。構造物は68.5 m × 68.3 mの基礎を持つ高さ約73 mの鉄筋コンクリート製で図-3に示す断面図の7箇所に地震計を設置した。さらに構造物の外部の5箇所にも地震計を設置した。地震計P07とP12は構造物から北側に130 m離れた地点に自由地盤応答の観測のために設置した。1982年9月14日、東北沖で発生したマグニチュード5.0の地震観測記録を使用して解析を行った。震源距離は27 kmで震源深さは60 kmと推定され、21 から 27 gal 程度の加速度が自由地盤で、26 から 29 gal 程度が構造物の屋根で観測された。継続時間は40秒と比較的長かった。

解析手法

有限要素法を用いた複素応答法による動的応答解析を行った。解析モデルの底面は半無限地盤と等価の境界を、また側面の境界として有限要素モデルの外にも半無限の状態を仮定できるエネルギー伝達境界を設け、おのおの境界で起こり得る波の反射をなくした。ここではN-S方向の有限要素法のモデルを図-4に示す。構造物は等価なせん断梁要素でモデル化し、基礎部は剛体梁でモデル化した。解析に使用した地盤物性を図-5に示す。入力レベルが10数galと小さいのでせん断弾性係数と減衰定数はともに線形と仮定した。入力動としては自由地盤と見なせる観測地点P07とP12の2種類を考えた。

解析結果

図-6にN-S方向の観測結果と解析結果の比較を示す。比較は観測地点P10, P08, P05で行われ緑の実線に観測値を、地表面P07入力の場合の応答を青い破線で、

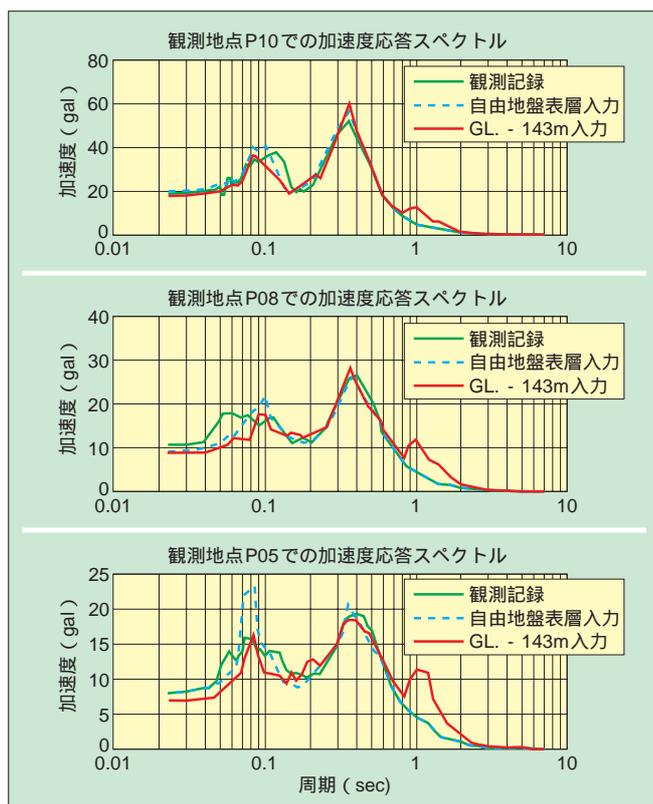


図-6 水平方向の観測記録と解析結果

GL - 143m の P12 入力の場合を赤い実線で示した。また地盤と構造物の相互作用を顕著に示す構造物基礎レベルでのロッキングの応答を図-7 に示した。解析結果から観測記録と計算結果とは非常によい一致が得られた。このような相互作用解析を考えることにより、より正確で経済的な解析構造物の設計ができ得ると思われる。

今後の課題

これまでの地盤-構造物の相互作用解析では基本的に構造物の物性を線形とし、地盤の非線形性は等価線形法で考慮してきた。しかしながら、厳密な意味では時刻歴領域の解法として地盤部では HD 型、RO 型等の非線形モデルが存在し、また構造物の非線形性モデルとしては標準型、武田型、深田型、バイリニア型等が考えられる。これらの地盤の非線形性と構造物の非線形性を同時に正確に解析を行うためには、まだ数年の歳月が必要と思われる。さらにこれまで 1 次元または 2 次元場での検討であったが、3 次元場での解析ともなると計算機の演算スピードと容量、データ作成の複雑な手順等、いろいろと問題を抱えているのが現状である。

これらの問題解決のため、限りない努力と工夫が試みられている。一例としては、地盤の有効応力解析はまだ数多くの問題点を残しているが、液状化のような解析には最適と考えられてきた。これに対して、簡易法として現在比較的簡単に解析を行える等価線形解析を複数回繰

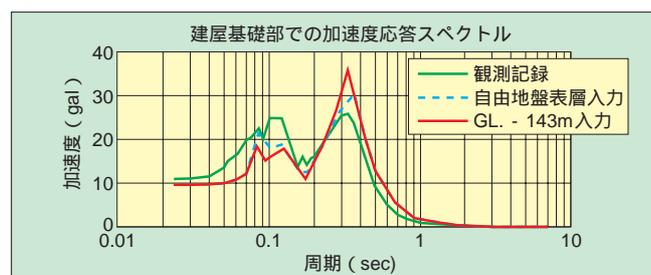


図-7 建屋基礎部のロッキング



図-8 多重等価線形法による液状化解析

り返し、液状化のような地盤物性の急激な変化を擬似的に表現する多重等価線形法が提案されている。多重等価線形法を使用した米国 Wildlife での観測記録と解析結果との比較を図-8 に示す。このように工夫と発想の転換でかなり精度良く実現象を再現できる場合がある。

さらに構造物設計または地盤の安定を含む安全性の面から解析を考えてみると、正確な解析手法の確立は当然のことではあるが、地震という性質に起因する特殊性、言いかえると不確実性を構造物の設計に何らかの形で反映させなければならない。構造物に対する不確実性の概念、言いかえれば構造物設計時における安全裕度の度合いである。安全裕度に大きく貢献する要因は次の 4 つに集約される。1) 入力動の設定、2) 地盤条件と地盤の非線形性、3) 解析のモデル化、4) 解析手法等に大きく起因するが、地盤-構造物の相互作用解析を設計に取り入れることで上記の条件をかなりの部分で補い安全裕度の量的な認識に役立つと考えられる。

最後に今後コンピュータの演算速度の威力はさらに素晴らしいものになり、地盤-構造物の動的相互作用解析の分野での進歩を大いに助ける事を期待するとともにこれらの解析結果を人間の経験と英知で設計に役立ててほしいと願っている。

参考文献

- 1 - Wolf, John P. : Dynamic Soil-Structure Interaction, Prentice-Hall, Inc., 1985
- 2 - Lysmer, John : Analytical Procedures in Soil Dynamics, UBC/ EERC-78/29, Dec., 1978
- 3 - Narikawa, M., Udaka, T., et al. : Seismic Soil-Structure Interaction Behavior at Fukushima Nuclear Power Plant Based on Multi-Point Observations, 9th SMIRT, Lausanne, August, 1987