

SCP 締固め地盤の強震時の3次元挙動と等価均質化地盤の提案

東京電力株式会社 今村 晃 舛田健次 近藤 学
 東電設計株式会社 ○井原和弘
 清水建設株式会社 福武毅芳

1. はじめに

液状化対策の有効な方法の一つにサンドコンパクションパイル(SCP)による締固め工法がある。本工法は1995年の兵庫県南部地震を契機に、レベル2地震動に対応可能な必要 N 値が見直され、その際、目標 N 値が従来よりかなり大きくなってしまい、現状の施工でどの程度まで対応できるか検討された¹⁾。このことは、改良地盤の物性(N 値)のばらつきや分布の評価とも関連した問題である。

本工法の有効性は、レベル2クラスの兵庫県南部地震で、締固め地盤にはほとんど液状化が見られなかった^{2),3)}ことから実証された。その一方で、潜在的な余裕があることも推測された^{4),5)}。このことは同じ N 値の地盤でも、SCP締固め地盤では沖積地盤に比べマクロ的に見て大きな液状化強度 R を有していることを示唆している。すなわち、現行の設計法⁶⁾(SCP改良地盤の液状化判定 $[F_L]$ 法)はかなり安全側であるといえる。このような理由としては、以下の要因が考えられる。

- ① SCP改良地盤では、砂杭およびその近傍の剛性は杭間地盤に比べてかなり大きい。しかし、液状化強度等の地盤物性評価に用いる N 値は、砂杭やその周辺の高い剛性領域を考慮せず、砂杭対角位置の小さい N 値(N_1)のみを用いている(図-1参照)。
- ② 砂杭周辺の地盤では K_0 値の増加*により、拘束圧が増加して液状化強度 R が増加するが、その効果を考慮していない。(*厳密には安田らの研究^{1),7)}によると、 N 値に及ぼす K_0 値の影響の度合いは相対密度に依存する)

以降の検討では簡単のため、②の効果は N 値の増加にある程度反映されていると考え、①の効果にのみ着目して検討した。すなわち、3次元的な改良地盤の広がりやなかで、従来の杭間対角位置の N 値(N_1)のみで改良効果を見るといった安全側の評価でなく、さらに強度が期待できる砂杭や砂杭周辺から中間にかけての改良効果の変化(図-1に示すような N 値の分布形)を積極的に評価することにより、どの程度の液状化抑制効果の増大が期待できるかを検討した。

本研究では、まずSCP改良地盤で実測された地盤調査結果をとりまとめ、統計処理と回帰分析から N 値分布について検討した。さらに文献調査結果も考慮し、改良地盤の物性に関する知見について整理した。この分析結果に基づき、改良地盤をミクロに見て、砂杭やその周辺の高い剛性領域も考慮した3次元有効応力解析を数ケース実施し、複合地盤としての詳細な地震時挙動を把握した。この3次元解析結果と均一物性を用いた1次元解析結果の比較から、複合地盤であるSCP改良地盤と液状化抑制効果がほぼ同じとなるような等価な N 値(N_{eq})を見出した。さらに有効応力解析を行わ

ないで簡便に N_{eq} を推定する式を提案した。この N_{eq} には、砂杭や N 値分布などの複合地盤の効果が入っており、現行設計法よりもSCP改良地盤を正當に設計できる。なお本論文で扱う N 値は、 98kN/m^2 における鉛直有効応力 σ'_v に換算した値(= $1.7N/(\sigma'_v/98+0.7)$)ではなく、 σ'_v で補正しない計測 N 値である。

2. 砂質土および中間土(シルト質砂)における改良地盤の調査結果の分析

実際のSCP改良地盤は、砂杭と締固められた地盤からなる複合地盤であり、その N 値の同一深度における平面的分布形は図-1に示すように、砂杭で最大の N 値となり砂杭対角で最も小さい N 値(N_1)となる。したがって、図-1に示すような実際の N 値分布を考慮すれば、過剰な安全側の設計を回避できる。さらにこの考えを簡便化して、複合地盤の実状に合った等価な N_{eq} を用いて設計できれば、 $N_{eq}-N_1$ の合理化、すなわち目標 N 値の低減(目標置換率の低減)が図られる。

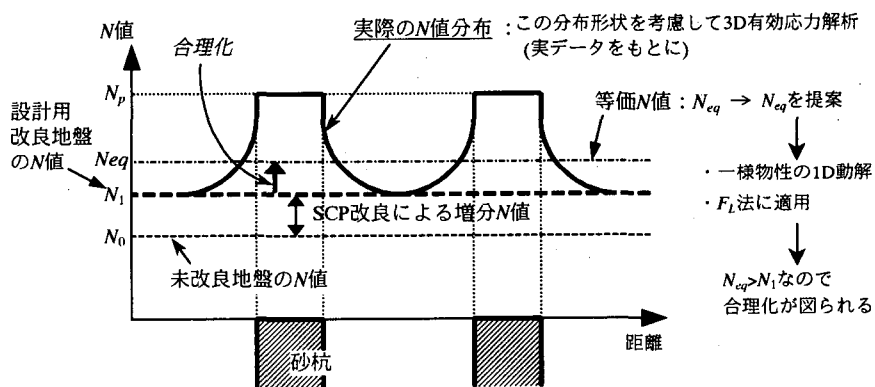


図-1 SCP改良地盤の N 値分布

キーワード：締固め、砂杭、3次元液状化解析、複合地盤、均質化、等価 N 値

連絡先：〒100-0011 千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル27F 清水建設(株) Tel 03-3508-8101, Fax 03-3508-2196

2. 1 SCP 改良地盤の物性に関する文献調査

既往の文献^{4),5),9),10)}によれば、改良地盤の N 値の平面分布形は図-1に示すように、砂杭で最大の値となり、砂杭から離れるに従い小さくなり砂杭対角で最も小さい値(N_1)となる。坂口⁹⁾は砂杭下端からの深度方向の影響も含めた改良効果の範囲を調べ、水平方向には2m、深さ方向には1.5~2mの領域が締固め効果の影響を受けるとしている。

細粒分含有率 F_c との関係で見た場合、大林ら⁴⁾の研究によれば、 F_c が小さいと砂杭に近づくに従い N 値増加が顕著となる。砂杭中心の N 値(N_p)は原地盤の F_c の影響をあまり受けず、平均で換算 N 値($N_{1.0}$)=25~30であるとしている。原田ら¹⁰⁾は、砂杭芯の N 値(N_p)と杭対角地盤の N 値(N_1)を種々の施工現場で測定し、細粒分含有率 F_c が多くなれば N_1 は小さくなるが、 N_p は約23~30の範囲でありあまり変化しないことを示している。すなわち細粒分含有率 F_c との関係で見た場合、 F_c が増えるに従って(砂地盤からシルト質地盤になるに従って)、杭間と杭芯の換算 N 値は、図-2に示すように垂離していく傾向にある。

