

III-36 周波数領域での地盤材料の非線形構成モデルを用いた地震応答解析

日本大学工学部 正 中村 晋

1.はじめに

1995年兵庫県南部地震後の耐震設計指針類の見直しに伴い、レベル2地震動といった極めて強い地震動に対する構造物周辺地盤の挙動の評価が必要となる。地盤の強非線形挙動の評価には、時間領域での逐次非線形解析手法や、SHAKEなどの様な周波数領域での非線形解析法が用いられてきた。後者の手法は地盤の強い非定常な挙動を適切に評価できないことから強非線形挙動の評価には適用できないことが指摘されている。ここで、非定常な挙動のうち地盤の塑性化に伴う震動特性の時間的変化については周波数領域と時間領域における解析上の応力-ひずみ履歴の取り扱い差異を改善することにより評価が可能であると考えられる。

ここでは、周波数領域での土の応力-ひずみ履歴を定常不規則過程の枠組みの中でモデル化するために必要な時間領域と周波数領域における土の応力-ひずみ履歴の関係を把握するため、まず前者の座標変換に基づいた周波数領域での土の応力-ひずみ関係の評価手法を提案した。次に、その手法を時間領域の非線形地震応答解析で得られた応力-ひずみ関係に適用し、周波数領域における応力-ひずみ関係のモデル化を実施した。

2.周波数領域での応力-ひずみ履歴の評価手法

時間領域でのせん断応力  $\tau(t)$ -せん断ひずみ  $\gamma(t)$  の履歴は直交する応力軸とひずみ軸上の空間に表される。その任意時刻  $t$  における座標を原点からの履歴ベクトル  $f_s(t)$  として定義すると、その履歴ベクトルは式(1)の様に複素空間で表すことができる。すると、中村によるベクトルベクトルの手法<sup>1)</sup>を用いれば、時間領域での履歴ベクトルの時刻歴はフーリエ変換され、円振動数  $\omega$  毎に図-1に示す楕円のせん断応力(以後、応力と呼ぶ)とせん断ひずみ(以後、ひずみと呼ぶ)の軌跡となる。その形状を規定する長軸と短軸の振幅  $a(\omega)$ 、 $b(\omega)$  は式(2)の様に表される。ここで、 $P_\tau(\omega)$ 、 $P_\gamma(\omega)$  は応力、ひずみのパワースペクトル、 $K_{\tau\gamma}(\omega)$  はコスペクトルを表し、Parzen Window処理(バンド幅=0.2Hz)により求める。

ここで得られた円振動数毎の応力-ひずみ関係は、時間領域における非定常不規則な特性を定常不規則過程と見なすことにより得られた周波数領域での応力-ひずみ関係となる。その円振動数  $\omega$  ごとの応力-ひずみ関係は、その特性を同様な形状の応力-ひずみ関係を有する複素剛性モデルと等価であると見なすと、円振動数  $\omega$  におけるせん断ひずみに対するせん断剛性及び減衰定数、つまり動的変形特性のひずみ依存特性により表すことができる。すると、せん断剛性及び減衰定数は、複素剛性モデルの定義に基づき、円振動数  $\omega$  における応力-ひずみ軌跡を規定する長軸、短軸振幅と長軸とひずみ軸とのなす角  $\theta(\omega)$  より、式(3)のように表すことができる。

