

固化改良石炭灰地盤の液状化抑止効果に関する解析的研究

岐阜大学工学部	岡 二三生	岐阜大学工学部	八嶋 厚
岐阜大学大学院	後藤 宇	京都大学工学部	柴田 徹
関西電力株式会社	後藤浩一	ニュージェック	竹澤請一郎

1. はじめに

石炭火力発電所で廃棄される石炭灰は、埋立てられ、新しく発電所を建造するための用地として利用されることがある。石炭灰の液状化特性は、埋立地盤から採取された試料の繰返し三軸試験や原位置コーン貫入試験を行って詳しく研究されている。その結果、石炭灰は非常に液状化しやすい性質を有していることがわかっている。したがって、液状化対策としてなんらかの地盤改良を施す必要がある。本研究では、セメント固化改良体を配置した対策工法について、その有効性を検討した。

石炭灰地盤の液状化を防止するためのセメント固化改良工法の効果を、振動台模型実験と数値解析に基づいて検討した。数値解析では、有限要素-差分法（有効応力法）(Shibata et al., 1991) が用いられている。

2. 振動台模型実験

模型実験に用いたせん断土槽は、内寸で幅 1,400 mm、奥行き 1,000 mm、高さ 600 mm の大きさである。8 個の鋼鉄製の長方形枠がせん断土槽を形成している。それぞれの長方形枠の間に生ずる摩擦は、それらの間に回転軸受けを設ける事で最小限にしている。このようにして形成したせん断土槽は、入力加速度のもとで一次元応答の条件を満足し、可能な限り片持ち梁的な変形を軽減する。

埋立地盤から採取した石炭灰を模型地盤として用いている。まず含水比 100 % の石炭灰を土槽に投入する。ついで、模型地盤は、空隙比を原位置地盤の値 ($e=1.40$) にするため 24 時間自重で圧密させる。最終的に模型地盤は、40~45cm の厚さの飽和した石炭灰地盤となる。現場の埋立地盤と解析に用いる模型地盤の厚さの比は約 13 になるので、この比の相似則を満たすように、実験条件を規定している。模型実験は 3 ケース行う。ケース 1 では、改良体のない未改良モデルの実験を行う。ケース 2 では、固化改良体を壁面に配置し、ケース 3 では壁状に配置した固化改良体に、さらに同質の改良体で側面を連結し、格子状の配置になるようにした。重力場において相似則を満足させるために、シリコンゴム（単位体積重量： $\gamma=1.8 \text{ gf/cm}^3$ 、ヤング率： $E=400 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比： $\nu=0.45$ ）をセメント固化改良体のかわりに用いている。図-1 にケース 2、ケース 3 の平面図を示す。

模型地盤中には、計 31 個の計測器が土の挙動を把握するために設置されている。計測器は、12 個の加速度計、9 個の間隙水圧計、そして 12 個の LVDT である。ケース 2、ケース 3 における計測器の位置を表わした模型地盤断面図を図-2 に示す。ケース 1 では、土槽底部の水平入力加速度がピークで 70gal になるような 5Hz の sin 波を入力波とする。一方、ケース 2、ケース 3 においては、最大加速度が 100gal となるような 5Hz の sin 波を入力波として 20 波入力する。