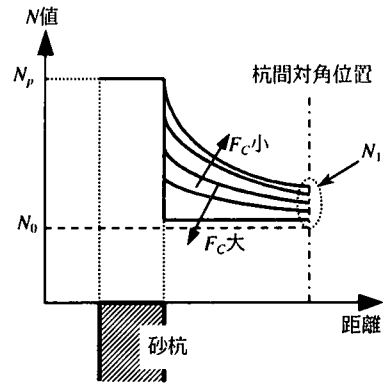


図-2 砂杭からの距離と F_c と N 値分布の関係

2. 2 地盤調査結果の分析

表-1に示す臨海部に建つ3箇所の火力発電所について、SCP工法による改良地盤の標準貫入試験結果の分析を行った。千葉火力と横浜火力の土質は砂質土と F_c のやや大きい中間土であり、常陸那珂火力は均質な(きれいな)砂質土である。これら発電所では、図-3に示す砂杭(N_p)、砂杭間(N_2)、砂杭対角(N_1)の3点で N 値が調査されている。この3点の N 値を統計的に処理し、 N 値の分布を推定した。各位置の N 値を統計処理した千葉火力と常陸那珂火力の相対頻度分布を図-3に示す。千葉火力の砂杭間と砂杭対角では正規分布よりも対数正規分布の方が対応がよい。一方、常陸那珂火力では正規分布の対応がよい。また、図示していないが横浜火力では対数正規分布の対応がよかった。そこで、図-4に示すように、正規分布だけではなく対数正規分布のピーク(最頻 N 値)についても回帰曲線を求めた。図-5に N 値と砂杭からの距離の関係を示す。平均値でも最頻 N 値でも砂杭対角と砂杭間の N 値はほぼ同等($N_1=N_2$)となる傾向がある。このことから、改良地盤の N 値分布は砂杭のごく近傍で急増する分布と考えられる。また、回帰曲線としては e 関数なども考えられるが、砂杭対角位置と砂杭間での N 値を同値($N_1=N_2$)とできる2次関数の方が、砂杭近傍の N 値が急増する部分を評価するには適切な関数と考えた。

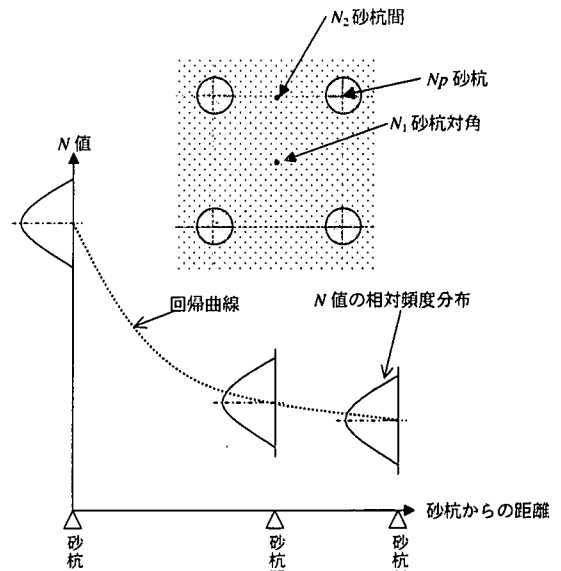


図-3 N 値分布の回帰曲線

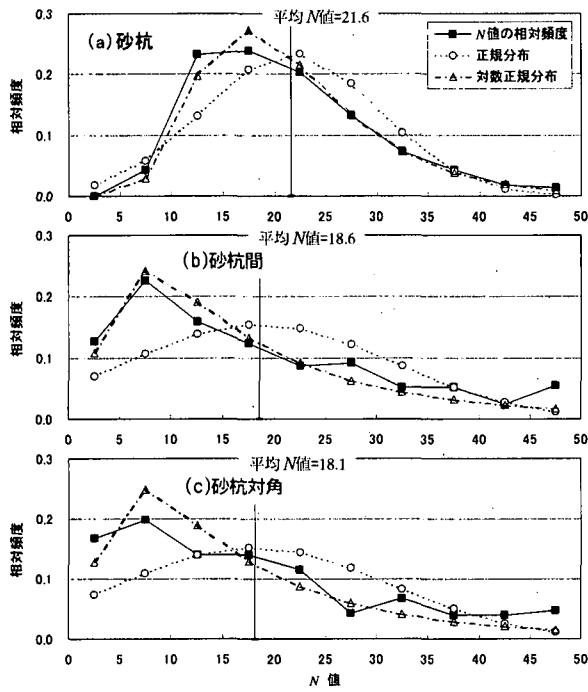
2. 3 検討用地盤モデルの設定

調査結果の分析と既往文献から、3次元有効応力解析の地盤モデルは以下の方針で設定した。

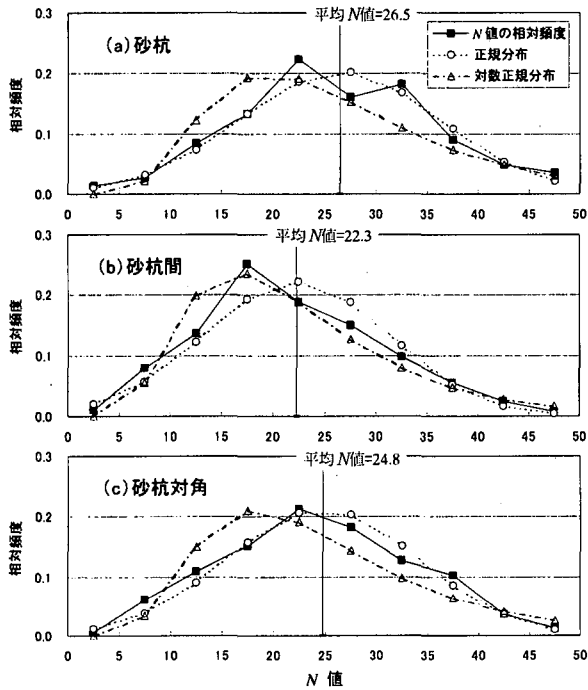
- ① 解析する地層構成と地盤物性は、液状化しやすい砂質土を中心に設定する。表層は20m(上下2層で各深さ各10m)とし、物性値の設定では常陸那珂火力の均質で細粒分の少ない砂質土のデータをもとに基本ケースを設定した。
- ② 砂質土は砂杭近傍での N 値の増加を考慮した階段型にモデル化する。階段部分の N 値(N_{cr})は、図-6に示すように $N_2=N_1$ となる2次関数で設定する。階段部の幅は、砂杭の直径の1/4に仮定した。
- ③ 砂杭の N 値(N_p)は常陸那珂火力の調査結果から、上層(GL0m~10m)では $N_p=25$ とし、下層(GL0-10m~-20m)では $N_p=30$ を基本ケースとした。この設定は文献^{10),11)}で N_p の平均を25程度としていることとも整合する。この条件下での液状化抵抗値 R は2.0以上と非常に大きな値となった。
- ④ 砂杭対角の N_1 は地盤工学会の方法C⁶⁾で設定する。
- ⑤ 後述するSCP改良地盤の等価物性値の評価法の一般性を吟味するため、中間土(シルト質土)についても解析する。ただし文献⁹⁾や図-2より、 F_c が大きい中間土では図-6に示すように突起型の N 値分布が妥当と考えた。

