

Ⅲ - A68

土の動的特性におけるフラクタル次元の繰返し応力振幅比依存性

中部電力技術研究所	正会員	熊崎幾太郎
京都大学土木工学専攻	フェロー	渡邊 英一
関西大学総合情報学部	正会員	古田 均

1. 緒言

地震応答解析においては、ひずみレベルに応じてせん断剛性や履歴減衰が変化するという地盤の非線形性の扱いが重要となる。このような地盤の非線形性は、従来、繰返し三軸試験などにより求められる等価せん断剛性率および履歴減衰係数と片振幅せん断ひずみとの関係によって表現され、地震応答解析に用いられている。

地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法（JGS T 542—1994）に準じて、荷重制御で10段階の荷重レベルに亘り、11サイクルずつ砂質土の供試体に載荷した試験の結果によれば、一定荷重レベルの繰返し荷重下で0.1%程度以上の軸ひずみが生じた段階で、軸ひずみ相空間軌道は、閉曲線的な安定軌道を突然離れ、発散的に拡大する現象を呈する。すなわち、この現象が発生し始めた時点において、供試体は急激な耐荷力の低下を生じたことになる。しかしながら、等価せん断剛性率および履歴減衰係数のひずみ依存性曲線だけではこの現象を表現し得ず、従って、等価せん断剛性率および履歴減衰係数のひずみ依存性のみを地盤の動的物性値として取り入れている地震応答解析法では、地盤の動的変形特性として重要なこの現象が考慮されていないということになる。

本研究では、より高精度な地震応答解析を可能とするため、この現象を適切に定量化して表現し得る新たな動的物性値を提案することを目的とする。

2. 相空間軌道とフラクタル次元

ある物理現象における物理量の相空間軌道の幾何学的構造は、それに対応するフラクタル次元を有しており、その値によってその物理現象を特徴づけることが可能である。

本研究では、動的変形試験結果としての軸ひずみの時系列から得られる軸ひずみ相空間軌道の状態を定量化するため、フラクタル次元を応用する。

ある時点 t において、ひずみ相空間上に $n(t)$ 個の点があるとする。この時点におけるフラクタル次元 $FD(t)$ は、 m 個の閶円半径 $R(t, k)$ と、それらに対応して式(1)で求められる m 個の相関積分値 $CS(t, k)$ との両常用対数座標上での関係における比例関係部の回帰直線の勾配として求められる。

$$CS(t, k) = \frac{1}{\{n(t)\}^2} \left[\sum_{i=1}^{n(t)} \sum_{j=1}^{n(t)} H\{R(t, k) - d(i, j)\} - n(t) \right] \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

ここに、 $d(i, j)$ はひずみ相空間上での点 i と j の距離であり、 $H\{\}$ はヘヴィサイド関数を意味する。

3. フラクタル次元のせん断応力比依存性

図-1と図-2は各々、第1～第5段階目および第6～第10段階目の荷重レベルの載荷段階における、ひずみ相空間軌道のフラクタル次元の時系列を示す。これらの図によれば、第1～第7荷重レベルの載荷段階までは、各載荷段階で繰返し載荷開始後の5秒経過時点以後から各荷重レベルの繰返し載荷が終了する時点まで、フラクタル次元は大きな変化を示さず、ほぼ一定の値で推移する。一方、第8載荷段階では、繰返し載荷開始から30秒が経過した直後、フラクタル次元が急激に低下している。第9、第10段階についてもフラクタル次元の急激な低下が起こっているが、第8荷重レベルよりも第9荷重レベル、第9荷重レベルよりも第10荷重レベルの方が早い時点でこのようなフラクタル次元の急激な低下を呈している。

図-3および図-4は、各荷重レベルでの10サイクル目の履歴ループから求められる等価せん断剛性率および履歴減衰係数の繰返し応力振幅比依存性（有効拘束圧は0.059MPa）をそれぞれ示しており、これらと併せて、各荷重レベルにおける10サイクル目の載荷が終了した時点に該当するフラクタル次元と、その荷重レベルでの繰返し応力振幅比との関係を示している。図-3、図-4より、せん断応力比のレベルが0.2程度までは、フラクタル次元は大きな

キーワード 動的変形特性、ひずみ相空間、フラクタル次元、ひずみ依存性、繰返し応力振幅比依存性
連 絡 先 〒459 名古屋市緑区大高町字北関山20・1
中部電力（株） 技術開発本部 電力技術研究所 構築G
TEL 052-624-9186, FAX 052-623-5117

