

時間領域での応力-ひずみ関係に基づく周波数領域での動的変形特性の評価手法

中村晋¹⁾, 吉田望²⁾, 深澤誠³⁾

1)正会員 工博 日本大学助教授 工学部土木工学科(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

2)正会員 工博 佐藤工業(株)技術研究所(〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

3)学生会員 日本大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

本論では、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でモデル化することを目的とし、時間領域における土の応力-ひずみ履歴をフーリエ変換することにより周波数領域での土の応力-ひずみ履歴を評価する手法を提案し、両者の関係について検討を行った。その結果、1)本提案手法は周波数領域での応力-ひずみ履歴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。

Key Words: *Histerises of stress and strain, Time Domain, Frequency Domain, Stationary Random Process*

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、非定常性とは、地盤の塑性化に伴う震動特性の時間的变化と残留変形の時間変化に伴う2つの過程が上げられる。後者の差異を克服することは周波数領域での解析が定常不規則過程を前提としていることから困難である。しかし、前者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。それは、時間領域における非定常不規則な応力-ひずみ履歴を、周波数領域、つまり定常不規則過程の枠組みの中での適切にモデル化することにより可能になる。

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、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、その手法を用いた両者の関係についての検討結果を示す。

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-ひずみ履歴の評価手法

1)両領域での地震応答解析における応力ひずみ履歴の取り扱い

まず、地盤の震動解析を行う際の波動方程式の時間軸方向の離散化過程を両領域で比較すると、時間領域では増分形式で定式化されている。一方、周波数領域ではSHAKEなどの解析法に見られる様に周期に依存しないせん断剛性と減衰定数に基づく複素剛性により関連付けられた応力とひずみの関係と周期毎に定常な変位場に基づいた周期毎の波動方程式の重複反射理論にもとづく応答として定式化されている。結果として、時間領域では、定常不規則なひずみ及び応力の応答を直接評価できる解析法となっている。しかし、周波数領域では、等価線形化法により地盤材料の非線形性を考慮しているものの応力-ひずみ関係における仮定は変わらないことから、定常過程に基づく応答の評価となっている。ただし、入力地震動を定常不規則過程と見なし周波数変換していることから、応答は入力の確率過程が反映された定常不規則過程として評価される。ここで、入力地震動が有している非定常過程の影響はそれを定常不規則過程と見なす際に含まれ、応答にその影響が反映される。しかし、定常応答解析であることから、地盤の塑性化に伴う震動特性の時間的变化や残留変形の時間変化などの非定常な過程は評価できない。

このように両領域における地震応答解析上の応力

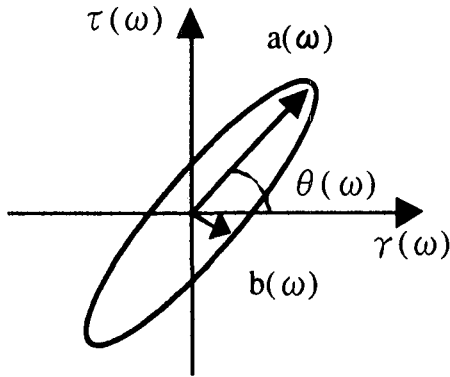


図-1 フーリエ変換された応力-ひずみ軌跡

ひずみ履歴の取り扱いを確率過程として見た場合、周波数領域では定常過程として取り扱われ、時間領域、言い換えれば実現象における非定常不規則過程と大きく異なっていることが分る。

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。その直交座標系上の任意時刻 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、中村が提案しているベクトルスペクトルの手法¹⁾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 ω 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 ω 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 ω 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 $f_s(t) = \gamma(t) + \tau(t)i$ (1)

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

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

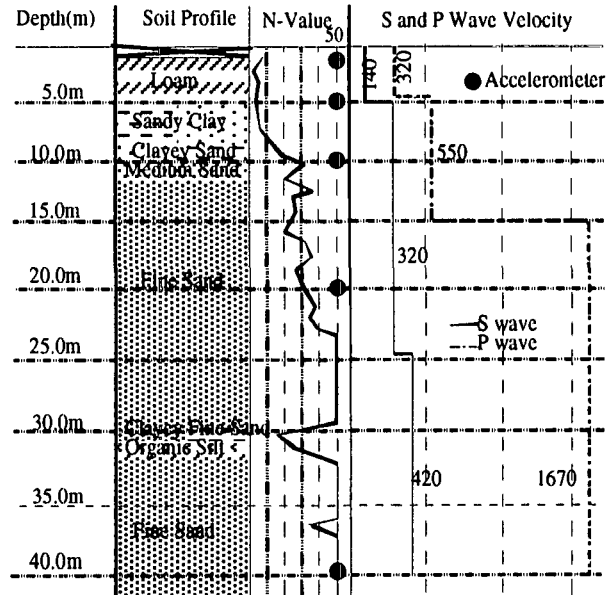


図-2 解析地盤モデル

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 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。