表-1 SCP改良地盤の調査地点

火力発電所名	液状化対策対象地盤	土質	細粒分含有率 F_c (平均)	置換率 a_s
千葉	埋土, 沖積砂層	砂質土, 中間土	28%	10~32%
横浜	埋土, 沖積砂層	砂質土, 中間土	21%	16~23%
常陸那珂	埋土	砂質土	13%	12~14%



(1) 千葉火力



(2) 常陸那珂火力

図-4 各位置のN値の相対頻度分布
(相対頻度は全置換率のN値を5刻みでグループ化)

3. 3次元有効応力解析によるSCP改良地盤の地震時挙動
 前述したように、SCP改良地盤の現行の改良評価法はかなり安全側となっている。このようなことから、最近では砂杭自体を考慮した解析^{12)~17)}が実施されており、設計に使用できる妥当なN値¹⁰⁾や剛性¹⁷⁾の提案もなされつつある。本節では、砂杭自体やその近傍剛性も考慮した3次元有効応力解析を実施するとともに、 N_1 を用いた均質地盤の結果と比較する。さらに1次元のパラメトリック解析を実施し、複合地盤であるSCP地盤と地震時応答が等価になる地盤のN値(N_{eq})について検討する。すなわち、 N_{eq} は液状化抑止効果の観点から見たとき、SCP複合地盤を均質地盤に置換えた等価なN値であるといえる。

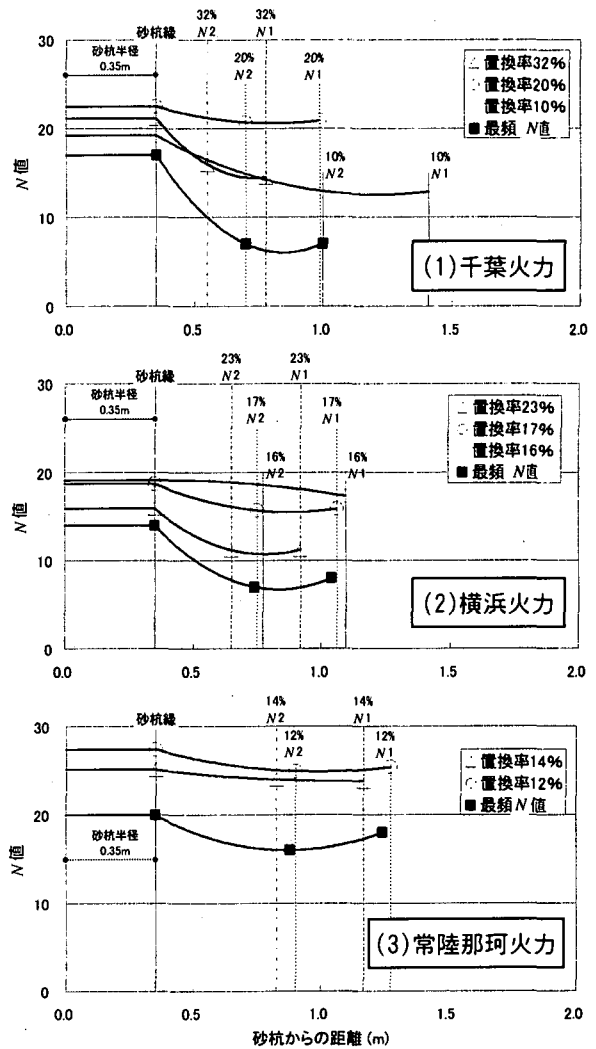


図-5 N値と砂杭からの距離の回帰

- N_0 : 未改良地盤のN値
 - N_1 : 砂杭対角のN値
 - N_2 : 砂杭間のN値
 - N_p : 砂杭のN値
 - N_{cir} : 階段部分のN値
- D : 砂杭径
 $D/4$: 階段部分の幅

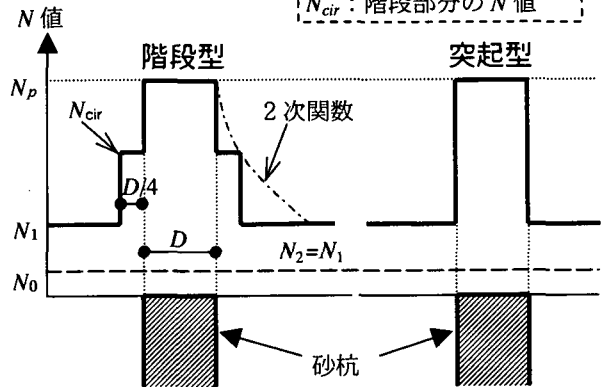


図-6 N値分布のモデル化(2ケース)

3. 1 解析条件

改良地盤をマイクロに見て砂杭も考慮した3次元 FEM モデルを設定し、パラメトリックスタディを行った。想定した地盤条件(未改良地盤と砂杭)と解析モデルを図-7 に示す。地下水位は GL0m とした。解析法は3次元有効応力解析¹⁸⁾である。地盤や砂杭に用いた構成式としては、応力・ひずみ関係として3次元に拡張した R-0 モデル¹⁹⁾、ひずみ・ダイレイタンスー関係としておわんモデル¹⁹⁾を用いた。解析上は改良地盤が十分遠方まで続くと仮定し、図-8,9 に示すように砂杭 1/2 本当りりの分担する領域を、周期境界(繰返し境界)を用いてモデル化した。700φの砂杭は面積等価の下で正方形に置換した。ここでは K_0 値増加の影響は N 値の増加に反映されているとして、 $K_0=0.5$ (一定)と仮定した。なぜなら、SCP による K_0 増加はそのばらつきが大きく、また時間とともにその値も変化する(特に中小地震や近接工事などにより)、というような不確定要素がかなり大きいのである。よって、砂杭近傍の N 値の高い領域は、 K_0 増加による N 値の増加も含んでいると解釈した。