3.両領域における応力-ひずみ履歴の比較

時間領域での土の応力-ひずみ関係は、東京大学生産技術

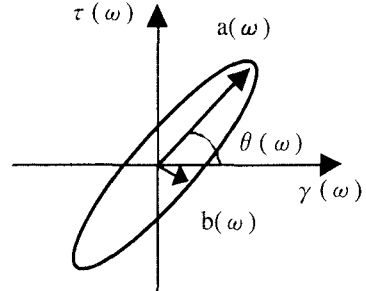


図-1 フーリエ変換された応力-ひずみ軌跡

$$f_s(t) = \gamma(t) + \tau(t)i \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} a(\omega) &= 2\sqrt{\frac{2\pi A(\omega)}{T}}, \quad b(\omega) = 2\sqrt{\frac{2\pi B(\omega)}{T}} \\ A(\omega) &= \frac{P_\tau(\omega) + P_\gamma(\omega) + \sqrt{\{P_\tau(\omega) - P_\gamma(\omega)\}^2 + 4K_{\tau\gamma}(\omega)^2}}{2} \\ B(\omega) &= \frac{P_\tau(\omega) + P_\gamma(\omega) - \sqrt{\{P_\tau(\omega) - P_\gamma(\omega)\}^2 + 4K_{\tau\gamma}(\omega)^2}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} G(\omega) &= \frac{\{a(\omega)^2 - b(\omega)^2\} \sin\{2\theta(\omega)\}}{2\{a(\omega)^2 \cos^2 \theta(\omega) + b(\omega)^2 \sin^2 \theta(\omega)\}} \\ h(\omega) &= \frac{a(\omega)b(\omega)}{\sin 2\theta(\omega)\{a(\omega)^2 - b(\omega)^2\}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

研究所の千葉実験所において地震観測が実施されている地点の地盤構造モデル<sup>2)</sup>を対象とし、東畑らにより開発された逐次非線形解析コード「yusa-yusa」<sup>3)</sup>を用いた地震応答解析により評価した。その際、土の応力-ひずみ関係として Ramberg-Osgoodモデル、入力地震動には1987年千葉県東方沖地震(Mj=6.7)で観測された地中の記録(GL-40m)を振幅調整(原記録×3)して用いた。

得られた最表層のGL-2~3m、4~5mにおける応力-ひずみ履歴に基づいて算出した周波数毎の動的変形特性つまりせん断剛性及び減衰定数とひずみ振幅の関係と地震応答解析に用いた応力-ひずみ関係より得られる動的変形特性のひずみ依存特性の関係を図-2に示す。両領域における動的変形特性のひずみ依存特性は定性的によく対応している。ここで、周波数領域のせん断剛性はGL-4~5m位置においてひずみ  $3 \times 10^{-4}$  でほぼ初期剛性の5割程度の値となり、解析にもちいたモデルにおける初期剛性の5割程度の値を与えるひずみ  $3 \times 10^{-3}$  の10分の1の値となっている。一方、時間領域におけるそのひずみの値は先に示した最大応答値となっている。GL-2~3m位置においても同様な傾向が認められる。

4.周波数領域における応力-ひずみ関係のモデル化

図-2に示した周波数領域と時間領域における動的変形特性との関係は、周波数領域における応力-ひずみ関係が図-3に示す様に時間領域における応力-ひずみ関係を縮小した関

係にモデル化できることを示唆している。このことより、周波数領域におけるひずみ $\gamma f$ は時間領域でのひずみと一定の低減係数(=C $\gamma$ t)に関連づけることができると考える。すると、時間領域の地震応答解析で用いる応力-ひずみ関係を設定すれば、そのひずみに周波数領域のひずみ成分 $\gamma f$ を代入することより周波数領域での応力ひずみ関係を求めることができる。

ここでは、2つの手法によりその低減係数の評価を実施した。一つの手法は、周波数領域での応力-ひずみ関係より得られる割線せん断剛性より得られる時間領域でのひずみと周波数領域のひずみの比として求めるという手法である(手法1)。他の手法は、時間領域と周波数領域における最大せん断ひずみの比としてもとめる手法(手法2)である。ここで、時間領域での最大ひずみはひずみのパワースペクトルより推定される期待値<sup>4)</sup>として求めた。手法1により得られる周波数領域のせん断ひずみとせん断ひずみ比の関係及び最大せん断ひずみ比の関係を図-4に示す。これより手法1ではせん断ひずみの大きさに応じせん断ひずみ比が0.01から0.2程

度の値を示し、手法2では手法1のほぼ平均的な0.082-0.09程度の値となっている。ここで、手法1におけるせん断ひずみ比の最大値0.2および手法2による0.09を低減係数とした際の周波数領域の応力-ひずみ関係との比較を図-5に示す。図には時間領域での応力-ひずみ関係も合わせて示す。図より、周波数領域の応力-ひずみ関係を、手法1は包絡する関係、手法2はその平均的な関係を示している。

