

地震動上限値と地盤のせん断強度の関係に関する一検討

佐藤工業(株) 正会員 ○末富 岩雄
京都大学防災研究所 正会員 澤田 純男
佐藤工業(株) 正会員 吉田 望

1. はじめに 1995年兵庫県南部地震の際、ポートアイランドの鉛直アレーで埋土の液状化により地表での加速度が地中での加速度よりも小さくなる現象が観測された。地盤がそのせん断強度以上のせん断力を上層に伝えることができないためである。したがって、震源特性に起因する地震動の上限値のみならず、地盤のせん断強度に起因する地震動の上限値が存在すると考えられる。地震動上限値を把握することは、耐震設計や地震防災のために有用である。本研究では、内部摩擦角をパラメータとしてせん断強度を与えた簡易な地盤モデルについて、地盤の非線形地震応答解析を行い、地震動上限値を評価する。

2. 解析方法 表-1に示すように様々な地盤条件で表層地盤の非線形地震応答解析(全応力非線形解析)を行う。 $G-\gamma$, $h-\gamma$ 関係として、H-Dモデル¹⁾²⁾を用いる。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}}, \quad \frac{h}{h_{max}} = \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) \quad (1)$$

規準化ひずみ γ_r は、 $\gamma_r = \tau_{max}/G_0$ で与えられる。砂地盤では、 $\tau_{max} = \sigma_v' \tan \phi$ なので、表-1に示すように内部摩擦角 ϕ を与えれば、 $G-\gamma$, $h-\gamma$ 関係が決定される。 G に関しても、拘束圧依存性を考慮し、深度5mで、所定のS波速度となるように与える。なお、一次固有振動数で0.5%となるように、剛性比例減衰を入れている。所定のS波速度を与える深度5mでの $G-\gamma$, $h-\gamma$ 関係を図-1に示す。内部摩擦角 ϕ の影響が大きく、 ϕ が小さいほど G と h は大きく変化する。接線剛性法により、数値積分を行う。

入力地震波としては、1995年兵庫県南部地震時のポートアイランドGL-83mにおける観測記録(NS成分)から抽出した工学的基盤入射波(最大加速度685 cm/s²(2E))を用いる³⁾。これを50~2000 cm/s²(2E波)まで振幅調整して入力する。

3. 解析結果 層厚10m, S波速度100m/sのケースにおける入力値(2E)と地表での最大値指標の関係を図-2に示す。最大加速度、計測震度、SI値については、入力がある値に達すると、地表での値が一定となることがわかる。図-3に示すように、せん断強度 τ_{max} でせん断応力は頭打ちとなり、加速度も図-4に示すように頭打ちとなる。入力が大きくなっても、上限加速度が作用する時間が長くなる(長周期化)だけである。上限値に達した状態では、深度10mまでのほぼ全層でせん断応力がほぼせん断強度に達している。この状態では地盤が応答を示しているとは言えず、地盤構成が複雑な実地盤では最大加速度はより複雑で安定した上限値が得られない可能性がある。一方、最大速度、最大変位については、必ずしも頭打ちとはなっていない。むしろ内部摩擦角が30~40°の場合には、卓越周期が伸びることにより増幅度が大きくなる傾向が見られる。構造物に作用するエネルギーの量は入力地震動が大きくなるほど、大きくなると考えられる。SI値と最大速度は、入力値と地表値が比例関係にある間はよく対応しているが、SI値が上限値に達した後では、全く異なった特性を示している。

最大加速度、計測震度、SI値について、内部摩擦角と上限値の関係を図-5に示す。いずれの指標についても内部摩擦角が支配的であり、 $\tan \phi$ とほぼ比例関係にある。S波速度の影響はほとんどなく、層厚が薄いほど上限値はやや大きくなる傾向にある。従来、N値との統計的關係を用いて土のせん断強度を評価する機会が多いが、上述のようにせん断強度は地震動上限値を支配する重要なパラメータであり、レベル2地震動のような大きな入力を考える場合には、土質試験を実施して評価することが必要であろう。重要構造物については残留変形をも考慮できる非線形地震応答解析を行っていくべきであると思われるが、一般構造物については上限地震動に基づいた設計体系を構築することでレベル2地震動を考慮した合理的な設計が可能になると考えられる。

