

## 水平 2 方向入力地震動が砂地盤の非線形地震応答に及ぼす影響の解析的検討

群馬工業高等専門学校 学生会員 ○浅見 健斗  
 京都大学防災研究所 正会員 上田 恭平  
 株式会社クレアテック 非会員 下保 亮太

群馬工業高等専門学校 正会員 井上 和真  
 福井工業高等専門学校 正会員 芹川 由布子  
 株式会社クレアテック 非会員 服部 孝生

### 1. 研究の目的

実際に発生する地震は水平 2 方向に複雑な軌跡を描いて振動する。しかし、構造物や地盤の耐震設計・耐震性能評価などの実務においては、直交する水平 2 方向を各 1 方向に独立させて入力する地震応答解析を行うことが一般的である。建築・土木構造物の設計用地震動は、応答スペクトルで規定される場合が多く、それに適合したスペクトル適合波を入力して地震応答解析が実施されている<sup>1)</sup>。また、構造物、地盤を対象に水平 2 方向入力や作用に関する様々な検討がなされてきたが、軌跡特性を考慮した水平 2 方向入力地震動に対する砂地盤の有効応力解析、液状化の評価は行われていない。そこで本研究は、軌跡特性の異なる地震動を水平 2 方向に入力して地盤地震応答解析を実施することで、砂地盤の非線形地震応答に及ぼす影響の評価を行う。

### 2. 地盤地震応答解析の解析条件

#### 2.1 地震応答解析プログラムおよび解析モデル

本研究で使用した地震応答解析プログラムは、時間領域における逐次非線形解析を行う FLIP3D<sup>2)</sup>である。解析モデルは、高さ 0.50m、幅 0.05m、奥行 0.05m の土柱モデルを深度方向に 10 層に分割を行い、3 次元有限要素モデルで設定した。地盤を対象とした振動台実験では、相似則を適用して想定される地盤を高くすることが一般的である。本研究は振動台実験を見据えて縮尺を 1/8 に設定し、相似則を適用した。これにより、縮尺変更前の想定される高さは 4.00m となる。地盤材料は、相対密度 70% に締め固めた珪砂を対象とした。表 1 に本研究で使用した地盤物性値を示す。川野ら<sup>3)</sup>による珪砂 6 号の物理試験の結果を参考に設定を行った。

#### 2.2 入力地震動

地震応答解析における入力地震動は、道路橋示方書<sup>1)</sup>に示されているレベル 2 地震のタイプ II の I 種地盤の兵庫県南部地震神戸海洋気象台地盤上観測波 NS 成分

の振幅調整波（以下、II-I-1 波）とその応答スペクトルを基本とし、同一の 2 方向応答スペクトルに適合する地震動を使用する。表 2 に入力加速度の一覧を示す。本研究で使用する入力地震動は、1 方向に入力を行う直線軌跡、ヒルベルト変換を行うことで円形の軌跡を描く円形軌跡、兵庫県南部地震で観測された JMA 神戸観測波を使用した実位相軌跡の 3 ケースである。図 1 に 2 方向加速度応答スペクトルを示す。図 1 より、各ケースの 2 方向応答スペクトルは概ね一致しているためことが確認できるため、地震動の軌跡特性の違いが非線形地震応答に及ぼす影響を評価することが可能である。

表 1 本解析で使用した地盤物性値

多重せん断ばねモデル	初期せん断剛性 (kN/m <sup>2</sup> )	2.102×10 <sup>4</sup>	体積弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	5.482×10 <sup>4</sup>
	内部摩擦角 (°)	33.08	変相角 (°)	28
	間隙水	間隙率 (%)	40.8	体積弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )

表 2 入力地震動の一覧

加速度軌跡	成分	地震動	基本振幅倍率
直線軌跡	x	II-I-1波	1.0
	y	入力なし	—
円形軌跡	x	II-I-1波	1.0
	y	II-I-1波の相補直交成分波 (ヒルベルト変換波)	1.0
実位相軌跡	x	JMA神戸観測波の EW成分の振幅調整波	1.0
	y	JMA神戸観測波の NS成分の振幅調整波	1.0

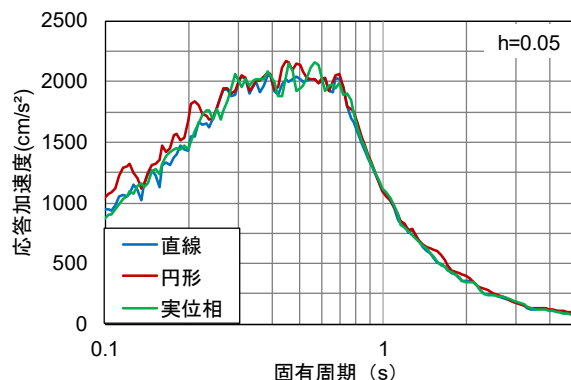


図 1 使用した地震動の 2 方向加速度応答スペクトル

### 3. 地震応答解析結果

図2に水平2成分の2乗平方根を振幅倍率0.1倍の結果で正規化した最大せん断ひずみ分布の結果を、図3に直線軌跡の結果で正規化した結果を示す。図2より、全ての軌跡特性において振幅倍率0.2倍で大きくなることを確認した。図3より、最大せん断ひずみの増加倍率は1方向入力(直線軌跡)と2方向入力(円形軌跡, 実位相軌跡)では異なり、3ケースの軌跡特性で円形軌跡が一番大きくなることを確認した。円形軌跡の増加倍率が大きいのは、図1の2方向加速度応答スペクトルより、短周期における円形軌跡の応答加速度が、他の軌跡よりも大きいことが影響したと考えられる。