### 5.あとがき

ここでは、時間領域における土の応力-ひずみ関係の座標変換に基づいた周波数領域での土の応力-ひずみ関係の評価手法を提案し、両者の関係についての検討を行った。その結果、周波数領域での応力-ひずみ関係は時間領域の応力-ひずみ関係の縮小モデルとして評価可能であるが明らかとなった。

その適用性は、両手法を用いた両領域における非線形地震応答解析の比較により行う必要があるが、今後の課題としたい。

### 参考文献

- 1)中村晋,「ベクトル空間による地震動の増幅特性評価とその適用,土木学会論文集, No.519/I-32, pp.161-173,1995
- 2)鹿林他,千葉実験所における地震動観測-その5 自由地盤の伝達特性について-,第20回地震工学研究発表会,1989
- 3)吉田望,東畑郁生,「Yusa-yusa2 理論と解説」,1991
- 4)Der-Kiureghian A.,Structural response to stationary excitation, Jour. Eng.Mech.Div., ASCE,EM6,pp.1195-1213,1980

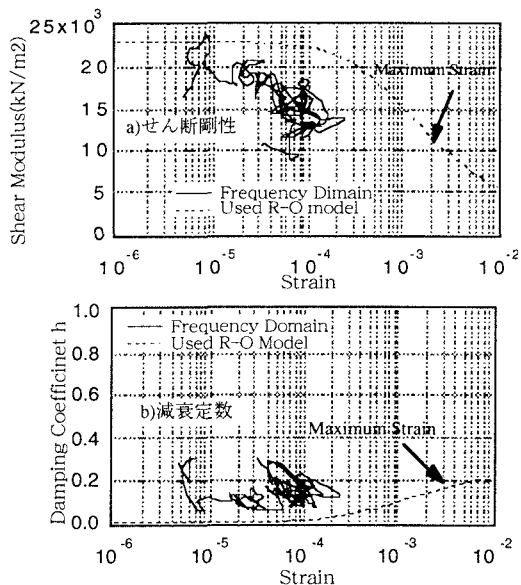


図-2 周波数領域でのせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存特性と解析に用いたROモデルの特性の比較

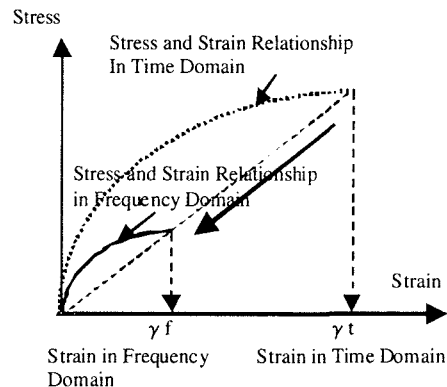


図-3 周波数領域における応力-ひずみ関係のモデル化

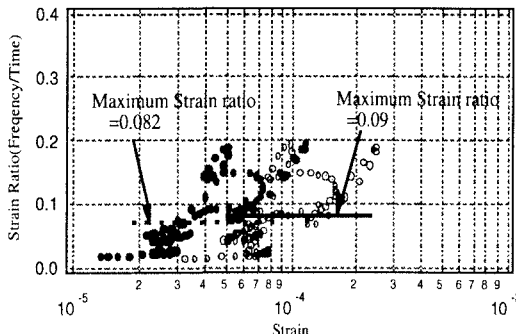


図-4 両手法によるせん断ひずみ比と周波数領域のひずみの関係

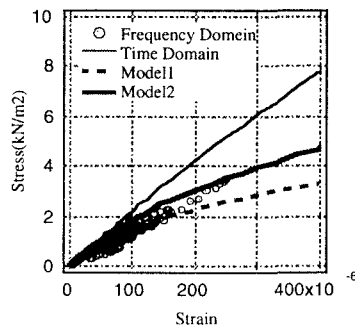


図-5 両手法による低減係数に基づく周波数領域と時間領域における応力-ひずみ関係の比較