表-1 地盤条件

単位体積重量(kN/m ³)	18
S波速度(m/s)	100, 150, 200, 250
内部摩擦角 ϕ (°)	5, 10, 20, 30, 40
最大減衰定数 h_{max} (%)	22
層厚(m)	10, 20, 30
地下水位	GL-3.0m

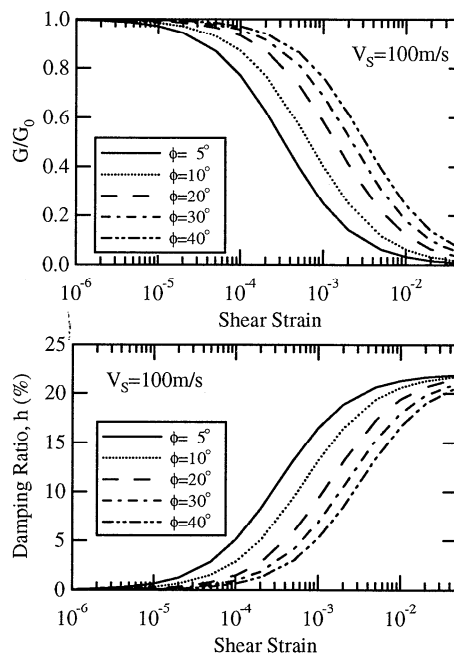


図-1 H-Dモデルによる $G-\gamma$, $h-\gamma$ 関係の例

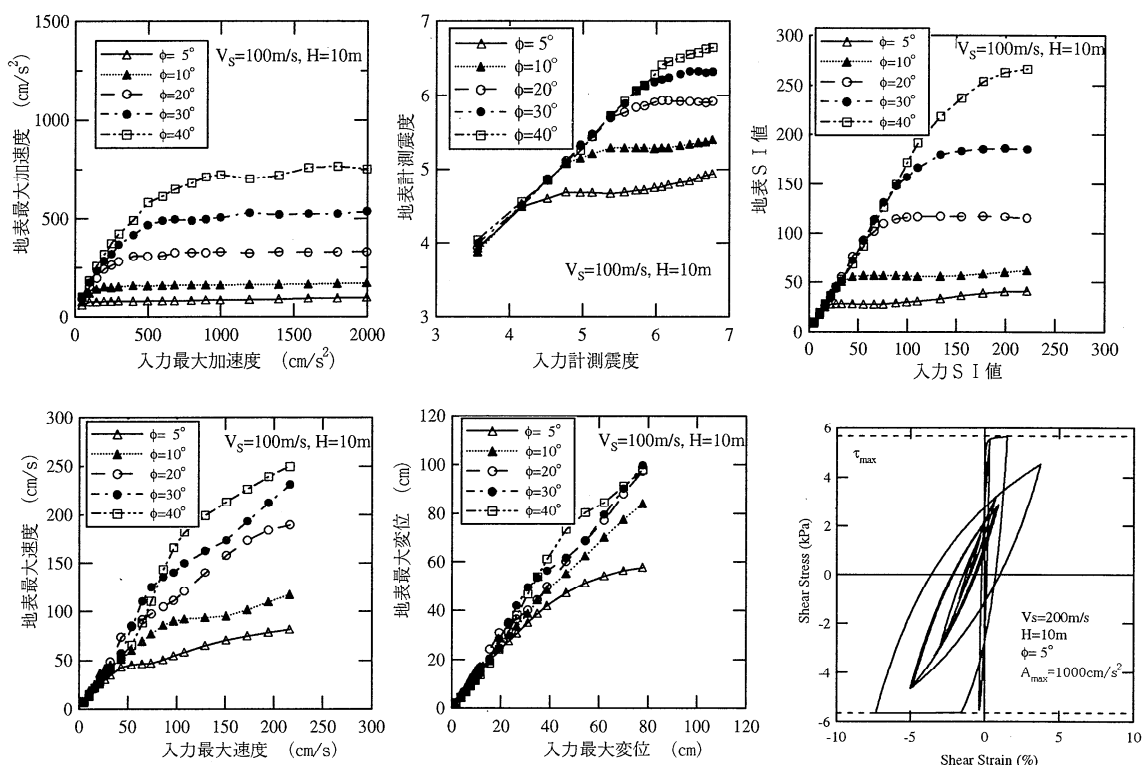


図-2 最大値指標の非線形増幅特性（S波速度 100m/s，層厚 10m の場合）

図-3 応力-ひずみ関係の例

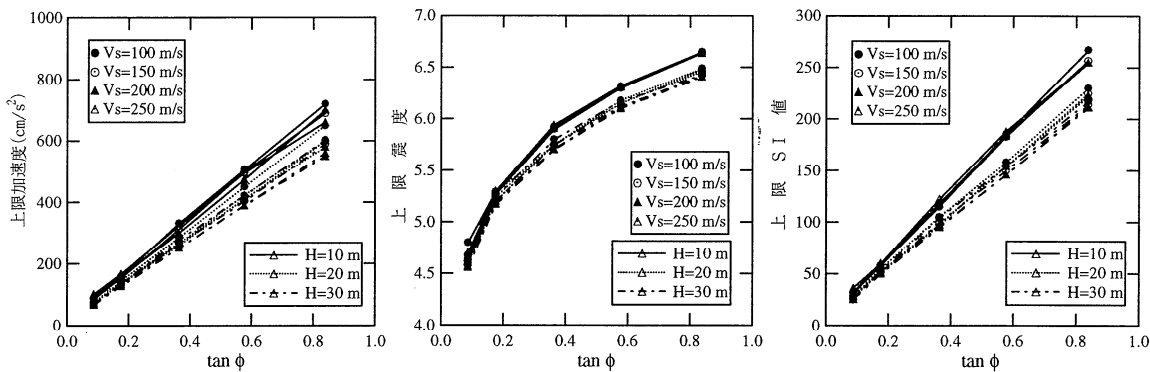


図-5 地震動上限値と内部摩擦角の関係

4. おわりに 本研究により，地震動上限値に関して以下のことが明らかになった。

- 1) 地盤の内部摩擦角をパラメータとする上限値が，最大加速度，計測震度，SI 値について存在する。
- 2) 内部摩擦角が小さいほど，小さな入力レベルで地震動の上限値に達する。
- 3) S波速度や層厚が上限値に与える影響は小さい。

今後，さらに実務へ反映させるための検討を行う予定である。