N 値の分布形状は、図-6 に示す2種類を想定し、置換率は $a_s=0\%$ (未改良), 5%, 7%, 9%, 11%, 14% とした。砂質土($F_c=15\%$)では階段型分布を、中間土($F_c=25\%$)では突起型分布を仮定した(図-10)。 N_p は 20, 25, 30, 35 の4ケースを行ったが、以下に示す結果では $N_p=25$ (上層), 30(下層)を中心に示す。

3次元解析の結果を真の解として、以下の三種類の N 値で均質化した地盤の1次元モデルの結果を、3次元詳細モデルの結果と比較した。(式(1)は N_1 と N_p を a_s の重みを付けて平均化した N 値である¹⁹⁾)

① N_1 で均質化 [従来法]

② N_{eq} で均質化

③ N_n (次式)で均質化 [等価 N 値法]

$$N_n = a_s \cdot N_p + (1-a_s) \cdot N_1 \quad (1)^{10)}$$

N_{eq} を見出すには、試行錯誤による均質地盤の1次元解析を N 値を種々に変えて実施し、その最大変位分布が3次元モデルの砂杭対角位置(図-8の●、図-9の↓)での分布形と一致する N 値とした(図-10)。変位分布を「等価」の指標として選んだのは、地盤変形の分布形状や大きさは液状化の程度(過剰間隙水圧やひずみ)を反映したものであり、また杭基礎の被害とも関連しており、被害を表す観点からも適切と考えたためである。

入力地震動は、「臨海波」²⁰⁾を液状化判定時の加速度(未改良地盤の地表面で200Gal)と対応する150Galに振幅調整(SHAKEによる)して、40秒間入力した。構成式(3-D R-0モデルとおわんモデル)の土質パラメータは、原位置の要素試験で得られた $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係と、 N 値や F_c などにより推定²¹⁾した液状化抵抗値から設定した。

3. 2 解析結果

未改良地盤における地表面最大変位は、砂質土で36.3cm、中間土で15.9cmであり、地表面最大加速度は、砂質土で203Gal(SHAKEによる値とほぼ同じ)、中間土で261Galであった。過剰間隙水圧比は GL-1m~-10m で100%に至り、ひずみは3~5%であった。入力振幅を80Galまで小さくしても、GL-2m~-7mで液状化し、ひずみは3%程度発生した。

改良地盤における地表面最大加速度は、 a_s の増加とともに大きくなり、 $a_s=5\%$ で280Gal、 $a_s=14\%$ で450Galであった。

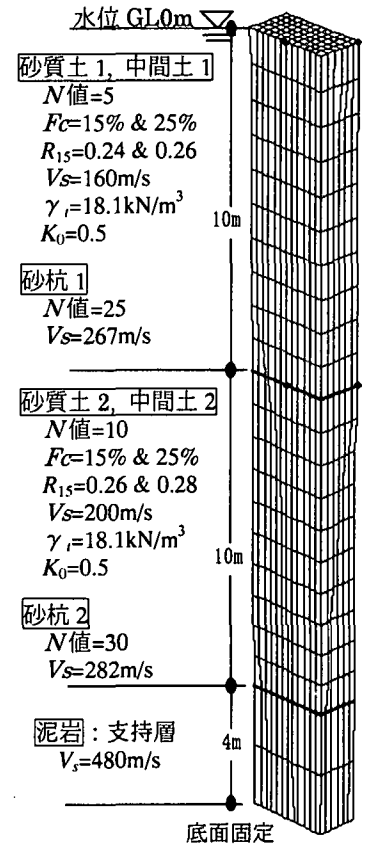


図-7 原地盤と砂杭の条件と FEMメッシュ(3-D)

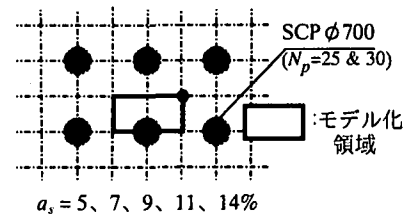


図-8 砂杭の配置とモデル化領域

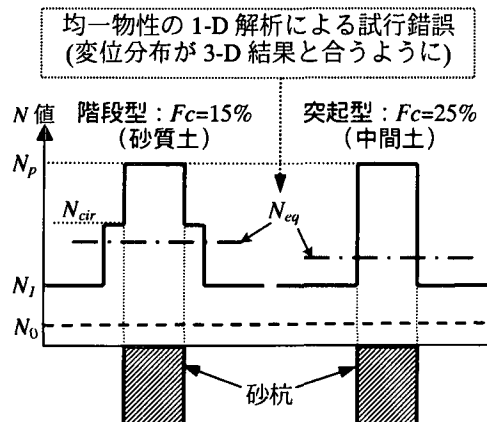


図-10 等価 N 値 N_{eq} の設定方法

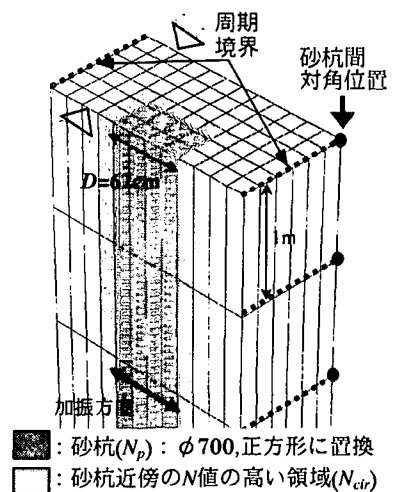


図-9 改良地盤のモデル化: 3次元FEM

図-11には、砂質土地盤における3次元モデルの砂杭対角位置における最大応答分布と、1次元モデル(均一 N 値)による最大応答分布の比較を示す。3次元モデルでは液状化に至っていないが、 N_1 を用いた従来法ではGL-6m以浅で液状化に至っており、安全側となっていることが分かる。 N_{eq} による結果は、変位分布はよく合わせることができているが、せん断ひずみはやや大きめに、過剰間隙水圧は小さめになっている。 N_n による結果は、せん断ひずみを表層で過大評価しているものの、変位分布の傾向は悪くない。図には示していないが、同一深度で見た場合、 N_1 の領域では、位置によらず過剰間隙水圧やひずみの値はほぼ同じであった。