3. 地震応答解析に基づく応力-ひずみ履歴

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図-2に示す地盤構造モデル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。

得られた最表層のGL-2~3m, 4~5mにおける応力-ひずみ履歴を図-3、Parzen Windowによりフィルタ処理を行った各層の応力及びひずみのフーリエスペクトル(Band Width=0.2Hz)を図-4に示す。ここで、最大ひずみはGL-2~3mで 1.4×10^{-3} , GL-4~5mで 3.0×10^{-3} となっている。また、応力及びひずみのスペクトル振幅はいずれも周波数1~6.5Hz、特に2~3Hzにて卓越し、その周波数帯の振幅に比べそれより低・高周波数側の振幅はかなり小さな値となっている。いずれにしても、各周波数毎の応力振幅は、時間領域と同様にひずみの振幅に対応していることが分る。

4. 周波数領域での土の応力ひずみ関係及び動的変形特性

ひずみまた応力振幅の比較的大きな1.0, 1.6, 2.44, 2.88Hz近傍を対象として、2章で示した時間領

域の履歴ベクトル時刻歴のフーリエ変換手法に基づき算出した周波数領域での応力-ひずみ関係を図-5に示す。その有意性を検証するため、応力、ひずみ時刻歴より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対象周波数成分近傍の応力、ひずみ時刻歴を用いた応力-ひずみ履歴を図-6に示す。両者はひずみのスペクトル振幅の大きな2.44, 2.88Hzではほぼ一致しているが、1.0, 1.6Hzでは提案手法により得られた応力、ひずみは、バンドパスフィルター処理により得られた応力、ひずみの1.5~4倍程度の差異が見られる。後者については、バンドパスフィルター処理により求めた対象周波数成分近傍の応力、ひずみと提案手法による周波数領域の応力-ひずみ関係の推定精度の差異により生じたものと考えられ、両手法により推定された応力-ひずみ関係は比較的良く対応していることから、提案手法は有意であると認められる。

次に、せん断剛性、減衰定数の周波数特性を図-7に示す。図-3に示したひずみの周波数特性を踏まえると、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。

