

[186] 半無限地盤領域を考慮したコンクリート橋脚の非線形応答解析

正会員 日野 浩 二 (名古屋大学大学院)
正会員 田辺 忠 顕 (名古屋大学工学部)

1. まえがき

本研究は、コンクリート構造物の非線形性を考慮に入れた地盤-構造物のInteraction解析の一手法として、半無限領域に対して振動数領域における解析を適用し、コンクリート構造物に対しては時間領域による解析を適用し、これらを両者の境界面において、フーリエ変換を用いて接続させるInteraction法を開発し、その有効性について検討を行なったものである。

解析手法は、まず、半無限境界を有する自由地盤の応答を振動数領域で求める。次に、コンクリート構造物と地盤とからなる有限領域の地盤内に設定した境界部に、自由地盤応答から得られた変位、速度、加速度を与え、非線形性を有するコンクリート構造物について時間領域で応答を求める。その際に、境界部に生じた外力と、自由地盤内で境界に及ぼされている力との間に不平衡力が生じるが、この不平衡力による付加応答を逐次計算し、加え合わせることによって、不平衡力が零となるように、収れん計算を行なうのである。

2. 構造物と地盤からなる全体系の解析

2.1 半無限境界を有する地盤の振動解析

半無限境界を有する地盤の振動解析を周波数領域で行うにあたって、有限要素法の適用を考えた。この場合、地盤本来の無限遠領域に対して有限境界を設定する場合には、波動エネルギーの数値解析における境界反射問題となる。そこで本研究においてはLysmer, Waasらによって導かれた表面波の遠方境界の条件式である伝達境界法を発展させて、基盤と表層地盤とのインピーダンス比から基盤を剛基盤とする基盤面入力の変式化を行った。

2.2 コンクリート構造物の非線形振動解析

コンクリート構造物を解析する場合は、時間領域で時間刻み毎に直接積分を行う。積分手法としては平均加速度法(Newmarks β method: $\beta=1/4$)を適用し、非線形については材料的非線形を考える。材料的非線形に対応する履歴モデルとしてDegrading Tri-linear Modelを採用した。

2.3 繰り返しによる収れん解析

2.1で述べた半無限境界を有する地盤の振動解析(振動数領域)と2.2で述べたコンクリート構造物の非線形応答解析(時間領域)を段階毎に適用し、時間領域から振動数領域への変換にはフーリエ変換を、振動数領域から時間領域への変換にはフーリエ逆変換を用いて、両領域間の接続を行い、以下で述べる繰り返しによる収れん解析を行う。

Step 1 自由地盤応答

半無限境界を有する自由地盤について、基盤を剛基盤とした場合の単位加速度 $\exp(i\omega t)$ に対する変位に周波数応答関数 $\{U_f(\omega)\}$ を求める。この時の運動方程式は

$$(-\omega^2 [M]_I + i\omega [C]_I + [K]_I + [L]_L + [R]_R) \{U_f(\omega)\} = \{P_H - [M]_I^T \{U_B^*(\omega)\} + [L]_L^T + [D]_D^T\} \{U(\omega)\}_L + ([D]_R^T + [R]_R) \{U(\omega)\}_R \quad (2.1)$$

となる。ここで $\{U_B^*(\omega)\}$ は基盤加速度、 $\{U(\omega)\}_L$, $\{U(\omega)\}_R$ は側方伝達境界から不規則領域への入射してくる波の振幅、 $[L]$, $[R]$, $[D]$ は伝達境界マトリックスである。この式の詳細な導出は、参考文献1)を参考にさせていただきたい。

さらに、この自由地盤の不規則領域をFig 2.1に示すように領域②と領域①に分割する。そして領域②を取り出し、さきに求めた周波数応答関数 $\{U_f(\omega)\}$ を使用して、領域②から領域①に及ぼされる外力を求める。ここで、この外力を $\{F_I(\omega)\}$ とおく。

Step 2 フーリエ変換

ここでは、Fig 2.1の分割した領域②の側方各節点について、Step1で求めた周波数応答関数 $\{U_f(\omega)\}$

にフーリエ逆変換を行なって、時間領域での応答 $\{u_{RB}(t)\}$ を求める。

Step 3 コンクリート構造物を含めた非線形応答

STEP2 で求めた応答 $\{u_{RB}(t)\}$ を入力変位として、Fig 2.2 に示されるような構造物を含めた有限領域③の側方各節点に入力し、応答を求める。この応答計算は2.2 で述べたように時間領域での逐次積分計算として行なわれる。