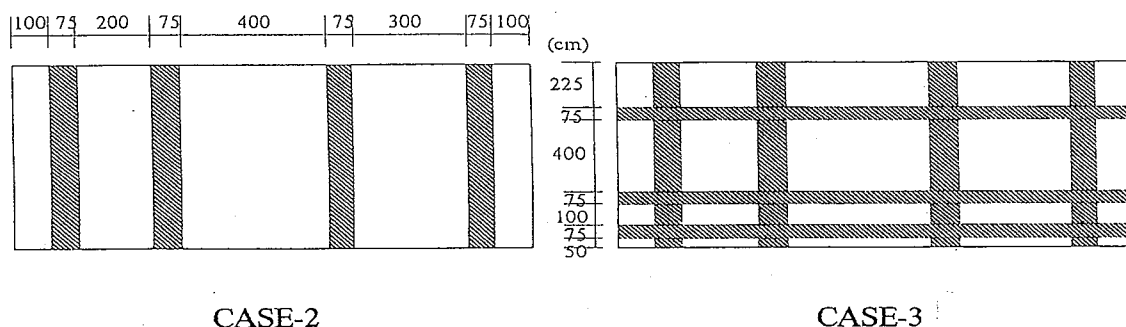


図-1 ケース 2 とケース 3 の模型地盤の平面図

A numerical simulation of shaking table test of coal fly ash deposit with cement mixing column: F.OKA, A.YASHIMA & H.GOTOH (Gifu University), T.SHIBATA (Kyoto University), K.GOTOH (The Kansai Electric Power Co. INC.), K.TAKEZAWA (NEWJEC Co. Ltd)

