

Ⅲ-47

地震応答解析に基づく周波数領域での土の動的変形特性に関する一考察

日本大学工学部 学 ○樽川和之, 立花卓

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非線形化の程度の時間変化を適切に評価できないこと等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。両手法の差異として、非定常性に係る差異、時間領域と周波数領域における土の構成則また動的変形特性の差異などが挙げられる。前者の差異を克服することは周波数領域での解析手法の簡易性という観点で有意とは言えないが、後者つまり周波数領域での土の応力-ひずみ関係については適切な評価による差異の改善は有意であると考えられる。

ここでは、周波数領域での土の応力-ひずみ関係の適切なモデル化に必要な時間領域における土の応力-ひずみ関係との関係を把握するため、後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、その手法を用いた両者の関係についての検討結果を報告する。

2.時間領域での応力-ひずみ関係に基づく周波数領域の応力-ひずみ関係の評価手法

時間領域でのせん断応力 $\tau(t)$ -せん断ひずみ $\gamma(t)$ 関係は直交座標系で表されることがから、その軌跡 $f_s(t)$ は式(1)の様に複素空間で表すことができる。すると、中村が提案しているベクトルスペクトル¹⁾の手法¹⁾を用いれば図-1に示す円振動数 ω ごとに応力とひずみの軌跡に変換することができる。その軌跡は楕円となり、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。

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

$$\left. \begin{aligned} a(\omega) &= 2\sqrt{\frac{2\pi A(\omega)}{T}}, A(\omega) = \frac{(P_r(\omega) + P_\gamma(\omega))}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\{(P_r(\omega) - P_\gamma(\omega))^2 + 4\{K_{\gamma\gamma}(\omega)\}^2\}} \\ b(\omega) &= 2\sqrt{\frac{2\pi B(\omega)}{T}}, B(\omega) = \frac{(P_r(\omega) - P_\gamma(\omega))}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\{(P_r(\omega) - P_\gamma(\omega))^2 + 4\{K_{\gamma\gamma}(\omega)\}^2\}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $P_r(\omega)$ 、 $P_\gamma(\omega)$ は応力、ひずみのパワースペクトル、 $K_{\gamma\gamma}(\omega)$ はコスペクトルを表す。

ここで得られた円振動数毎の応力-ひずみ関係はまさに周波数領域での非線形解析で用いられている応力-ひずみ関係に対応している。その非線形特性は、せん断剛性及び減衰定数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、両者の定義に基づきこの円振動数 ω 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。

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

3.周波数領域での土の応力ひずみ関係および動的変形特性

時間領域での土の応力-ひずみ関係は、東京大学生産技術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²⁾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」³⁾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。

解析により得られた最表層のGL-4~3mにおける時間領域でのせん断応力-せん断ひずみ関係を図-2、せん断応力及びせん断ひずみのフーリエスペクトル(Parzen Window; Band Width=0.2Hz)を図-3に示す。ここで、最大ひずみは 3.0×10^{-3} となっている。ここで、ひずみまた応力振幅の比較的大きな2.44Hz、2.83Hz近傍における応力-ひずみ関係を図-4に示す。その有意性を把握するため、応力、ひずみ時刻歴より対象とする周波数成分をバンドパスフィルター(バンド幅; 対象周波数 $f_0 \pm 0.01f_0$)処理することにより求めた応力-ひずみ関係を図-5に示す。両者はほぼ一致しており、本提案手法の有意性が認められる。次に、せん断剛性、減衰定数の周波数特性を図-6に示す。これより、せん断剛性はひずみ振幅の大きな周波数帯域でひずみ振幅の小さな周波数帯域より小さな値を示し、減衰定数はその逆の傾向を示している。最後に、周波数毎のせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存特性(動的

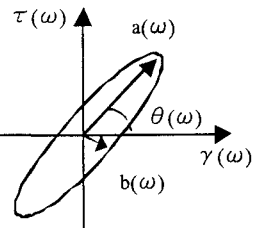


図-1 フーリエ変換された
応力-ひずみ軌跡

変形特性)を図-7に示す。図には解析に用いた応力-ひずみ関係より得られる動的変形特性も合わせて示す。両者は定性的によく対応している。しかし、周波数領域のせん断剛性はひずみ 3×10^{-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 3×10^{-3} の10分の1の値となっている。一方、せん断ひずみの時間領域における最大値は先に示した様に 3×10^{-3} となっている。このことは、周波数領域における動的変形特性はひずみ振幅の周波数特性に依存するものの、剛性低下率は時間領域のひずみ振幅に依存することを示している。減衰定数にも同様な傾向が認められる。