この計算のための運動方程式は以下の形で示される。

$$\begin{aligned}
 [M_{ss}]\{\ddot{u}_s(t)\} + [C_{ss}(t)]\{\dot{u}_s(t)\} + \\
 [K_{ss}(t)]\{u_s(t)\} = - [M_{ss}]\{\ddot{u}_0(t)\} + \\
 [M_{sb}]\{\ddot{u}_{RB}(t)\} + \{\ddot{u}_{RB}(t)\} - \\
 [C_{sb}(t)]\{\dot{u}_{RB}(t)\} + \\
 [K_{sb}(t)]\{u_{RB}(t)\}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量減衰、剛性マトリックスを表わし、添字 s は内部節点を、添字 b は境界節点を示す。

また、 $\{u_0(t)\}$ は時間領域での基盤入力加速度、 $\{u_{RB}(t)\}$ は Step2 で求めた入力変位であり、この運動方程式の右辺項は既知となり、方程式は、左辺について解かれ、時間領域での応答 $\{u_s(t)\}$ が求まる。

そして、この応答計算の時に同時に有限領域③から領域①に及ぼされる外力が求められる。この外力を $\{P_{II}(t)\}$ とする。

Step 4 不平衡力

STEP3 で求めた時間領域での外力 $\{P_{II}(t)\}$ に、フーリエ変換を行なって、振動数領域での外力を求めこの外力を $\{F_{II}(\omega)\}$ とおく。

そして、この外力を $\{F_{II}(\omega)\}$ と STEP1 で求めた外力を $\{F_I(\omega)\}$ との差を求めてこれを $\{\Delta F(\omega)\}$ とする。この力 $\{\Delta F(\omega)\}$ が構造物を含めた場合に生じる不平衡力で、構造物の影響を表わす。

$$\{P_{II}(t)\} \xrightarrow{\text{フーリエ変換}} \{F_{II}(\omega)\}
 \tag{2.3}$$

$$\{\Delta F(\omega)\} = \{F_{II}(\omega)\} - \{F_I(\omega)\}
 \tag{2.4}$$

Step 5 自由地盤への解放

ここでは、STEP4 で求めた不平衡力 $\{\Delta F(\omega)\}$ を Fig2.3 で示される自由地盤に解放させる。

この時、 $\{\Delta F(\omega)\}$ のままでは解放させる力が大きすぎるので $\{\Delta F(\omega)\}$ を α 倍し、これを $\{\alpha\Delta F(\omega)\}$ として自由地盤に解放させる。尚、本解析では $\alpha = 0.1$ として計算を行った。

そして、振動数領域において、不平衡力を自由地盤に解放させると、同時に不平衡力による応答関数 $\{\Delta u_f(\omega)\}$ が求まる。

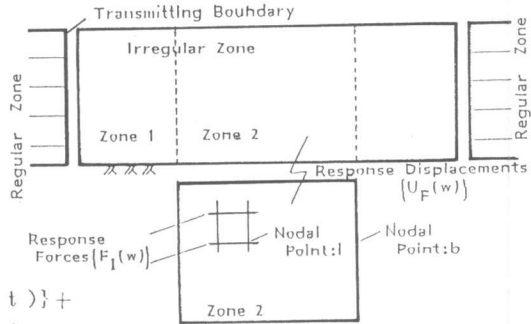


Fig. 2.1 自由地盤応答 (振動数領域)

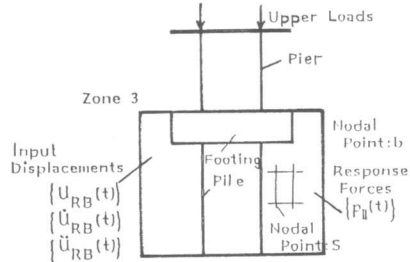


Fig. 2.2 RC構造物を含めた非線形応答 (時間領域)

