

東北大学工学部 学生員 ○萩原 綱
佐藤工業(株) 中村 晋
東北大学工学部 正会員 飛田 善雄

1. はじめに.

新潟地震(1964)以来液状化現象は 地盤の破局的被害として注目されている。1983年5月26日に発生した日本海中部地震では、青森・秋田両県に液状化による被害が多く生じた。中でも八郎潟干拓地は完成以来 青森県西方沖地震(1964)、新潟地震(1964)、十勝沖地震(1968)により液状化による堤体沉下 すべり破壊等の被害が多数生じている。これらの被害は八郎潟の地盤構造が、軟弱な沖積粘土に敷砂をほどこした構造であることに起因すると考えられる。従来の液状化に対する判定は、地盤の剛体的挙動に基づき作用応力を決定している。しかしながら八郎潟の様な中間軟弱層を有する飽和砂地盤の振動特性は、この様な仮定とは全く異なる。本論文では、この様な軟弱地盤上の砂質土盤に対する作用応力の適切な評価のために行なった解析結果について記す。

2. 地震応答解析

地震応答解析は、地盤材料の非線形性を考慮し地盤を水平成層と仮定した一次元有効応力解析により行なった。間げき水圧発生モデルは、内部変数モデルを考慮した。以下に概要を述べる。

i) 運動方程式

水平方向の運動方程式は セン断波の伝播に伴う土中内つり合い方程式(1)を用いた。さらに図-1に示す様に応力-歪関係が、 Δt 間に線形であるとした(2)式を用い(1)式に適用した(3)式を本論文では用いた。また波動方程式(3)を図-2に示すような lamped マス系に離散化を行なった。下方境界には 地下途散減衰を考慮した粘性境界を用いた。減衰には Rayleigh 減衰 ($\alpha=0.6$ $\beta=0.012$)を用い時間積分にはニューマークの β 法 ($\beta=1/4$ $\Delta t=0.01$)を用いた。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad \cdots \cdots 1) \quad \tau = G(\gamma - \gamma_0) + \tau_0 \quad \cdots \cdots 2) \quad \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_0 - G \gamma_0) \quad \cdots \cdots 3)$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\}$$

$$\text{但し } [M] = M_{ij} \delta_{ij}, [C] = C_{ij} \delta_{ij}, K_{ii} = K_{i,i} + K_{i,i}, K_{i,i} = K_{i,i} = -K_{i,i}$$

$$C_{nn} = C_n + \rho V_s, f_i = -(T_{0,i} - G_{0,i} \delta_{0,i}) + (T_{0,i} - G_{0,i} \delta_{0,i}), f_n = -(T_{0,n} - G_{0,n} \delta_{0,n})$$

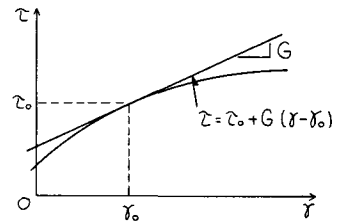


図-1 応力-歪関係

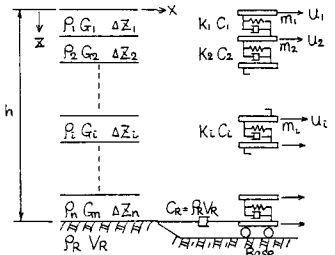


図-2 Lamped mass model

応力-歪関係は、図-3及び4)式に示す Modified Hardin-Drnevich モデルを用いた。履歴特性には、Masing則を用いた。

$$\tau = \frac{G_{mo} \gamma}{1 \pm G_{mo} / \tau_{mo} \gamma} \quad \cdots \cdots 4)$$

ここで τ : 動的せん断応力 G_{mo} : 初期せん断定数

γ : 動的せん断ひずみ τ_{mo} : 初期最大せん断応力

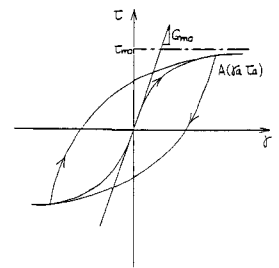


図-3 ヒステリシス Loop

iii) 間げき水圧発生モデル

間げき水圧発生モデルとして、セン断ひずみが内部構造の変化を表現するものとして飛田らが提案した次式を用いた。

$$\chi = \exp(\lambda |\epsilon|) \sum_{i=1}^n |\epsilon_i| \quad \cdots \cdots 5) \quad u/\alpha_0' = \alpha \chi / (\chi + \beta) \quad \cdots \cdots 6)$$

ここで t_c : 第1番目の時間-ひずみ曲線の半サイクル中のピーク値

α, β, λ : 定数 (本研究では $\alpha=1.0, \beta=0.2, \lambda=5.0$ とした)