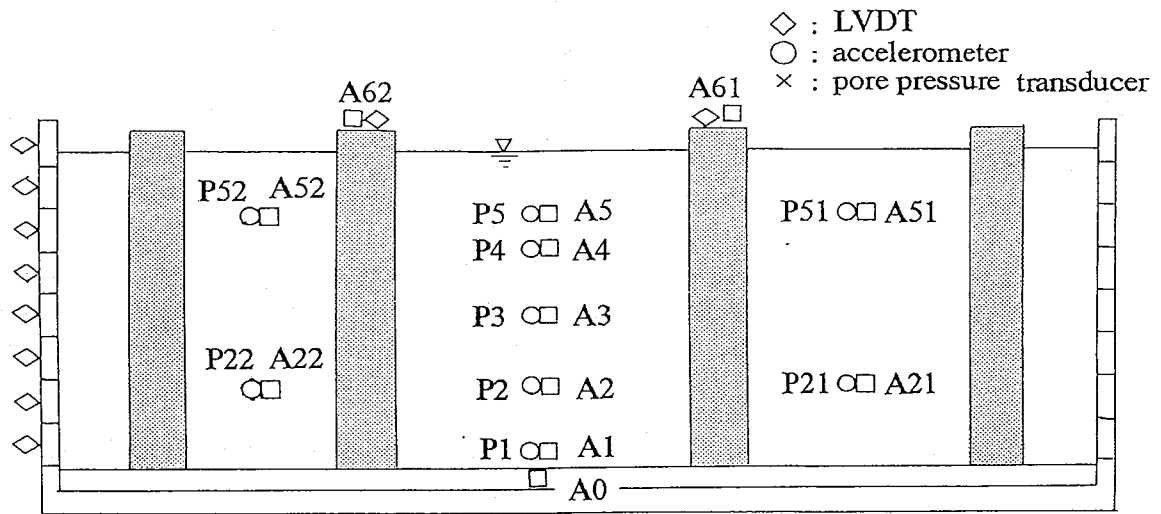


図-2 計測器位置を示した模型地盤の正面図

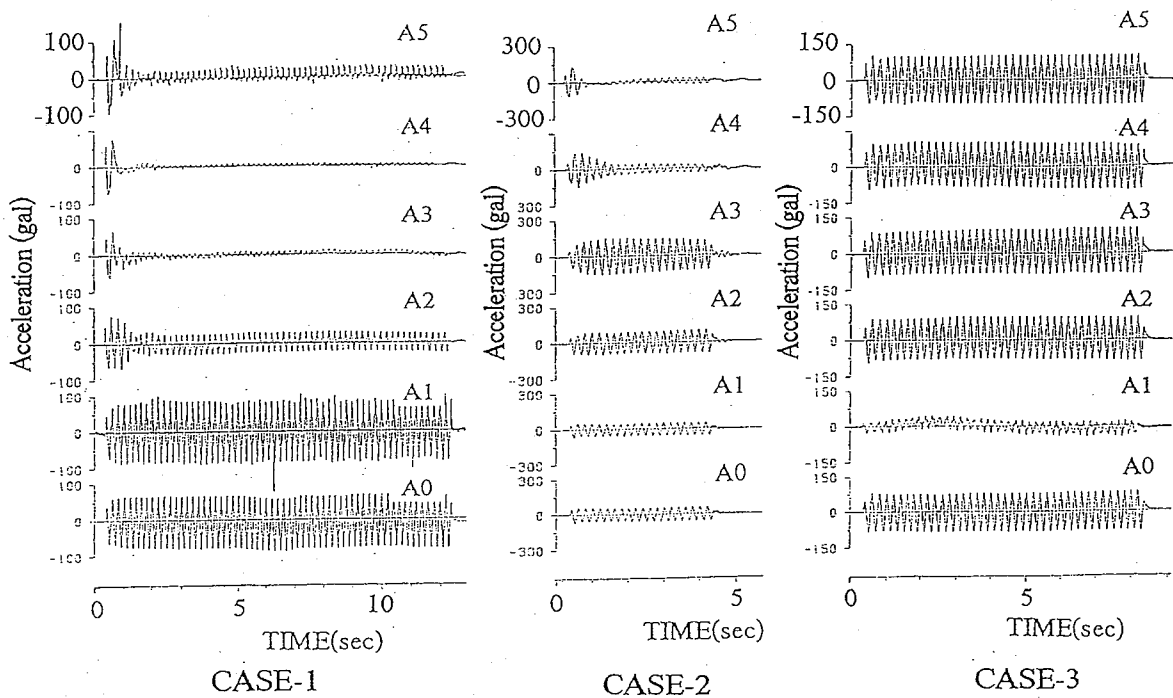


図-3 模型実験における水平加速度時刻歴

計測された模型地盤の応答水平加速度を、3つのケース全てについて図-3に示す。図-4には間隙水圧の分布を示す。これらの図から、ケース1では、模型地盤の全領域で液状化が発生していることがわかる。壁状改良体を配置したケース2では液状化対策工法の効果はさほどみられない。一方、格子状改良体を配置したケース3では液状化は観察されず、改良体が石炭灰地盤の液状化を抑制する効果のあることがわかる。

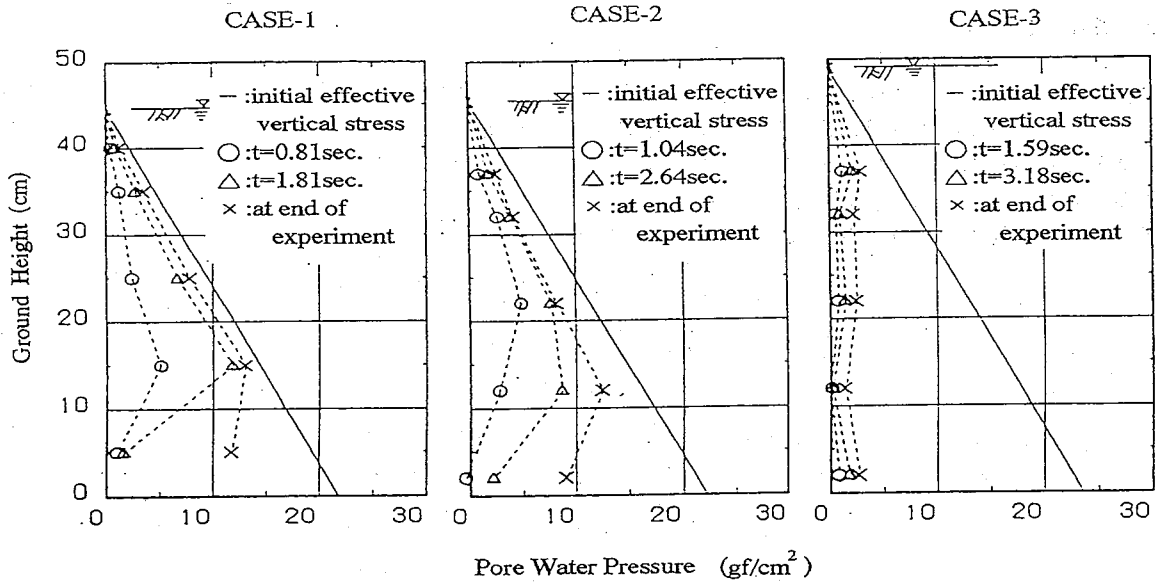


図-4 模型実験における間隙水圧分布

3. 数値解析

3.1 有限要素法定式化

支配方程式の定式化 (u-p formulation) を以下に要約する。

つりあい式

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} + \rho b_i \quad (1)$$

連続式

$$\rho^f \ddot{u}_{i,i} - p_{,ii} - \frac{\gamma_w}{k} \dot{e}_{ii} + \frac{n \gamma_w}{k K^f} \dot{p} = 0 \quad (2)$$