4.あとがき

本報告では、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、1)本提案手法は周波数領域での応力-ひずみ関係の評価に有用であること、2)周波数領域における動的変形特性はひずみ振幅の周波数特性に依存するものの、剛性低下率や減衰定数のひずみ依存性は時間領域のひずみ振幅に依存することが明らかとなった。

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

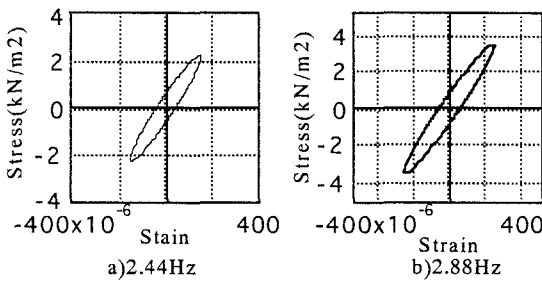


図-4 提案手法による周波数ごとの応力-ひずみ関係

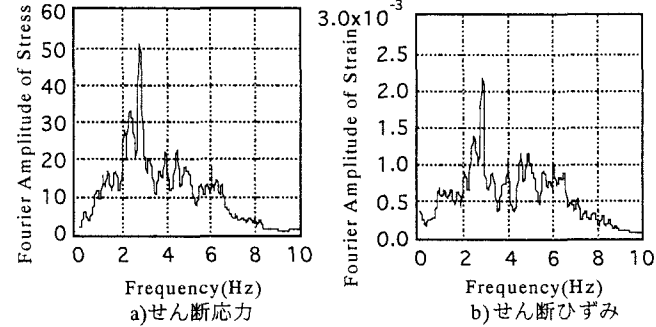


図-3 せん断応力, ひずみの周波数特性

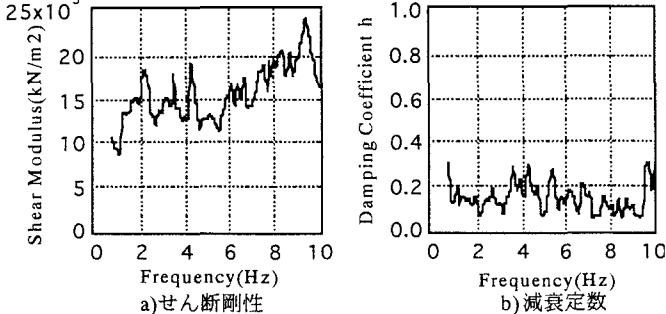


図-6 せん断剛性及び減衰定数の周波数特性

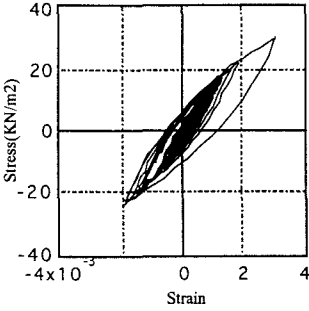


図-2 地震応答解析による時間領域での応力-ひずみ関係

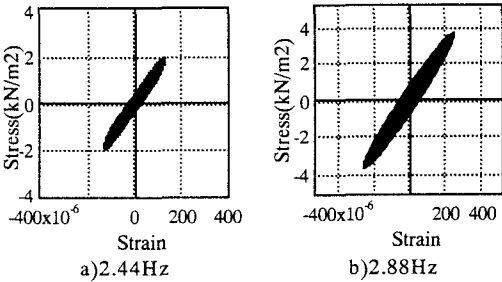
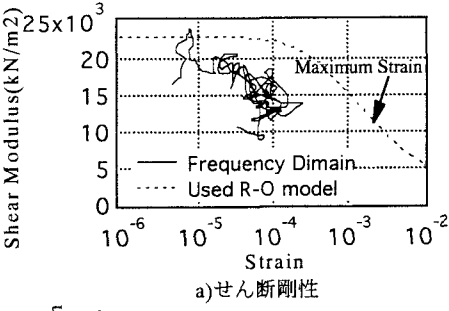
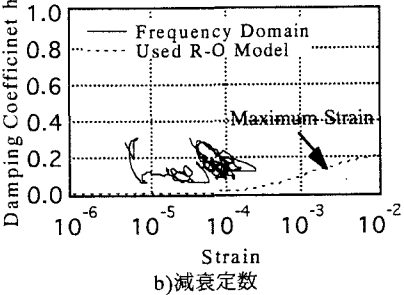


図-5 バンドパスフィルター処理による応力-ひずみ関係



a)せん断剛性



b)減衰定数

図-7 周波数領域での動的変形特性と解析に用いたROモデルの特性の比較