

水平・上下動の同時入力を伴う等価線形解析における体積弾性係数の設定

(財)電力中央研究所 正会員 ○金谷 守 石川博之
東京電力(株) 正会員 金戸俊道

1. はじめに

地盤の上下動応答に影響を及ぼす要因に、地下水以深の間隙水の存在が挙げられる。著者らは、等価線形解析を用いて水平動と上下動の同時入力を伴う地震応答解析を行う際の地盤剛性、とりわけ体積弾性係数の設定方法と、従来のポアソン比一定等価線形解析の適用範囲の簡易評価法について検討を行ってきた¹⁾。本報告では、地下水以深の地盤が不飽和な状態である場合も含めてポアソン比一定等価線形解析の適用範囲を簡易に評価する考え方について示す。

2. 二相系地盤の体積弾性係数と P 波速度

地盤を等方均質弾性体とみなして Biot の理論に基づくと、間隙に水が存在する二相系地盤の体積弾性係数 K と P 波速度 V_p (側方変位拘束条件)は、土骨格の体積弾性係数 K_b が土粒子の体積弾性係数 K_s に比べて十分に小さいとすると次式で近似される。

$$K = K_b + \frac{K_{aw}}{n} \tag{1}$$

$$V_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left\{ \left(K_b + \frac{4}{3}G \right) + \frac{K_{aw}}{n} \right\}} \tag{2}$$

ここに、 K_{aw} : 間隙水の体積弾性係数、 n : 間隙率、 ρ : 土の密度、 G : せん断弾性係数である。

また、土骨格の体積弾性係数 K_b は、骨格のポアソン比を ν とすると、次式で表現される。

$$K_b = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)}G \tag{3}$$

ここで、 $G = \rho V_s^2$ であることから式(2)、(3)より、間隙水の体積弾性係数 K_{aw} は、飽和、不飽和に係わらず次式で表現されることになる。

$$K_{aw} = n\rho \left\{ V_p^2 - \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} V_s^2 \right\} \tag{4}$$

3. 等価線形解析における体積弾性係数の評価

従来のポアソン比一定等価線形解析では、 V_p は式(5)で評価され、発生ひずみが大きく G の低下がはげしくなると、図-1 に示すように K も大きく低下するように評価さ

れることになる。

$$V_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K + \frac{4}{3}G \right)} \tag{5}$$

これは、式(1)から明らかなように、間隙に水を含む地盤の体積弾性係数が K_{aw}/n より小さくなり得ないことと矛盾する。この点を比較的簡易に修正する方策として、著者らは地下水以深の地盤に対して図-2 に示すように K を初期値 K_0 一定として解析することを提案している¹⁾。

4. ポートアイランド地震観測結果の解析

1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震観測記録を対象に、水平動と上下動の同時入力による比較解析を行った。解析用の基本的な地盤物性値、動的変形特性は、神戸市開発局²⁾ が実施した調査結果に基づいて設定し、地下水面はGL-4mとした。表-1に基本的な解析用地盤物性値ならびに式(4)による各層における間隙水の体積弾性係数 K_{aw} ($\nu=0.2$) を示している。

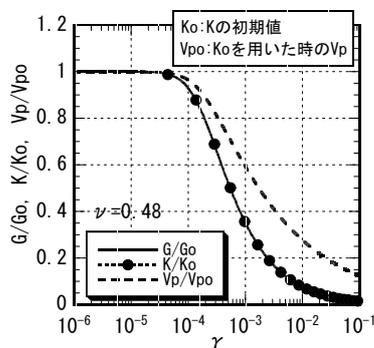


図-1 ポアソン比一定条件での非線形曲線の例

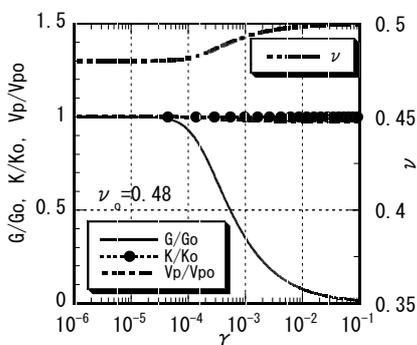


図-2 体積弾性係数一定条件での非線形曲線の例

キーワード：等価線形解析、地盤、上下動応答、体積弾性係数、不飽和

連絡先：千葉県君孫子市我孫子 1646、電話：04-7182-1181、FAX：04-7184-2941

解析ケースは以下の通りとした。

CASE1：すべての層に対してポアソン比 ν 一定とする従来の方法

CASE2：すべての層に対して K が初期値一定とする方法

CASE3：地下水以浅は従来型、地下水以深は K 初期値一定とする方法

図-3に最大上下加速度の深度分布の比較を示す。全層ポアソン比一定とした従来型のCASE1は、他に比べて全体的に応答が小さくなっており、特に地表付近における上下動の増幅が十分に再現されていない。それに対して、CASE2およびCASE3では、地表付近で上下動が大きく増幅する傾向が現れており、地表での観測結果との一致度もCASE1に比べて良好である。また、少なくとも地表面での加速度値はCASE3が最も一致度が高いといえる。この結果は、等価線形解析で水平・上下動同時入力を伴う地震応答解析を行う場合には、 K 一定解析によるのが基本であることを示している¹⁾。