5. 時間領域と周波数領域における応力-ひずみ履歴の比較

時間領域と周波数領域における応力-ひずみ関係

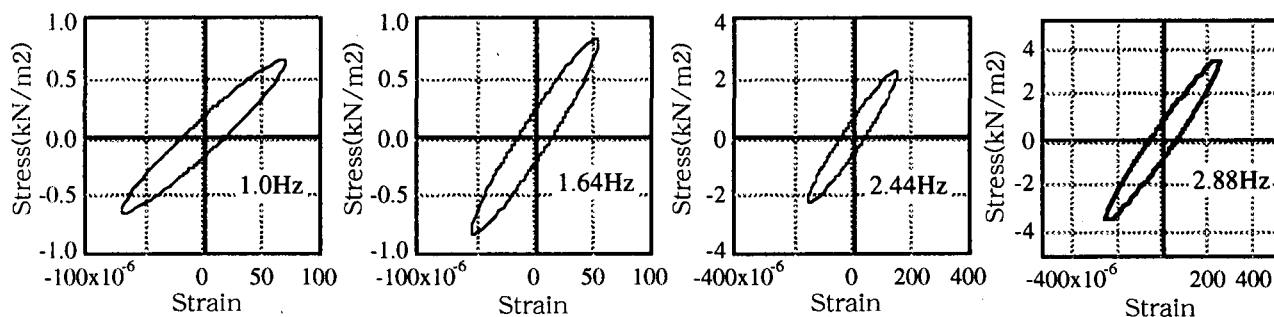


図-5 提案手法による周波数ごとの応力-ひずみ関係

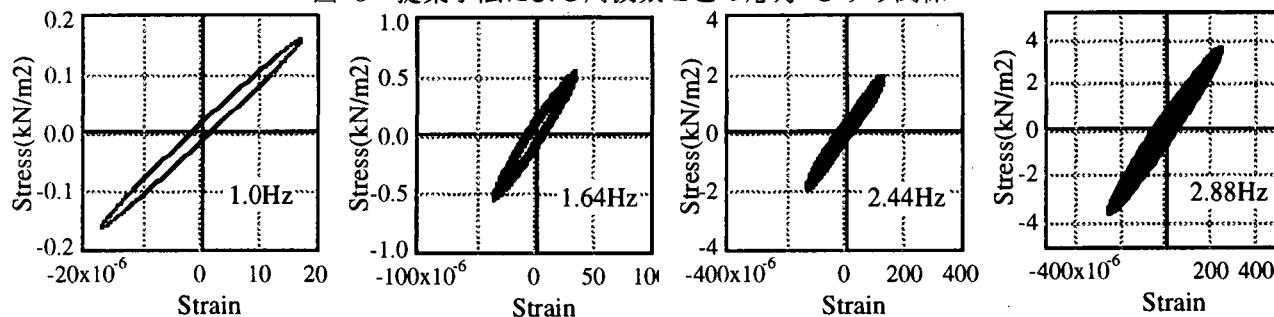


図-6 バンドパスフィルター処理による応力-ひずみ関係

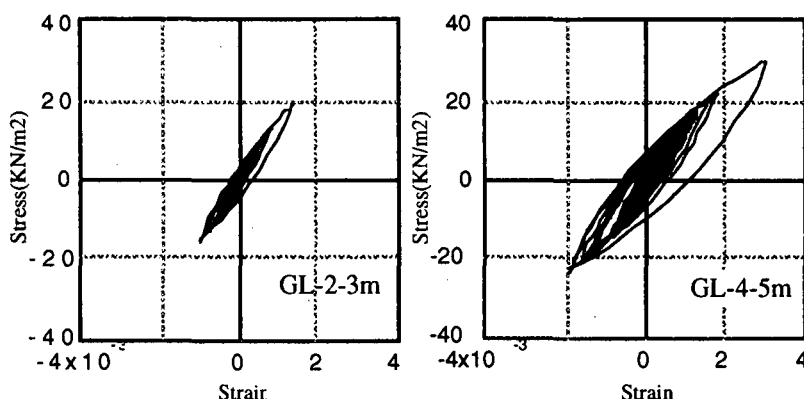


図-3 地震応答解析による時間領域での応力-ひずみ関係

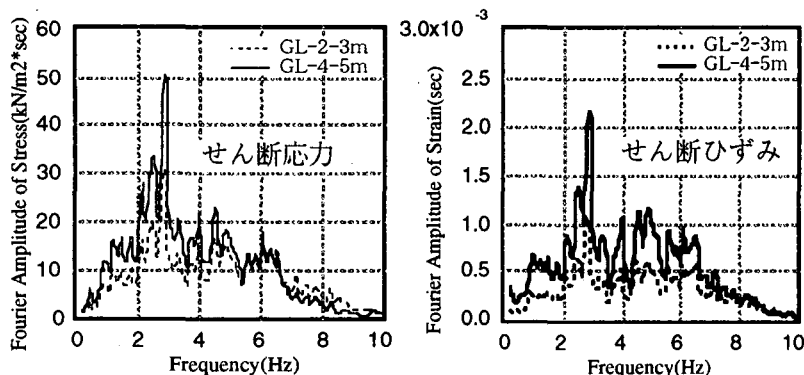


図-4 せん断応力、ひずみの周波数特性

の比較として、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-8, 9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 3×10^{-4} ではほぼ初期剛性の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、

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。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。

このことは、周波数領域における各周波数 ω におけるひずみ振幅 $\gamma(\omega)$ を時間領域と周波数領域における最大ひずみ振幅の比率に応じて時間領域でのひずみ振幅に変換すれば、周波数領域における動的変形特性のひずみ依存特性は時間領域におけるそれらと等価になることを示している。つまり、次式により変換した周波数領域でのひずみを用い、時間領域での動的変形特性のひずみ依存特性よりせん断剛性及び減衰定数の評価を行うことができることを示している。このひずみの評価式は、結果として杉戸⁴⁾が提案している周波数領域での等価平均ひずみと一致している。

$$\tilde{\gamma}(\omega) = \frac{\gamma(t)_{\max}}{\gamma(\omega)_{\max}} \gamma(\omega) \quad (4)$$

6. まとめ

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、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,ベクトルスペクトル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)杉戸真太他,周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察,土木学会論文集, No.493/III-27, pp.49-58, 1944.6