また砂杭では過剰間隙水圧はほとんど発生しなかった(R-0モデルによる非線形性のみ)。

図-12には代表的ケースにおける砂杭対角位置の最大変位分布の比較を示す。 a_s が小さい場合(5%,7%)には、1次元解析による変位分布のフィッティングがやや困難になっている。これは、 a_s が小さくなると砂杭に比べて砂杭間地盤の方が大きく変形して不均一性が卓越し、均一化に限界があるためと思われる。(図-17参照) 1次元解析の結果は総じてある層に変形が集中するのに対し、3次元解析の変位分布形は緩やかである。これは3次元解析では液状化に至っていない砂杭が貫通しているため、変形分布が均されたためである。よってSCP地盤において、Penzien系モデルにより1次元の地盤応答変位を入力するのは、杭応力の評価の観点からは安全側の検討と言える。

式(1)の N_n による1次元解析結果は、変形を大きめに評価したり(図(a),(b))小さめに評価したり(図(c),(d))と、一貫性が無い。よって危険側の評価となることがあるので注意を要する。

図-13に N 値の比較を、図-14に液状化強度の比較を示す。砂質土($F_c=15\%$)では、 N_{eq} は N_1 に比べ17%増、液状化強度 R_{15} で50%増となっている。中間土($F_c=25\%$)では、 N_{eq} は N_1 に比べ17%増、 R_{15} で45%増となっている。この傾向は他のケースでもほぼ同様であり、これらのことより N 値分布の影響が大きいことが分かる。また中間土では、 N_n やそれに基づく R_{15} が N_{eq} よりも大きくなっており、危険側の評価となっている。よって式(1)による平均的 N 値の評価には注意を要する。

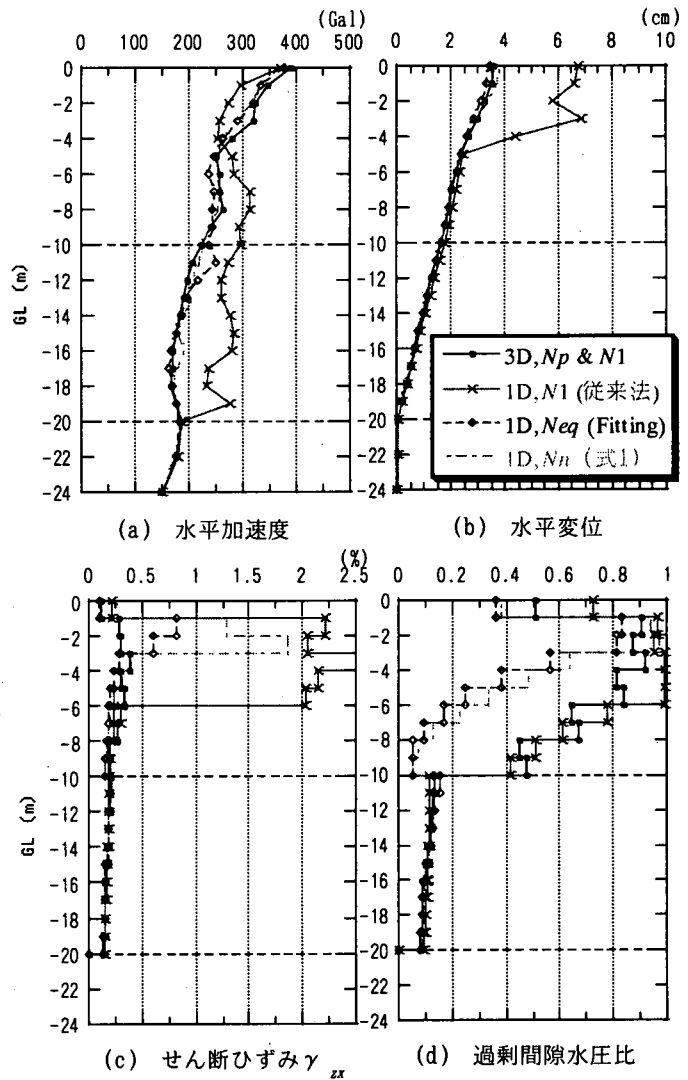


図-11 砂杭対角位置の最大応答分布(砂質土, $a_s=11\%$, 階段型)

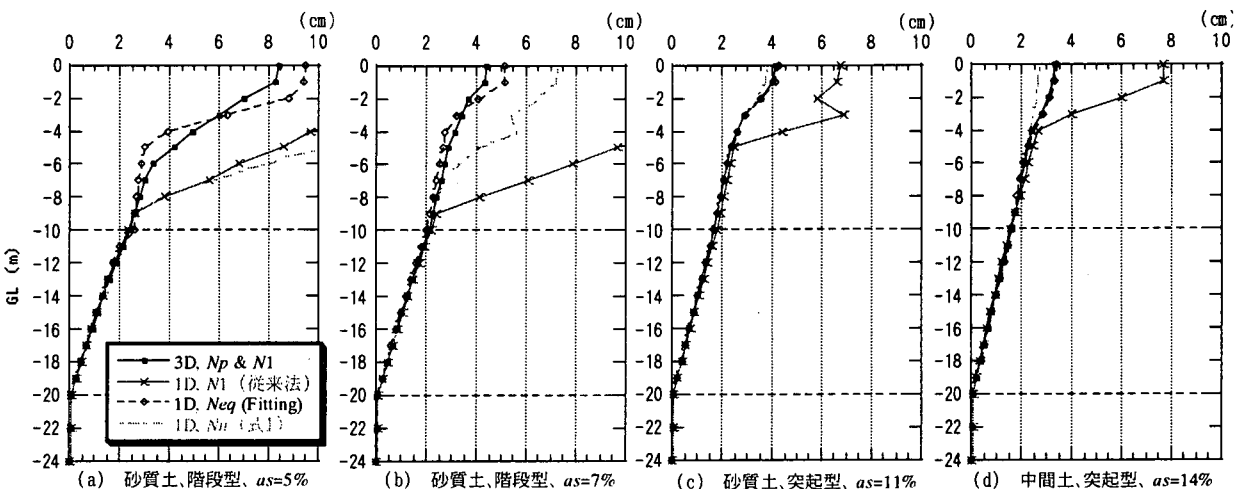


図-12 砂杭対角位置の最大変位分布の比較

本節では、SCP 改良地盤を、実状に近い3次元解析結果と、均一地盤に置換した1次元解析結果を比較して、液状化抑制効果が等価となるN値 N_{eq} を見出した。この N_{eq} は従来法による改良地盤のN値(N_1)よりも大きいので、SCP改良の正当な評価(a_s の低減)が図れる。また参考までに式(1)による N_n で N_{eq} の評価を試みたところ、危険側のN値を推定してしまう場合があり、 N_n による推定は適切でないことも示した。

