

Ⅲ-A117

地盤のダイレイタンスに起因する上下動について

奥村組 正会員 ○森尾 敏 日下部 伸

1. まえがき

地震動での上下動の強さは水平動の1/2～1/3程度といわれ、構造物の耐震設計では通常鉛直方向地震動は考慮されない。しかし、兵庫県南部地震のような都市直下型地震では上下動も大きく、これが高架橋等の構造物の倒壊に影響したことも考えられる。

筆者らは、兵庫県南部地震（神戸JMA、神戸大学）での上下動は、SV波の不連続境界面への斜め入射によるS～P変換波である可能性が高いことを示した¹⁾。しかしながら、水平動による塑性変形が大きい場合、地盤のダイレイタンスに起因する上下動も無視できないものと考えられる。

本報告では、ダイレイタンス特性の異なる幾つかの構成式を用いて大嶋ら²⁾の振動台模型実験のシミュレーション解析を行い、ダイレイタンス特性と上下動の関連、水平動によって生じる上下動の特性について検討した。

2. 大嶋ら²⁾の振動台実験とそのモデル化

大嶋らの実験のうち、200gal、35Hzの正弦波による水平加振実験を対象とする。35Hzは、土層（深さ50cm）の共振点である。図-1に地表面の水平、上下方向加速度を示す。

解析モデルは、平面ひずみ四角形要素を10個縦に1列並べたもので、同レベルの節点の水平、上下変位を等しくして、単純せん断変形を表現した。解析ケースを表-1に示す。CASE1N、2Nは汎用プログラムMSC/NASTRANによる解析で、NAPOLI³⁾による解析の検証に使用する。

構成式は、硬化係数=0のDrucker-Pragerモデルを降伏曲面fとし、塑性ポテンシャル曲面gを表-1に示す。dt=0.0005sec、せん断剛性G=6845kPa、

内部摩擦角 $\phi=27.5^\circ$ 、粘着力 $c=1\text{kPa}$ 、ポアソン比 $\nu=1/3$ 、質量 $\rho=1.389\text{g/cm}^3$ である。

3. 解析結果と考察

CASE1、1N、2、2Nの地表面の水平、上下方向加速度を図-2に示す。振幅の大きな波形が水平動、この2倍の振動数の振幅の小さな波形が上下動である。

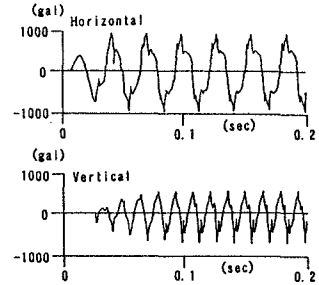
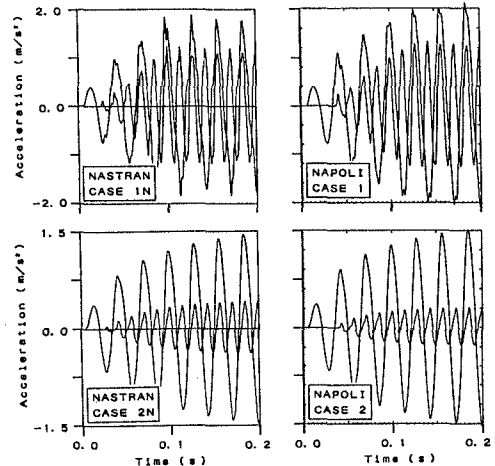
図-1 大嶋ら²⁾の実験結果

図-2 CASE1、1N、2、2Nの加速度波形

表-1 解析ケースと解析結果

解析 ケース	初期応力 状態 K。	塑性ポテンシャル 曲面	Dilatancy の方向	減衰定数 h (%)	最大加速度 (cm/s²)		鉛直動 の方向	解析 プログラム
					水平	鉛直		
CASE 1	0.5	Drucker-Prager	膨張	0.0	2122	1329	+	NAPOLI
CASE 1N	0.5	Drucker-Prager	膨張	0.0	1890	1230	+	NASTRAN
CASE 2	0.5	Drucker-Prager	膨張	5.0	1546	317	+	NAPOLI
CASE 2N	0.5	Drucker-Prager	膨張	5.0	1460	420	+	NASTRAN
CASE 3	0.5	Von Mises	なし	5.0	1182	84	-	NAPOLI
CASE 4	0.5	Densification	収縮	5.0	1055	513	-	NAPOLI
CASE 5	1.0	Drucker-Prager	膨張	5.0	1441	406	+	NAPOLI
CASE 6	1.0	Von Mises	なし	5.0	1032	8	なし	NAPOLI

土の構成式、ダイレイタンス、地震応答解析、上下動、振動台実験、

〒545 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2、奥村組 電算センター、TEL(06)625-3776、FAX(06)623-7699

NASTRANとNAPOLIによる解析は、ほぼ一致しているものと判断される。ただし、水平/上下動の位相については、図-1では水平動の土のピーク時に上下動が負(下向き)であるのに対し、図-2の上下動は正(上向き)である。これは、実験で表れた上下動が地盤の負のダイレイタンスに起因することを示すものと考えられる。