σ'_0 : 初期有効応力 λ : 損傷パラメータ

3. 解析モデル

解析には八郎潟の様な中間軟弱層を有する地盤構造をモデル化し、図-5に示すように $V_s = 60 \text{ m}$ を有する軟弱層の厚さを 10 m 20 m とした2ケースを用いた。また土質定数は表-1に示す様に 両モデルとも同一であり、軟弱層の厚さの差異が上部地盤に及ぼす影響の評価を行うため単に軟弱層の厚さを変えたモデルを考慮した。入力波については、図-4に示す川岸町 (NS 0~20 sec) を最大加速度 150 gal に正規化し用いた。

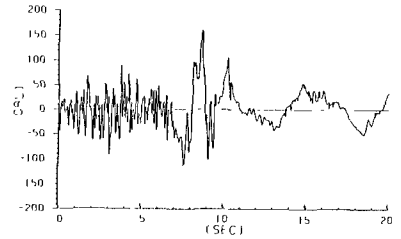


図-4 入力地震波
(川岸町 N-S, $A_{\max} = 150 \text{ gal}$)

4. 解析結果

図-5に示した解析モデルに前述の一次元有効応力解析を適用した結果を、図-6、図-7に示す。ここで図-6には深さ方向の最大応答せん断応力 ($\tau_{\max}$) 分布、図-7には深さ方向の最大応答せん断応力比 ($\tau_{\max}/\sigma'_0$) 分布を示す。さらに図-7には、地表面最大加速度 170 gal を用い、岩崎龍風法による発生せん断応力比を示す。

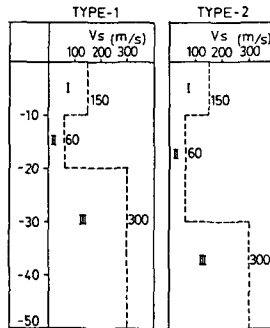


図-5 解析地盤モデル

土質定数	
I	$\gamma_t = 18 \text{ t/m}^3$ $C = 0.0 \text{ t/m}^3$ $\phi = 30^\circ$ $G_0 = 40500 \text{ kN/m}^2$ $m_v = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{t}$ $k = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ $n = 0.4$
II	$\gamma_t = 15 \text{ t/m}^3$ $C = 1.0 \text{ t/m}^3$ $\phi = 0^\circ$ $G_0 = 5400 \text{ kN/m}^2$ $m_v = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{t}$ $k = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ $n = 0.8$
III	$\gamma_t = 18 \text{ t/m}^3$ $C = 0.0 \text{ t/m}^3$ $\phi = 30^\circ$ $G_0 = 162000 \text{ kN/m}^2$ $m_v = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{t}$ $k = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ $n = 0.5$

表-1 土質定数

最大応答せん断応力分布についてみると、TYPE 1 では、 $0.017 \sim 0.032 \text{ t/m}^2$ 、TYPE 2 では $0.055 \sim 0.102 \text{ t/m}^2$ となり、TYPE 2 が TYPE 1 の3倍程度となっている。また最大応答せん断応力比分布についてみると、TYPE 1 では $0.03 \sim 0.22$ 、TYPE 2 では $0.1 \sim 0.66$ となり、TYPE 2 が TYPE 1 の3倍程度となっていることがわかる。

5. 考察

解析結果をみると、TYPE 2 が TYPE 1 の3倍程度の応答を示していることがわかる。これは、軟弱層が厚くなることにより軟弱層において応答変位が増大するため、軟弱層と上部部との境界に応力集中の様子が示したためと考えられる。また従来の液状化判定に用いられている作用応力は、地盤構造に伴う振動特性が評価されていないため、解析結果に比して TYPE 1 は大きく TYPE 2 では小さな値となったものと考えられる。本稿作成の段階では解析値に若干の問題が残っており、結論は導き出せないが、少なくとも TYPE 1、TYPE 2 に見られる様に最大せん断応力 $\tau_{\max}$ 及びその有効上載圧 σ'_0 に対する比は、本解析の対象となった八郎潟干拓堤防の様に、軟弱層上に砂層がある場合には簡易法で仮定している様な分布とは異なる様である。今後、地盤構成及び地盤定数、振動特性及び液状化現象に及ぼす影響を明確にするためのケーススタディを続行する予定である。

6. 謝辞

本論文に多大な御指導を賜った東北大学工学部 柳沢教授に感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 飛田, 柳沢; 第33回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部「地震の特性を考慮した動的剛性水圧制御の構築」
- 2) ISHIHARA, TOHATA; 東京大学工学部紀要「One-Dimensional Soil Response Analysis」
- 3) 石原研而; 「土質動力学の基礎」

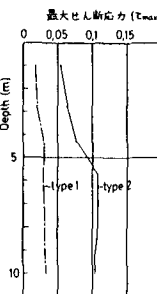


図-6 最大応答せん断応力分布

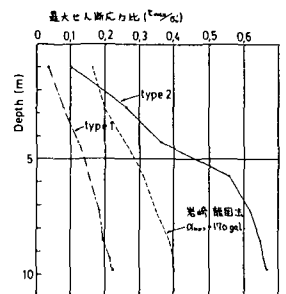


図-7 最大応答せん断応力比分布