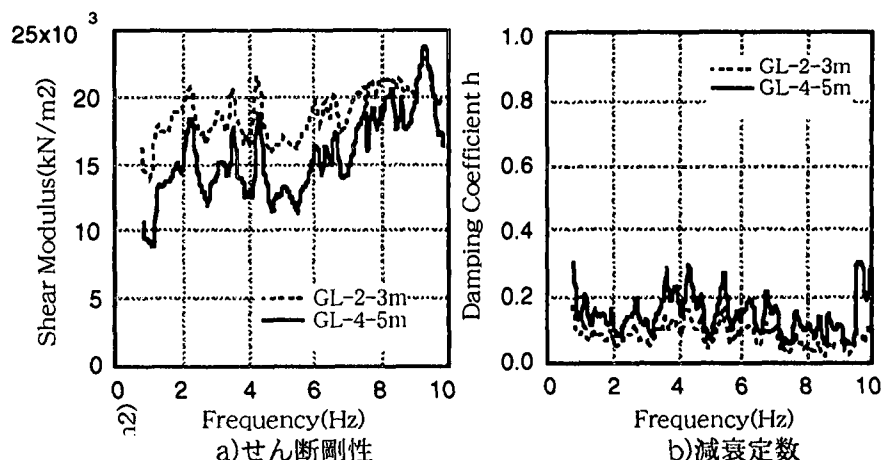


図-7 せん断剛性及び減衰定数の周波数特性

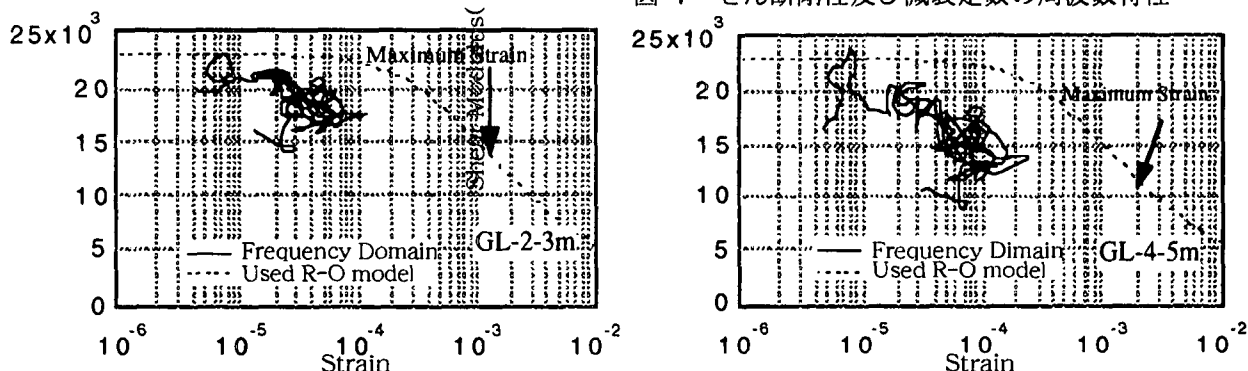


図-8 周波数領域でのせん断剛性のひずみ依存特性と解析に用いたROモデルの特性の比較

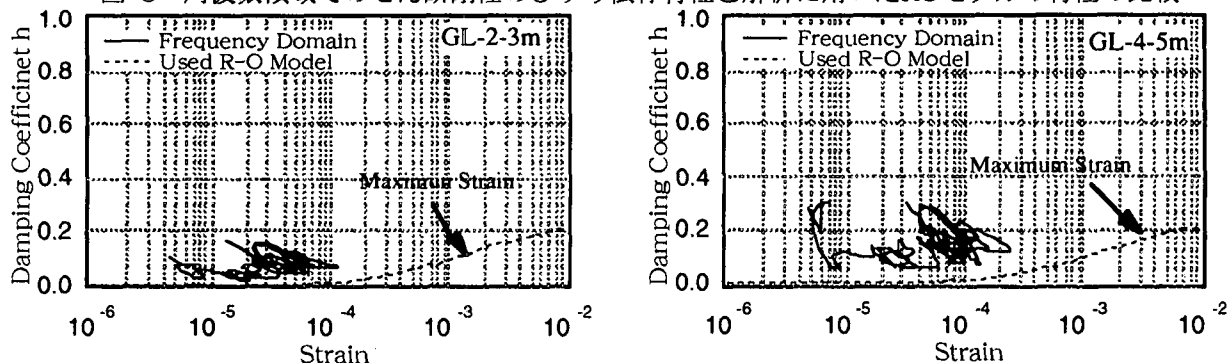


図-9 周波数領域での減衰定数のひずみ依存特性と解析に用いたROモデルの特性の比較