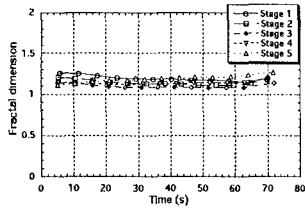


Fig. 1 Time series of fractal dimension

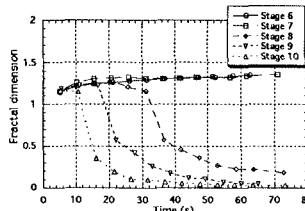


Fig. 2 Time series of fractal dimension

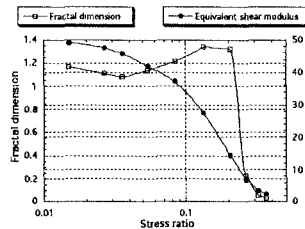


Fig. 3 Stress ratio dependency

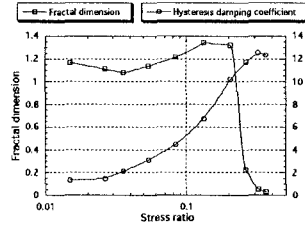


Fig. 4 Stress ratio dependency

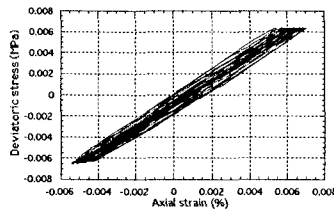


Fig. 5 Hysteresis curve in 4-th stage

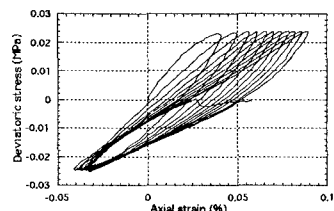


Fig. 6 Hysteresis curve in 7-th stage

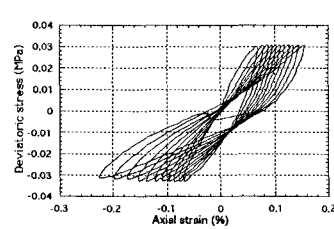


Fig. 7 Hysteresis curve in 8-th stage

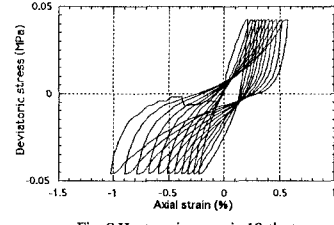


Fig. 8 Hysteresis curve in 10-th stage

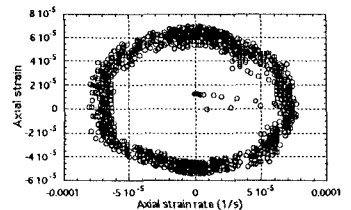


Fig. 9 Phase space in 4-th stage

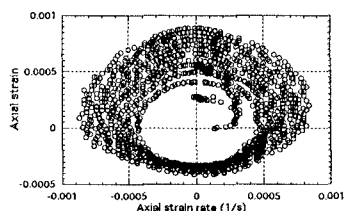


Fig. 10 Phase space in 7-th stage

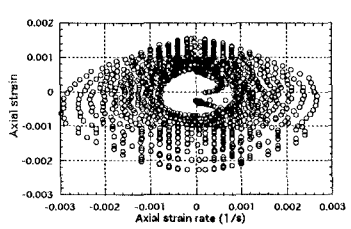


Fig. 11 Phase space in 8-th stage

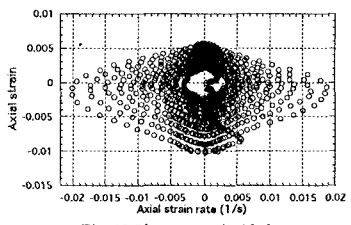


Fig. 12 Phase space in 10-th stage

変化を示さず、常に1以上の値を保っているが、それを越えたせん断応力比のレベルになると鋭敏かつ大幅にフラクタル次元が低下している。

図5～図8は、フラクタル次元が急激な変化を呈した前後の荷重レベルにおける履歴曲線であり、これらに対応する軸ひずみ相空間図をそれぞれ図9～図12に示す。図9～図12によれば、第7載荷段階までは、軸ひずみ相空間軌道は閉曲線的な軌道上を回転し続けるが、第8載荷段階以後になると、始めは閉曲線的な安定軌道を描いていても、突然それをはずれて、発散的に拡大し続ける軌道へと遷移している。この状態になった時には、軸ひずみ及び軸ひずみ速度の増加率が顕著に大きくなっており、供試体は急激な耐荷力の低下を生じている。そして、この耐荷力の急激な低下現象は、図1～図4で示されるこの現象を定量化したフラクタル次元の鋭敏な変化の仕方として現れている。

4. 結語

以上の検討結果より得られた結論を以下に示す。

- (1) 一定振幅の繰返し荷重下で0.1%程度以上の軸ひずみが生じた段階で、軸ひずみ相空間軌道は、閉曲線的な安定軌道を突然離れ、発散的に拡大する現象を呈する。
- (2) 軸ひずみ相空間軌道の不安定な発散現象は、供試体の破壊および耐荷力の著しい低下を示すものであるが、この現象の発生は、フラクタル次元のせん断応力比依存性曲線により、定量化して表現することが可能である。
- (3) フラクタル次元のせん断応力比依存性曲線は、新たな動的物性値として、より高精度な地震応答解析のために寄与し得る可能性がある。