4. SCP 複合地盤を均質地盤で表す等価N値の提案

前節でSCP改良地盤の設計が妥当に設計できることを、3次元FEMによる詳細解析により示した。ただし設計においては、有効応力解析や1次元のパラメトリックスタディーは手間がかかり、現実的ではない。そこで本節では、種々の解析結果を元に、広範囲の N_p や a_s に対して簡便に N_{eq} を予測する方法を提案する。

4.1 SCP 複合地盤における等価N値(N_{eq})の検討

(1) 種々の N_{eq} の簡便評価式 簡便に N_{eq} を予測できる式としては、「①N値に基づく方法」と「②せん断剛性 G に基づく方法」とが考えられる。またそれぞれに対して、砂杭周辺のN値 N_{cir} 増加領域(a_{cir})を考慮しない方法-A(突起状N値分布)と、考慮する方法-B(階段状N値分布)が考えられる。

① N値に基づく方法[等価N値法]: a_s の値に基づき N_1 値と N_p 値を割り振るものであり、次式が考えられる。

- ・ 等価N値法-A: $N_n = a_s \cdot N_p + (1-a_s) \cdot N_1$ (1a)¹⁰⁾
- ・ 等価N値法-B: $N_n' = a_s \cdot N_p + a_{cir} \cdot N_{cir} + (1-a_s-a_{cir}) \cdot N_1$ (1b)

② せん断剛性 G に基づく方法[等価G法]: a_s の値に基づき、杭間地盤のせん断剛性 G_1 と杭状改良体のせん断剛性 G_p から平均的なせん断剛性 G_{av} を求め、この G_{av} から平均的なせん断波速度($V_{s,av}$, $V'_{s,av}$)を求める。次に $V_{s,av}$, $V'_{s,av}$ から等価なN値(N_g , N'_g)を求める。 $N_{cir}(a_{cir})$ を考慮するか無視するかにより、次式が考えられる。

- ・ 等価G法-A: $G_{av} = a_s \cdot G_p + (1-a_s) \cdot G_1$ (2a)¹¹⁾
- ・ 等価G法-B: $G'_{av} = a_s \cdot G_p + a_{cir} \cdot G_{cir} + (1-a_s-a_{cir}) \cdot G_1$ (2b)

ここで、式(1)のようにN値に基づく予測式について考えると、杭状改良体はかなり硬い場合には、 N_p は非常に大きくなってしまい、場合によっては測定不可能で ∞ となる。特に杭を碎石で施工した場合などは、過大な N_n を予測することになる。また、砂杭周辺のN値増加も考慮した方法-Bでは、特に a_s の大きな場合において大きめの等価N値を予測する傾向にある(後述)。よって以下では主に式(2a)を用いた式の展開を示す(検討には上記4つの式を用いている)。 $G = \rho V_s^2$ であるから、平均せん断波速度 $V_{s,av}$ は次式で与えられる(ρ は土の質量)。

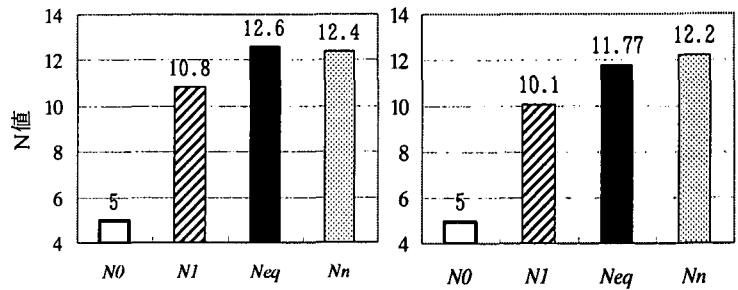
$$V_{s,av} = (G_{av}/\rho)^{1/2} \quad (3)$$

N値からせん断波速度 V_s を求める式を一般化して書けば、次式となる。

$$V_s = A \cdot N^b \quad (4)$$

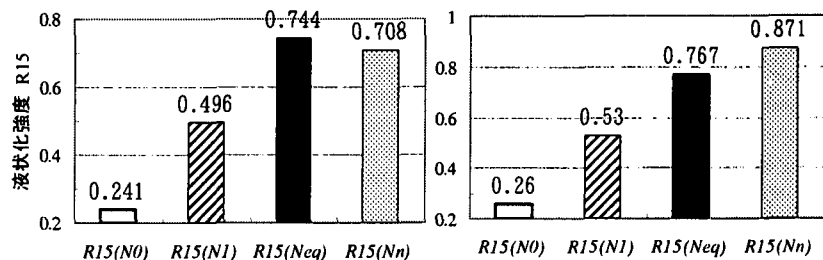
よって、式(3)をもとに等価N値 N_g は次式により与えられる。 (N'_g) も式(3)で G_{av} を G'_{av} とすれば同様に導ける)

$$N_g = (V_{s,av}/A)^{1/b} \quad (5)$$



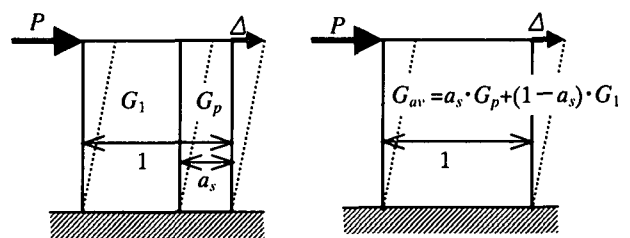
(a) 砂質土, $a_s=11%$, 階段型 (b) 中間土, $a_s=14%$, 突起型

図-13 各評価法によるN値の比較



(a) 砂質土, $a_s=11%$, 階段型 (b) 中間土, $a_s=14%$, 突起型

図-14 各評価法による液状化強度 R_{15} の比較



(a) 2種類のG (b) (a)と同変位となるG

図-15 荷重P作用下で同変位 Δ を生じるときのGの関係

表-2 N値から V_s を推定する式の代表例

提案者, 文献	$V_s = A \cdot N^b$		備考
	A	b	
今井・殿内 ^{22),23)} (1982,1985)	97.0	0.314	全データ
今井 ²⁴⁾ (1977)	80.6	0.331	沖積砂
道路橋示方書 ²⁵⁾ (1980)	80.0	0.333	沖積砂
今井・麓 ²⁶⁾ (1975)	89.8	0.341	全データ