5. ポアソン比一定等価線形解析の適用範囲の簡易推定

式(2)は、土骨格の剛性($K_b+4G/3$)が極端な場合ゼロになっても、 K_{aw}/n は不変であり V_p は間隙水の存在によりゼロにはなり得ないこと、($K_b+4G/3$)が初期の状態では K_{aw}/n よりもかなり小さい場合には、地震による地盤の軟化に係わらず V_p は間隙水による剛性で支配されることを意味している。そこで著者らは、比較的簡易に ν 一定解析の適用可能な領域を推定する方法として飽和地盤の条件における簡易推定法を提案した¹⁾。一方で、地下水以深の地盤は必ずしも完全に飽和状態にあるとは限らないことから、不飽和な地盤まで対象を拡張しておくことが望ましい。すなわち、従来型のポアソン比一定等価線形解析では、 V_p は式(5)で評価されることから、従来型の等価線形解析で飽和、不飽和条件によらず地盤の上下応答を正當に解析するためには、式(5)に対して次式の条件が求められるべきである。

$$K + \frac{4}{3}G \geq \frac{K_{aw}}{n} \tag{6}$$

式(6)を満足するような条件の場合には、従来の ν 一定解析を用いて水平・上下動同時入力による上下動応答を評価することが可能であるが、上記の条件を満足しない場合には、間隙水の影響を解析で十分に考慮できないため、 K 一定解析を行うべきであり、等号が成立する条件が、境界値であると見なし得る。ここで、この境界値に相当する V_s を V_{sl} とすると次式が成立する。

$$V_{sl} = \sqrt{\frac{(1-2\nu)K_{aw}}{2n\rho(1-\nu)}} \tag{7}$$

上記の関係式をもとに、ポートアイランドの解析結果に対して、収束計算により最終的に解析に用いられた V_s と式(7)による V_{sl} との比 V_s/V_{sl} の深度分布を示したものが

表-1 解析に用いた基本的な地盤物性値

深度	地層区分	密度	S波速度	P波速度	ポアソン比	間隙率	間隙水の体積弾性係数
(m)	(-)	(g/cm ³)	(m/s)	(m/s)	(-)	(-)	(MPa)
GL		ρ	V_s	V_p	ν	n	K_{aw}
0.0-2.0	埋立土	1.70	170	260	0.092	0.286	(-)
2.0-4.0			330	0.271			
4.0-8.5			780	0.444			
8.5-13.0			1480	0.485			
13.0-18.0	沖積粘土	1.70	180	1180	0.482	0.600	1332
18.0-27.5	洪積砂	2.00	245	1330	0.474	0.333	1071
27.5-32.4			305	0.459	1013		
32.4-37.5			第1洪積砂礫	1530	0.470		1394
37.5-49.5				350	0.464		1509
49.5-61.5			洪積粘土	1.70	303		1610
61.5-82.0	第2洪積砂礫	2.20	320	2000	0.481	0.333	2730

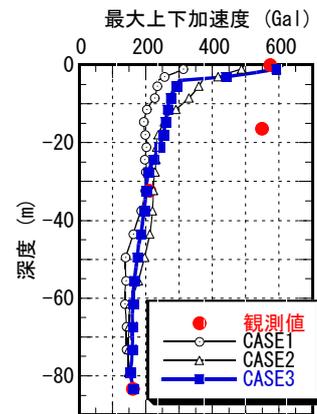


図-3 最大上下加速度の深度分布の比較

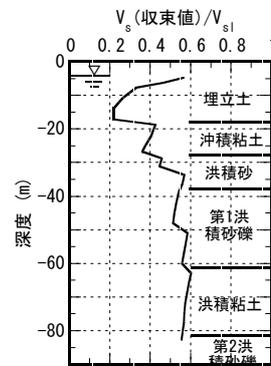


図-4 V_s/V_{sl} の深度分布

図-4である。地下水以深のいずれの層に対しても V_s/V_{sl} は1.0を大きく下回っていることから、本解析では K 一定解析によって上下動応答を評価しなければならないことになるが、先に示した通り、比較解析結果もそれを支持するものになっている。

参考文献

- 1) 金谷守, 石川博之, 金戸俊道: 等価線形解析を用いた地盤の上下動応答解析に関する一考察, 第11回日本地震工学シンポジウム, 2002.
- 2) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査 (ポートアイランド, 六甲アイランド), 報告書, 1995.