用いた構成式のダイレイタンスの方向、地表面の最大加速度、水平動がピーク時の上下動の方向を表-1に示す。CASE1~5の上下動の振動数は、すべて水平動の2倍である。また、同表において、CASE1、1N、2、2N、5は関連流れ則、その他は非関連流れ則である。

表-1において、塑性体積ひずみの生じないCASE3で負のダイレイタンスを有するCASE4と同じ方向の上下動が発生することは興味深い。この理由は、次のように説明される。Von Misesモデルにおいて、次式が成り立つ。

$$\partial g / \partial \sigma_{ij} = \sqrt{3} s_{ij} / (2 J_2^{1/2}) \quad (1)$$

ここで、 σ_{ij} は応力テンソル、 s_{ij} は偏差応力、 J_2 は s_{ij} の2次不変量である。上式より、 $(\partial g / \partial \sigma_{ij}) \delta_{ij} = 0$ であり、体積成分は生じない。しかし、地盤が異方応力状態($K_0=1/2$)であるとき、 s_{ij} の対角項はゼロではなく、塑性偏差ひずみ de_{ij}^p が生じることになり、これを打ち消す方向の弾性偏差ひずみ de_{ij}^e によって上下動が発生する。その方向と大きさは K_0 によって変わり、通常の $K_0=1/2$ の地盤では、負のダイレイタンスによる上下動と同じ向きになる。

一方、地盤が等方応力状態のCASE6では、 s_{ij} の対角項はゼロであり、上下動は発生しない。

図-3にCASE3、4、5、6のせん断応力~せん断ひずみ関係と応力経路を示す。CASE3、4では、平均応力 σ_m が増加(圧縮を負)する方向で応力点が降伏曲面(破壊曲面)へ到達するのにに対し、正のダイレイタンスを有するCASE5では、 σ_m が減少する方向で降伏曲面へ到達する。このことは、負のダイレイタンスを有する地盤は、土の破壊(不安定)を進行させる方向に上下動が生じることを示すものと考えられる。

4. 上下動の共振について

表-1の解析では、土層の卓越振動数(35Hz)

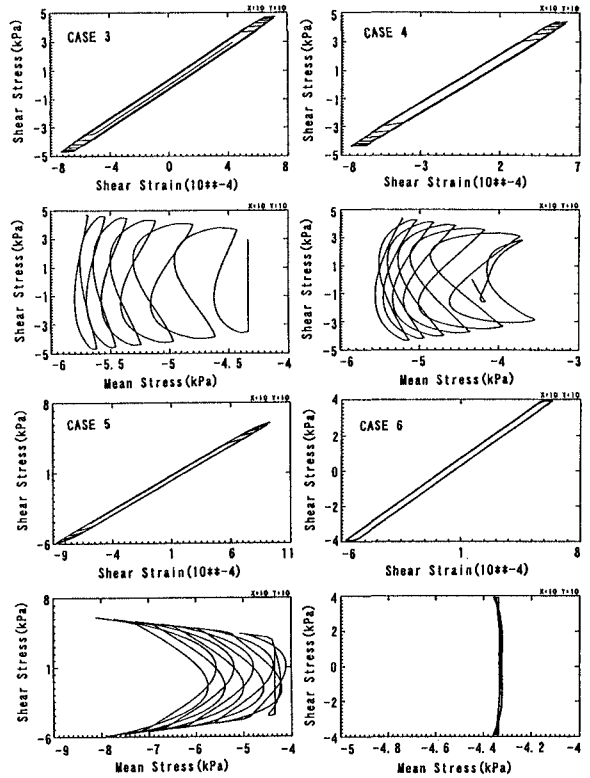


図-3 応力~ひずみ関係、応力経路

で共振するよう調整したせん断剛性 G を用いた。

$$V_s = (G / \rho)^{1/2} \quad (2)$$

$$V_p = [2(1-\nu)G / \{(1-2\nu)\rho\}]^{1/2} \quad (3)$$

$$f_H = V_s / (4H) \quad (4) \quad f_v = V_p / (4H) \quad (5)$$

式(2)を式(4)に、式(3)を式(5)に代入し、 $f_v = 2f_H$ を考慮すると、 $\nu=1/3$ が得られる。ただし、 f_H 、 f_v は、水平および上下方向地盤卓越振動数である。この結果は、通常の $\nu=1/3$ ($K_0=1/2$)の地盤では、水平動に関する共振時には、それによって発生する上下動も共振状態にあることを示す。すなわち、図-1の実験は、水平、上下ともに共振状態にあることが予測される。

5. あとがき

本解析では、粘性減衰として剛性比例型を用いたため、上下動の減衰を、水平動の2倍に設定したことになる。振動数に依存しない減衰を用いれば、上下動の振幅は更に大きくなる。

参考文献

- 1) 地盤工学会、「阪神・淡路大震災調査報告書」、pp.126-130、1996.3
- 2) 大嶋ら、土木学会論文誌、NO.489/1-27、1994.4
- 3) 森尾、山口大学学位申請論文、1995.9