N_n と N_g の N_p に対する感度は、 N_g の方が鈍い。 N_p を直接用いた式(1a)には適用限界が有り、適切ではないことは述べた。一方、せん断剛性 G を用いて等価な物性を評価する[等価 G 法]は、図-15からも物理的に妥当と考えられ、理解しやすい。また使いやすさを考えると、式(2a),(5)はまとめて1つの式にして、 N_1, N_p から N_g が算定できる方が良い。式(4)と $G=\rho V_s^2$ から次式を得る。

$$G_1 = \rho(A N_1)^2, \quad G_p = \rho(A N_p)^2 \quad (6)$$

上式を式(2a)に代入し、式(5)を用いれば次式を得る。

$$N_g = \{ a_s N_p^{2b} + (1-a_s) N_1^{2b} \}^{1/2b} \quad (7)$$

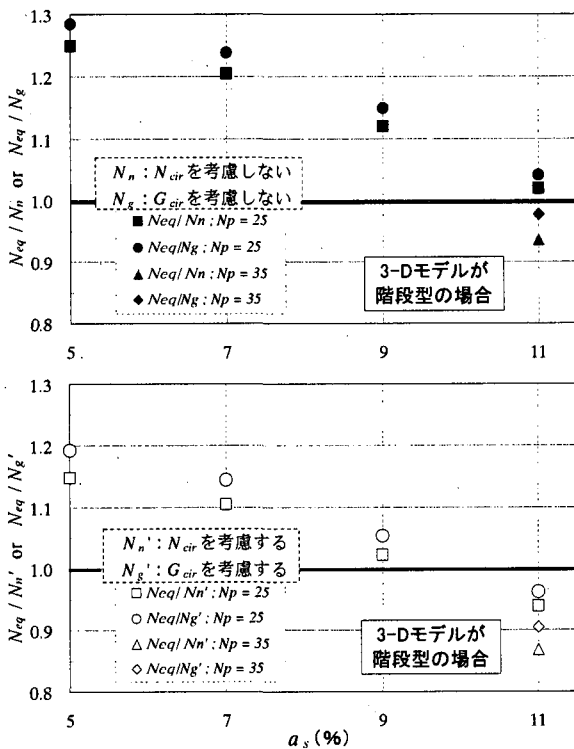


図-16 各評価式による予測等価 N 値と1次元解析に基づく N_{eq} との比率 (GLO~10m)

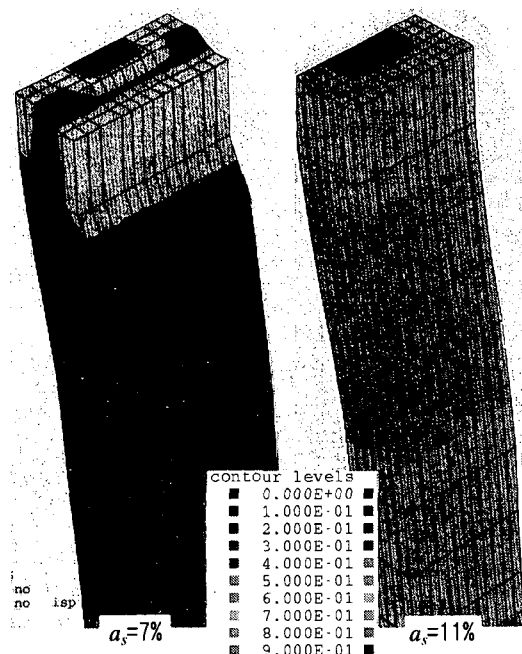


図-17 最大変形と過剰間隙水圧比コンター

上式には式(4)の係数 A が入っていない。 N 値の情報しかなく、 N_p 値が極端に大きくない場合には、上式を用いるのが便利である。 $b=0.5$ の場合に上式は式(1a)となる。なお、式(4)の形式で N 値から V_s を推定する式は数多く提案されている。表-2には代表的な式(4)の係数を示す。ただし、表-2のどの係数 b を用いても、 N_g の値には大きく影響しない。以下では式(7)と表-2の今井・殿内の値($b=0.314$)を用いて N_g を算定した。

(2) N_{eq} の考察 提案式により N_{eq} を予測したところ、 a_s が大きく液状化していないか液状化の程度が小さい場合($a_s=11\%, 14\%$)は、 N_n や N_g は N_{eq} にほぼ等しい。一方、 a_s が小さく明らかに液状化する場合($a_s=7\%, 5\%$)には、 N_n や N_g は N_{eq} よりも10~20%小さめの値となった。この関係を見やすくするため図-16に、 N_n や N_g に対する N_{eq} の比(N_{eq}/N_n), (N_{eq}/N_g)を示す。3-D FEMモデルで階段型の場合は $N_p=35$ の場合も示してある。どの推定法においても a_s が小さいと、小さ目(安全側)の等価 N 値を推定している。すなわち、液状化しやすい(a_s の小さい)改良地盤となるほど、安全側の等価 N 値を予測しており、この傾向は設計上においては問題無いと考えられる。小さい a_s で小さ目の N 値を推定した原因としては、3次元地盤の挙動は図-17のように杭間地盤が杭部分よりも大きく変形し、その傾向は a_s が小さいほど顕著である。1次元の一様地盤ではこの傾向を表現するのに限界があるため、 a_s が小さくなると予測精度が安全側になったと考えられる。

推定 N 値(N_n や N_g)を N_{eq} と比較すると、液状化していなければ N_{eq} をほぼ妥当に推定できているが、液状化の程度が激しくなると(a_s が小さくなると)、推定値は N_{eq} に比べて小さくなっている。ただその比率(N_{eq} /推定 N 値)は最大でも1.3未満である。従って液状化しないかまたは液状化の程度が小さければ、 N_n や N_g を N_{eq} の推定値として用いても良いといえる。

一方、 $N_p=35(a_s=11\%)$ の場合($\blacktriangle, \blacktriangle, \blacklozenge, \blacklozenge$)について見ると、多くの方法で推定された N 値が N_{eq} よりも大きく(縦軸の値が1.0以下)となっており、危険側の評価となっている。この中で N_g (\blacklozenge)は、ほぼ N_{eq} に等しい値を推定できている。

砂杭周辺の N 値増加(N_{cir})も考慮した方法-Bでは、 a_s が大きい場合には大き目の N 値を与えており危険側の推定となっているので、砂杭周辺の剛性の高い領域は考慮しない方法-Aの方が良い。同図右の3-Dモデルが突起型の場合では、砂杭周辺の N_{cir} 領域が無いので、等価 N 値法-Aや等価 G 法-Aの予測 N 値の精度は階段型に比べれば良い。

詳しく見れば N_n よりも N_g の方が良い推定値を与えている。例えば、 $a_s=14\%$ の中間土1で $N_{eq}/N_n=0.96$ となっており、 N_n では危険側の値を予測している。3-Dモデルが階段型の場合では砂杭周辺の N_{eq} 領域が効いて(特に a_s の小さい場合)、 N_{eq} より N_n や N_g の方が小さくなった[$N_{eq}/(N_n \text{ or } N_g) > 1.0$]と考えられる。よって、解析は実施していないが、 a_s の小さい場合においても3-Dモデルの N 値分布が突起型であれば、 N_n や N_g は N_{eq} に近い値を予測できるものと推察される。