参考文献 1)Hardin,B.O. & V.P.Drnevich ; Shear moduli and damping in soils: Design equations and curves, *J.SMFD, ASCE*, 98(SM7), pp.667-692, 1972. 2)Ishihara, K., N.Yoshida & S.Tsujino ; Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, *Proc. 5th International Conference for Numerical Method in Geomechanics, Nagoya*, Vol. 1, pp. 373-380, 1985. 3)Suetomi,I. & N.Yoshida ; Nonlinear behavior of surface deposit during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, *Special issue of Soils and Foundations*, pp.11-22, 1998.

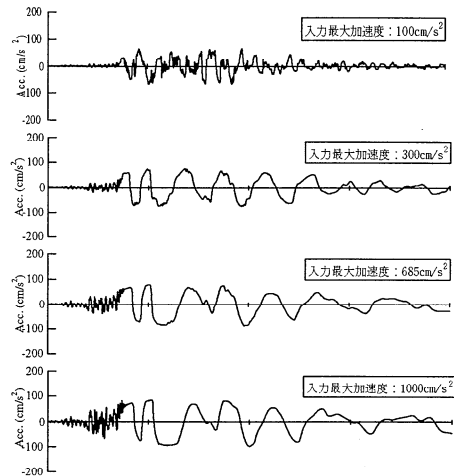


図-4 地表面加速度波形の例