ここで、 ρ^f は液相の密度、 ρ は両相の密度、 p は間隙水圧、 γ_w は液相の単位体積重量、 k は透水係数、 n は間隙率、 b は物体力、 K^f は液相の体積弾性係数である。式(1)は有限要素法により、式(2)は差分法により空間離散化を行う。最終的に、時刻 $t + \Delta t$ において時間離散化された支配方程式は

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M] + \beta \Delta t^2 [K]_{|t+\Delta t} & \vec{K}_v \\ \vec{K}_v^T & A - \alpha' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{u}_{N|t+\Delta t} \\ p_{|t+\Delta t} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \Sigma \alpha'_i p_{i|t+\Delta t} \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} \vec{F}_{|t+\Delta t} - \vec{R}_{|t} - [K]_{|t+\Delta t} (\Delta t \vec{u}_{N|t} + (\frac{1}{2} - \beta) \Delta t^2 \ddot{u}_{N|t}) \\ \vec{K}_v^T (\vec{u}_{N|t} + (1 - \gamma) \Delta t \vec{u}_{N|t}) / (k(\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k})) + A p_{|t} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

$$\alpha' = \frac{1}{\gamma_w (\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k})} \alpha, \quad \alpha'_i = \frac{1}{\gamma_w (\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k})} \alpha_i, \quad \alpha = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{\Delta t (\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k})} \int_v \frac{n}{k K^f} dv \quad (5)$$

上式で、 g は重力加速度、 α_i は取り囲まれた要素辺の長さ、囲まれている要素と隣接要素の重心間距離で定義される。

3. 2 弾塑性構成式

液状化解析に用いられる構成式は、繰返し载荷中のひずみと間隙水圧の蓄積を表現できなければならない。本研究では、これを満足する構成式として、岡-足立モデル (Oka, 1982) が用いられている。岡-足立モデルにおけるほとんどのパラメータは三軸試験などの要素試験から直接求められる。唯一硬化関数中のパラメータが、実験結果とのフィッティングにより決定される。

正規圧密領域と過圧密領域の境界面は次式で与えられる。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)} + M_m^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mb}) = 0 \quad (6)$$

$$\bar{\eta}_{(0)} = \{(\eta_{ij} - \eta_{ij(0)})(\eta_{ij} - \eta_{ij(0)})\}^{1/2} \quad (7)$$

$$\eta_{ij} = s_{ij} / \sigma'_m \quad (8)$$

ここで、 σ'_m は平均有効応力、 s_{ij} は偏差応力テンソル、 M_m^* は最大圧縮点における応力比、 $\eta_{ij(0)}$ は異方圧密終了時の η_{ij} の値である。 σ'_{mb} は過圧密領域において一般的に次式で与えられる。

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{mbi} \exp\{(1+e)/(\lambda - \kappa)v^p\} \quad (9)$$

ここで、 σ'_{mbi} 異方圧密終了時での平均有効応力、 e は初期間隙比、 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数、 v^p は塑性体積ひずみである。

つぎに、降伏関数は次式で与えられる。

$$f = \{(\eta_{ij} - \eta_{ij(n)})(\eta_{ij} - \eta_{ij(n)})\}^{1/2} - k_s = \bar{\eta}_n - k_s = 0 \quad (10)$$

ここで、 $\eta_{ij(n)}$ は応力反転時の応力比、 k_s は次式で定義されるひずみ硬化パラメータである。

$$k_s = \frac{\bar{\eta}_{(f)} G' \bar{\gamma}^p}{\bar{\eta}_{(f)} + G' \bar{\gamma}^p} \quad (11)$$

$$\bar{\eta}_{(f)} = \{(\eta_{ij(f)} - \eta_{ij(n)})(\eta_{ij(f)} - \eta_{ij(n)})\}^{1/2} \quad (12)$$

$$\bar{\gamma}^p = \{(e_{ij}^p - e_{ij(n)}^p)(e_{ij}^p - e_{ij(n)}^p)\}^{1/2} \quad (13)$$