4. 2 等価 N 値(N_{eq})の評価のまとめ

ここでは、動的解析を行わないで簡便にSCP改良地盤の等価 N 値 N_{eq} を推定する式を提案した[等価 G 法]。 N_{eq} の予測法をまとめると、以下ようになる。

- ・) 改良体(砂杭など)のせん断剛性 G やせん断波速度 V_s が分かっているとき：式(2a),(3),(5)を用いて予測。
- ・) 改良体の N 値 N_p のみが分かっているとき：式(7)を用いて予測。

ただし改良体が碎石のように粒径の大きい材料の場合は、 N 値がバラツキやすく信頼性に欠けるので、方法・)を推奨する。上記の予測値 N_{eq} を用いることにより、地震時の液状化抑制効果が適切に評価できる。この N_{eq} には砂杭や N 値分布などの複合地盤の効果が入っており、 N_1 を用いる現行設計法より妥当に設計できる。予測式の検証範囲は「 $a_s=5\sim 14\%$ 、 $N_p=20\sim 35$ 」である。ただし、実地盤への適用上はこの範囲内で十分であることが多い。

5. おわりに

ここでは、SCP改良地盤の従来設計法が、砂杭や N 値分布を考慮することにより妥当に設計できることを示した。すなわち、複合地盤であるSCP改良地盤と液状化抑制効果がほぼ同じとなるような物性(等価 N 値 N_{eq})を、3次元有効応力解析に基づき見出した。さらに設計の観点に立ち、比較的広範囲の N_p や a_s に対して簡便に N_{eq} を予測する方法を提案した。この N_{eq} には、砂杭や N 値分布などの複合地盤の効果が入っているので、マクロに捉えた改良地盤の液状化強度を高く評価でき、地盤改良工事の置換率 a_s の低減が図られる。すなわち N_{eq} は N_1 よりも大きい(図-13)ので、設計では N_1 でなく N_{eq} をもって目標 N 値とすれば、 $N_{eq}-N_1$ の合理化が図られる。

ちなみに、A火力発電所でSCP地盤改良を想定し、等価 G 法(N_g)を用いて経済性評価を行ったところ、従来の設計法に比べて18%のコストダウンが図られた。また N_g で地盤物性を評価して建屋応答を求めたところ、従来の応答と差はなく建屋コストの増減はなかった。

今後検討していくべき事項としては、 K_0 値の増加を N 値増加とは独立して評価することや、SCPの施工順序の工夫(例えば改良域の周辺から施工すれば中心部は施工しなくても締固められる)などが考えられる。

参考文献

- 1) 安田：大地震時による液状化と N 値，基礎工，Vol.31，No.2，pp50-53，2003
- 2) 松尾・安田・山本・原田・橋本：レベル2地震動における改良地盤の評価に関する実証的研究，第24回地震工学研究発表会，pp.273-276，1997
- 3) 地盤調査研究会：阪神淡路大震災，平成9年度報告書，1998
- 4) 大林・原田・山本・佐々木：締固め地盤の液状化抵抗に関する評価，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1411-1416，1998
- 5) 山崎：小特集，耐震設計と地質調査—港湾の耐震設計—，地質と調査，pp27-33，1996
- 6) 地盤工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで，pp.187-193，1994
- 7) 安田・原田・荒井・風見・佐藤・杉本：飽和地盤における N 値と密度，静止土圧係数の関係，第35回地盤工学研究発表会，pp.1435-1436，2000
- 8) 島宏・原田・柳原：静的締固め砂杭工法による改良地盤の密度増加指標に関する考察，第34回地盤工学研究発表会，pp.1997-1998，1999
- 9) 坂口：サンドコンパクション工法(浜甲子園の例)，基礎工，Vol.23，No.12，pp52-55，1995
- 10) 山本・桑原・原田・鈴木：液状化対策としてのSCP改良地盤の事後評価に関する一考察，第51回土木学会年次講演会，pp.588-589，1996
- 11) 原田・石田：大地震時における建築構造物の締固めによる直接基礎改良地盤の評価に関する実験的研究，実務にみる地盤改良工法の技術的諸問題，日本建築学会構造委員会，pp.93-98，1999
- 12) 三輪・小堤・安田・森：SCP改良地盤の地震時挙動の評価におけるモデル化に関する問題点の整理，第35回地盤工学研究発表会，pp.2419-2420，2000
- 13) 野津・小堤・溜・川満・井合・森：SCPで改良された砂質地盤の地震時有効応力解析におけるモデル化，第35回地盤工学研究発表会，pp.2417-2418，2000
- 14) 原・石倉ほか：有効応力解析によるSCP改良地盤の事例にもとづくモデル化の検討(その1，その2)，第35回地盤工学研究発表会，pp.2397-2400，2000
- 15) 立石・古池・宇野：密度増大工法における液状化強度設定法の研究，第36回地盤工学研究発表会，pp.2215-2218，2001
- 16) 船原・藤井：締固め砂杭工法による液状化対策地盤の三次元有効応力解析，第36回地盤工学研究発表会，pp.2219-2220，2001
- 17) 佐藤・桑原・前田：均質化応答解析による締固め砂杭液状化対策地盤の液状化特性と耐震性能評価，第47回地盤工学シンポジウム，pp.173-178，2002
- 18) 福武：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究，名古屋工業大学博士論文，1997
- 19) 福武・松岡：任意方向単純せん断におけるダイレイタンスーの統一的解釈，土木学会論文集，No.412/III-12，pp.143-151，1989
- 20) 日本建築学会構造解析部会：臨海部における大規模建築物群の総合的な構造安全に関する調査・検討のうち建築物の構造安全性に関する調査・検討，(社)建築業協会共同研究，1992
- 21) 建築基礎構造設計指針，日本建築学会，2001
- 22) 今井・殿内・田中：地震応答解析のための土の動的性質 2.土の動的性質，土と基礎，Vol.33，No.7，pp.65-72，1985
- 23) 地盤・基礎構造物の耐震設計，地盤工学実務シリーズ13，地盤工学会，pp.78-80，2001
- 24) Imai, T.: P and S wave velocities of the ground in Japan, Proc. of 9th ICSMFE, Vol2, pp.257-260, 1977
- 25) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 V.耐震設計編，1980
- 26) 今井・麓・横田：日本の地盤における弾性波速度と力学的性質，第4回日本地震工学シンポジウム，pp.89-96，1975