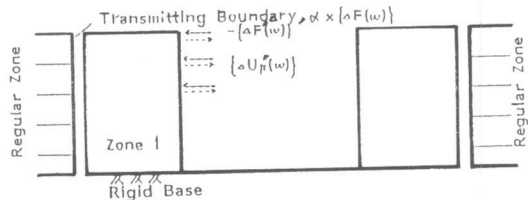


Fig. 2.3 自由地盤への解放

Step 6 変位のたし合わせ

STEP5 で求めた応答関数 $\{U_f(\omega)\}$ と前回までの応答 $\{U_f(\omega)\}$ (最初の収れん計算では、これが自由地盤応答となる) をたし合わせて、新たな応答 $\{U_f(\omega)\}$ を求め、さらに、これにフーリエ逆変換を行なって、時間領域での応答 $\{U_f(t)\}$ を求める。

$$\{U_f'(\omega)\} = \{U_f(\omega)\} - \{\Delta U_f'(\omega)\} \tag{2.5}$$

$$\{U_f(\omega)\} = \xrightarrow{\text{フーリエ変換}} \{U_f'(t)\} \tag{2.6}$$

この値 $\{U_f(t)\}$ がSTEP3 での新たな入力変位として与えられ、STEP3 から STEP6までの間で計算が繰り返行なわれる。

3. 厳密解との比較による本解析手法の妥当性の検討

上記で述べた収れん手法に基づいて、その妥当性を検討するために、線形系について厳密解(周波数領域での全体解析値)との比較を行った。

比較のための解析に使用した橋脚は名古屋高速道路分岐3号線のP31 柱型RC橋脚であり、この橋脚は高さ13.6m、柱の断面積13.2~16.5m²(Fig3.1)で、このRC橋脚は(固有周期0.55secの3種地盤)のベタ基礎上に載っている。

この解析において入力する地震波は、名古屋沖にも襲来が予想される東海大地震を想定して作られた模擬地震(Fig3.2)で、最大加速度を50galとして基盤に入力した。

Fig3.3は、RC橋脚天端における変位と加速度の値を両者について比較したものである。変位に関して厳密解との差は最初0.08cmあったが、10回の収れん計算で完全に一致している。同様に加速度についても、厳密解との差は、最初23galであったが、10回の収れん計算で4galまで近づいている。

次に、Fig3.4(これは、地表面上における変位と加速度の値を両者について比較したものである)に基づいて比較を行ってみた変位に関しては、厳密解との差が、最初0.090cmであったが10回の収れん計算で0.014cmまで近づいている。また、加速度の場合は、厳密解との差が最初11galであったが、10回の収れん計算で1galまで近づいている。これらの検討結果より、本解析手法の妥当性を認めるとして、次に非線形のINTERACTION解析を行った。

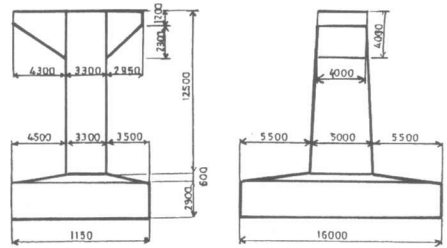


Fig. 3.1 RC橋脚の断面形状

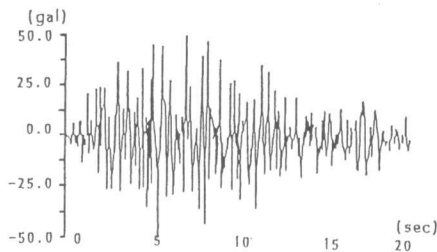


Fig. 3.2 模擬地震波 (入力加速度波形)

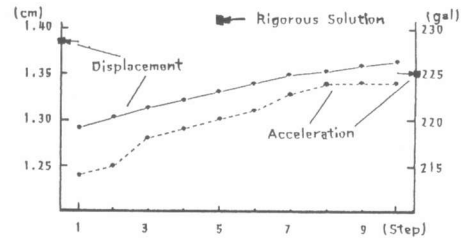


Fig. 3.3 RC橋脚天端地点でのくり返し結果

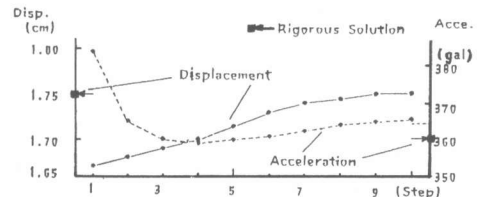


Fig. 3.4 地表面地点でのくり返し結果

4. 線形系と非線形系との比較検討

この解析に使用した橋脚、地震波は、前章で比較検討を行った時と、同じ橋脚、同じ地震波である。Degrading Tri-linear型の履歴法則をコンクリート構造物に適用させて、模擬地震波(Fig3.2)に対する応答を計算した。この時の履歴の結果をFig4.1に示す。