ここで、 $\eta_{ij(f)}$ は破壊時の応力比、 G' はひずみ硬化関数の初期接線勾配、 $e_{ij(n)}^p$ は応力反転時の e_{ij}^p の値である。応力比と塑性ひずみ増分の関係に基づいて、塑性ポテンシャルは次のように表わされる。

$$g = \bar{\eta}_{(n)} + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{ma(n)}) = 0 \quad (14)$$

ここで、 $\sigma'_{ma(n)}$ は応力反転時での応力比一定線と塑性ポテンシャル関数との交点における平均有効応力、 \tilde{M}^* は最大圧縮点における応力比である。正規圧密領域 ($f_b \geq 0$) では、 \tilde{M}^* は一定値をとり、

$$\tilde{M}^* = M_m^* \quad (15)$$

一方、過圧密領域 ($f_b < 0$) では、 \tilde{M}^* はつぎのように定義される。

$$\tilde{M}^* = -\eta / \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mc}) \quad (16)$$

ここで、 η は、

$$\eta = (\eta_{ij} \eta_{ij})^{1/2} \quad (17)$$

$$\sigma'_{mc} = \sigma'_{mb} \exp(\eta_0 / M_m^*) \quad (18)$$

ここで、初期応力比 η_0 は、

$$\eta_0 = (\eta_{ij(0)} \eta_{ij(0)})^{1/2} \quad (19)$$

非関連流れ則を用いて、塑性ひずみ増分は次式のように表わされる。

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{ij}} \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{kl}} d\sigma'_{kl} \quad (20)$$

ここで、

$$\Lambda = \frac{\bar{\eta}_{(f)}^3 \bar{\eta}_{(n)}^2 \sigma'_m}{G'^2 (\bar{\eta}_{(f)} - \bar{\eta}_{(n)})^3 (e_{kl}^p - e_{kl(n)}^p) (\eta_{kl} - \eta_{kl(n)})} \quad (21)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} = \frac{\eta_{ij} - \eta_{ij(n)}}{\bar{\eta}_{(n)} \sigma'_m} - \frac{(\eta_{kl} - \eta_{kl(n)}) s_{kl} \delta_{ij}}{\bar{\eta}_{(n)} \sigma_m'^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma'_{ij}} = \frac{\eta_{ij} - \eta_{ij(n)}}{\bar{\eta}_{(n)} \sigma'_m} + \left(\frac{\bar{M}^*}{\sigma'_m} - \frac{(\eta_{kl} - \eta_{kl(n)}) s_{kl}}{\bar{\eta}_{(n)} \sigma_m'^2} \right) \frac{\delta_{ij}}{3} \quad (23)$$

弾性ひずみ成分も考慮すると、岡-足立モデルは最終的につぎのようになる。

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1}{2G} ds_{ij} + \frac{\kappa}{(1+e)\sigma'_m} d\sigma'_m \frac{1}{3} \delta_{ij} + d\epsilon_{ij}^p \quad (24)$$

本研究では、構成式中のパラメータ G' は、繰り返し三軸試験結果と岡-足立モデルによる解析値の比較に基づいて決定する。構成式中の弾性パラメータはモデル地盤のせん断波速度より決定する。岡-足立モデルにおける石炭灰のパラメータを表-1にまとめる。

表-1 足立-岡モデルにおける材料定数

void ratio	1.42	density (t/m ³)	1.46
k(m/s)	7.1×10^{-6}	λ	0.13
ϕ_f (°)	34.5	ϕ_m (°)	33.2

ϕ_f : internal friction angle

ϕ_m : degree of stress ratio of maximum compression

4. 振動台実験の有効応力解析

図-5に数値解析結果の出力点を図示する。解析に用いたせん断弾性係数とひずみ硬化パラメータ G' の分布も図-5に示す。図-6には、3ケース全てについて、出力点Aの水平加速度時刻歴を示す。この図より、格子状に配置した固化改良体が石炭灰の液状化を抑制することがわかる。一方、改良体の配置されていないケース1では、下部層が液状化するために地盤表面に加速度がほとんど伝達されない。