### 4. 結論および今後の展望

最大せん断ひずみ分布の結果から、全ての軌跡特性において、振幅倍率0.2倍で大きくなることを確認した。また、1方向入力と2方向入力では最大せん断ひずみ増加倍率の結果は異なり、3ケースの加速度軌跡のなかで円形軌跡の増加倍率が大きくなることを確認した。

今後の展望としては、様々な加速度軌跡や異なったモデルで解析を行うことで水平2方向入力の軌跡特性の影響を評価する。また、本研究は解析的に検討を行ったが、振動台実験等で実験的に評価を行う必要がある。

#### 謝辞

本研究で使用した地震観測記録は、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の観測記録を使用させていただきました。また、本研究は科研費20K14816及び東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携研究プログラムの助成を受けたものです。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2017.
- 2) FLIPコンソーシアム：液状化による構造物被害予測プログラム(3次元解析機能)FLIP3D(Ver.1.6)取扱説明書，2014.
- 3) 川野ら：乾燥模型砂地盤における各種貫入試験による地盤評価結果の比較(その1：砂資料の土質試験結果)，地盤学会 第39回地盤工学研究発表会，pp.113-114,2004.

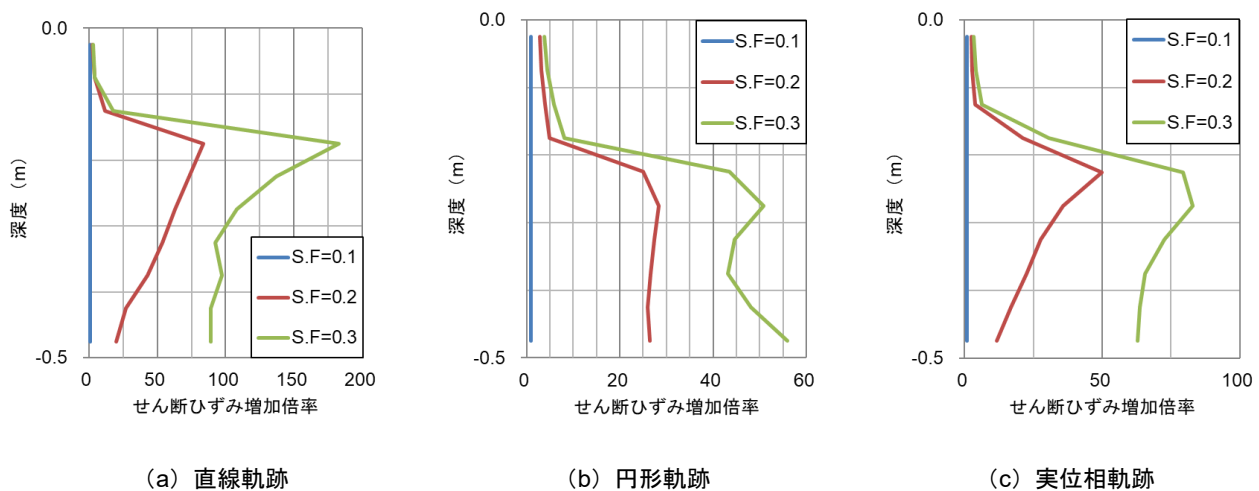


図2 最大せん断ひずみ増加倍率分布図(振幅倍率の違い)

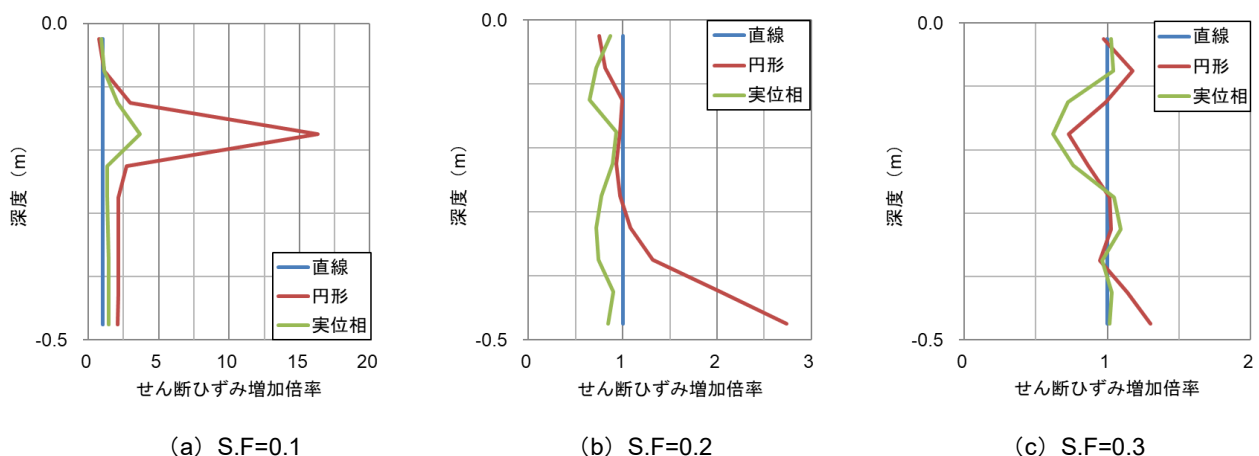


図3 最大せん断ひずみ増加倍率分布図(軌跡特性の違い)