Fig4.2は橋脚天端地点での線形系と非線形系での各応答の結果を示したものであるが、非線形系の場合と線形系の場合とでは、変位、加速度とも差が見られ、いずれも非線形の方が、大きな値を与えている。

次に、Fig4.3は橋脚天端における応答をフーリエスペクトルの形で示したもので、Fig4.3(a)の実線は線形系の加速度応答のフーリエスペクトルであるが、A点は地盤の固有周期に相当し、B点はコンクリート構造物の固有周期に相当する。一方、非線形の場合の加速度応答のフーリエスペクトルをFig4.3(a)の破線で示したが、Bの山が削減しAの中へあたかも吸収されたかの如くなっている。その結果、Aの山は線形系に比べれば、より高くなっている。これは、コンクリート構造物の剛性が低下した結果、構造物の固有周期と地盤の固有周期が近づいたことによる現象であって一応合理的結果といえる。

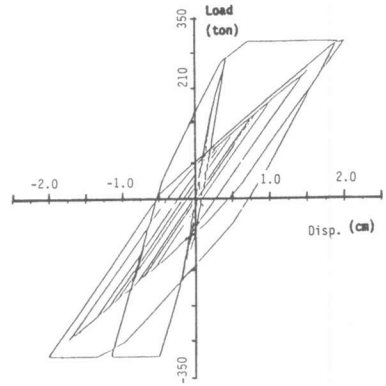


Fig. 4.1 履歴結果

このようにして、このモデルの解析では、線形系よりも非線形系の方が、変位、加速度ともかなり大きく算出された。これは、地盤-構造物の相互作用解析において、構造物の非線形性を考慮に入れることの重要性を示していると考えられる。

5 まとめ

半無限地盤を有するコンクリート構造物について構造物の剛性低下による材料的非線形性を考慮に入れて非線形応答解析を行った。

実計算については、いろいろな形でのパラメトリックスタディを十分に行なっていないため、満足のゆく検討を行なえなかったが、不適当な α の値の場合には発散する場合もあり、収れんの過程で α の値の適切な選択が必要と考えられた。

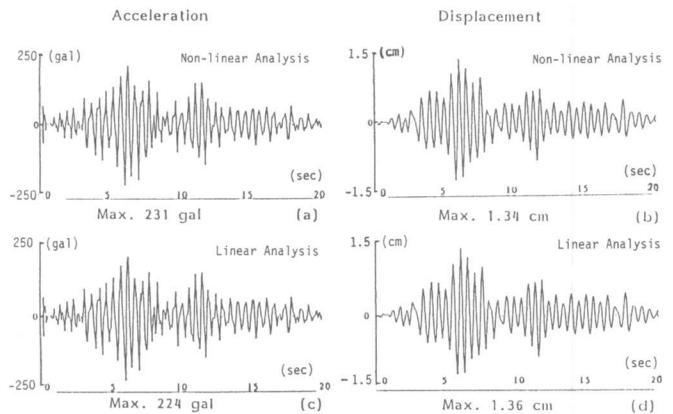


Fig. 4.2 RC橋脚天端地点での時刻歴応答

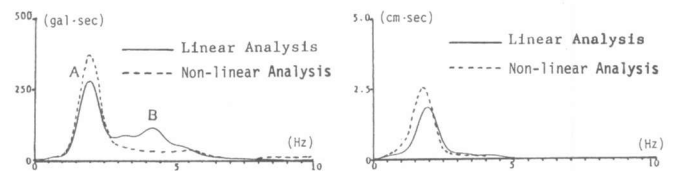


Fig. 4.3 RC橋脚天端地点でのフーリエスペクトル

尚、本解析手法を用いた非線形応答の解析結果から地盤の固有周期とコンクリート構造物の固有周期が剛性低下などによって近づく場合には、非線形系の方が、変位、加速度共に大きな応答を与える事など、重要な考慮が得られており、今後の検討を続けたい。

今後の課題としては、より早い収れん方法への改善、計算時間の短縮化、パラメトリックスタディに伴う非線形系の与える影響の明確化等が挙げられる。

参考文献

- 1) John Lysmer and Lawrence A. Drake: A Finite Element Method For Seismology, University of California, Berkeley September 1971