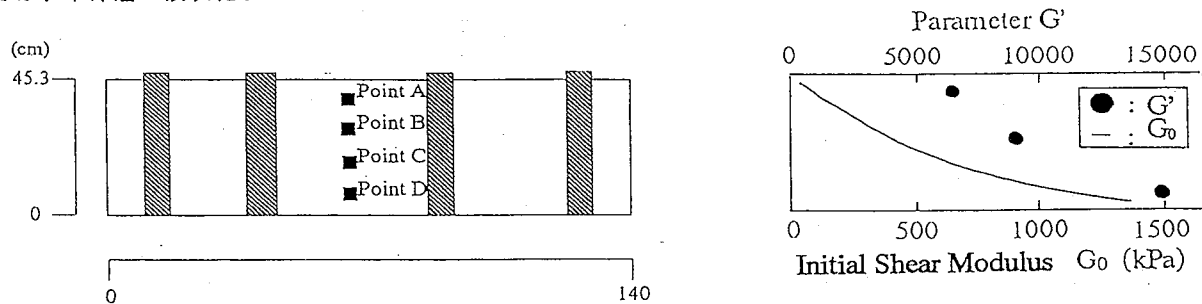


図-5 解析結果の出力位置および G' と G_0 の初期分布

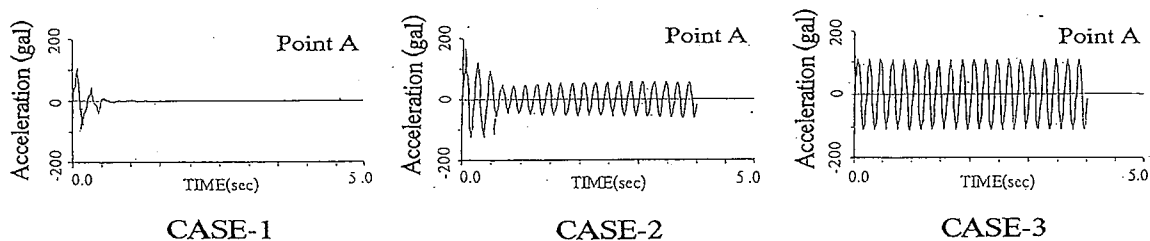


図-6 点Aにおける加速度時刻歴

出力点 B、C、D の間隙水圧比 ($1-\sigma'_m/\sigma'_{m0}$: σ'_{m0} は初期平均有効応力) の時刻歴を図-7 に示す。初期状態 ($\sigma'_m = \sigma'_{m0}$) では、間隙水圧比は 0.0 である。一方、地盤が液状化 ($\sigma_m = 0$) すると、間隙水圧比は 1.0 となる。改良体を配置していないケース 1 では、過剰間隙水圧の蓄積が早くから観察される。しかし、改良体を格子状に配置したケース 3 では、過剰間隙水圧の蓄積は非常にゆっくりしており、下部層地盤では液状化には至らない。

図-8 に全ての出力点での液状化繰返し回数を表す。ケース 1、ケース 2 において、有効応力法による解析結果は実験結果を精度よく表現できる。一方、ケース 3 では、解析結果の方が、実験よりも早く液状化することがわかる。

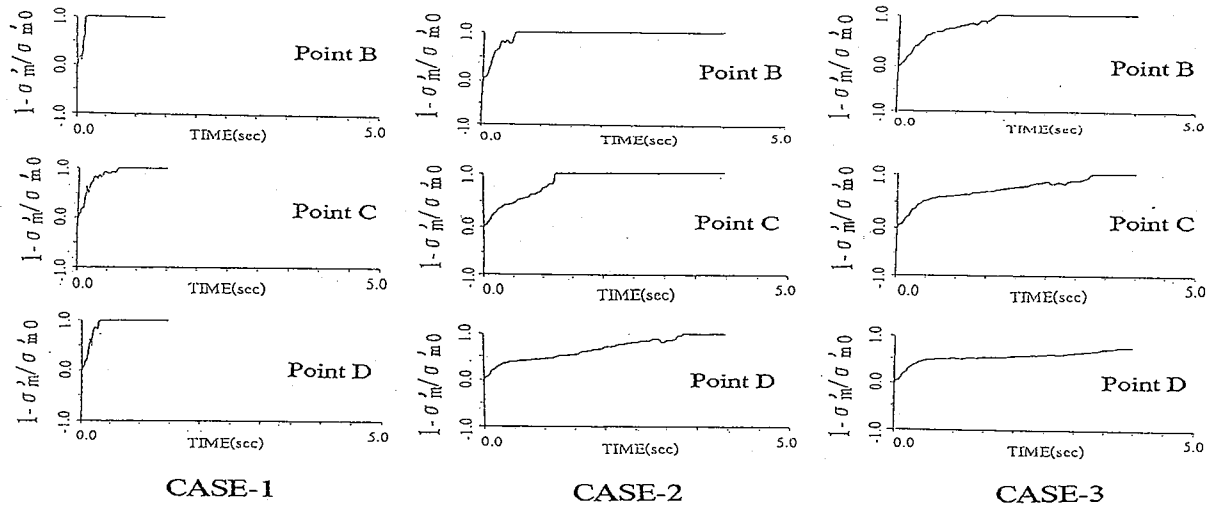


図-7 間隙水圧比の時刻歴

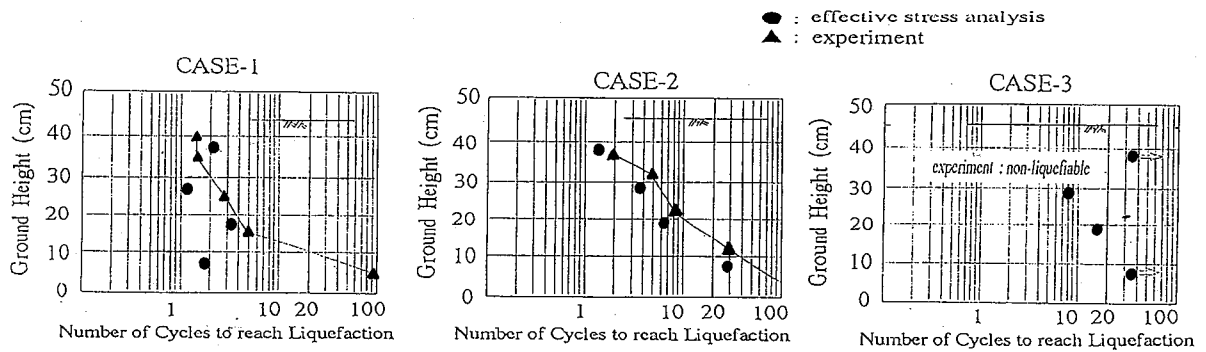


図-8 液状化に達するまでに必要な繰返し振動回数

5. あとがき

一連の模型実験と有効応力解析が行われた。本研究で得られた主な知見まとめると、以下のようなものである。

1. 飽和した石炭灰地盤は、繰返し載荷で容易に液状化する。
2. 石炭灰地盤の液状化対策工法であるセメント固化改良工法の効果は、振動台模型実験と数値解析で詳しく検討された。壁状に固化体を配置したモデルでは、液状化対策工法の効果はみられなかった。一方、格子状に改良体を配置したモデルでは、固化体が石炭灰地盤の液状化を抑制することがわかった。
3. セメント固化体による液状化抑制効果が、有効応力法により精度よく表現できた。

参考文献

1. Oka, F. Constitutive Equations for Granular Materials in Cyclic Loadings, Proc. IUTAM Conf. on Deformation and Failure of Granular Materials, 297-306 (1982).
2. Shibata, T., Sato, T., Uzuoka, R., Oka, F., Yashima, A. and Kato, M. FEM-FDM Coupled Liquefaction Analysis of a Fluid Saturated Ground, Proc. IACMAG 91, Vol.2, 869-874 (1991).