九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# 性能規定に基づく浸透固化処理地盤の支持力評価

笠間，清伸
九州大学大学院工学研究院

長山，達哉
国土交通省九州地方整備局博多港湾・空港整備事務所

濱口，信彦
内閣官房情報通信技術（IT）総合戦略室

杉村，佳寿
九州大学大学院工学研究院

他

https://hdl.handle.net/2324/7217552

出版情報：Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering). 78 (1), pp.45-59, 2022. Japan Society of Civil Engineers
バージョン：
権利関係：© 2022 by Japan Society of Civil Engineers

KYUSHU UNIVERSITY

土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 78, No. 1, 45-59, 2022.

# 性能規定に基づく浸透固化処理地盤の支持力評価

笠間　清伸[1]・長山　達哉[2]・濱口　信彦[3]・
杉村　佳寿[4]・藤井　照久[5]・金子　智之[6]・善　功企[7]

[1]正会員　九州大学教授　大学院工学研究院（〒819-0395 福岡市西区元岡744）
E-mail: kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

[2]正会員　国土交通省九州地方整備局博多港湾・空港整備事務所（〒810-0074 福岡市中央区大手門2-5-33）
E-mail: nagayama-t88s3@mlit.go.jp

[3]正会員　内閣官房情報通信技術（IT）総合戦略室（〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町1-3）
E-mail: NobHamagu@digital.go.jp

[4]正会員　九州大学教授　大学院工学研究院（〒819-0395 福岡市西区元岡744）
E-mail: y.sugimura@civil.kyushu-u.ac.jp (Corresponding Author)

[5]正会員　復建調査設計株式会社（〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-8-15）
E-mail: teru-fujii@fukken.co.jp

[6]正会員　復建調査設計株式会社（〒732-0052 広島市東区光町2-10-11）
E-mail: kaneko@fukken.co.jp

[7]正会員　九州大学名誉教授・（一財）沿岸技術研究センター（〒812-0013 福岡市博多区博多駅東2-4-17）
E-mail: zen@cdit.or.jp

砂質地盤の液状化対策等を目的として浸透固化処理工法により改良された地盤（以下，「浸透固化処理地盤」と称す）は，薬液の浸透の不均一性や対象地盤の土質の不均質性等の理由により，自然堆積地盤に比べてせん断強度等に空間的な不均質性を有する．この浸透固化処理地盤の不均質性は，設計時の支持力の決定に影響することが予想され，性能規定に基づく支持力評価法が求められている．本稿では，空港の液状化対策を目的に浸透固化処理された地盤を対象に，せん断強度をランダム場理論で表現し，有限要素法とせん断強度低減法を使ったモンテカルロシミュレーションにより強度の不均質性を考慮した支持力解析を行った．その結果より，浸透固化処理地盤の不均質性が支持力に与える影響を確率・統計的に考察し，性能規定に基づく支持力評価法を提案した．

***Key Words:*** *permeation grouting method, spatial variability, performance-based design, bearing capacity*

## 1. はじめに

我が国は地震国であり，過去の地震においても液状化による甚大な被害が報告されている．国民の暮らしと経済を守る社会インフラは地震リスクに適切に対処していかなければならず，特に港湾や空港といった交通インフラは災害時の輸送拠点になるため，巨大地震時にもその機能を維持し続けることが求められる．

このため，液状化対策として地盤改良が必要となるが，土質や固化材の混合，締固め等の不均質性から，改良後の地盤において弾性係数やせん断強度定数等の地盤定数に大きなばらつきが生じる[1)~4)]．例えば，笠間ら(2008)は，事前混合処理により改良された固化地盤において，室内強度と同じ配合条件で施工された原位置強度の比を整理し，改良地盤の原位置強度がばらつきを有しており，室内試験強度を下回る割合が3割以上あることを示している[2)]．また，同じく固化処理地盤に区分される深層混合処理地盤においても，改良地盤の一軸圧縮強さがばらつくことが示されている[3)]．

港湾・空港における深層混合処理工法技術マニュアルによれば，この不均質な固化処理地盤の品質確認を行うにあたっては，試験結果のデータが比較的多く確保でき

る場合には，改良体の強度分布が正規分布に近いと考え，統計的手法により改良体の強度評価を行う．その評価の中では，目標とする改良体の設計基準強度に対していくらかの不良発生を許容するようになっており，海洋工事においては不良率（一軸圧縮強さを正規分布と仮定して求めた確率分布を母集団として，その母集団に対して設計基準強度を満足しない強度の割合）を15%程度までは許容してもよいことが示されている[4]．

地盤のばらつきを考慮した研究として，土田・小野(1988)[5]は空港施設において発生する粘土地盤の圧密に伴う不同沈下量を予測するための数値シミュレーションプログラムを開発し，その計算結果に基づいて不同沈下を推定する方法を提案している．また，宮田ら(1998)[6]は地盤の物性値の空間的ばらつきを確率論的に評価し，これに基づいて液状化による不同沈下予測を行う手法を開発している．これらの研究は，何れも地盤定数や層厚のばらつきを3次元空間で評価したものである．大竹・本城(2012)[7]は，地盤解析と信頼性解析を分離して実施することで効率化させ，つまり地盤解析から得られた応答曲面[8]を用いたモンテカルロシミュレーションにより信頼性を評価し，地盤構造物設計の特性を考慮した実用的な信頼性設計法を構築している．地盤の支持力に関して信頼性設計を適用した研究としては，Griffiths and Fonton (2001)[9]，Griffiths et al. (2002)[10]やPopescu et al. (2005)[11]が，材料定数の不均一性を考慮し，従来の弾塑性有限要素解析によるモンテカルロシミュレーションを用いて，平面ひずみ状態における粘性地盤上の平板基礎の支持力特性を明らかにしている．また，忽那ら(2008)[12]，笠間ら(2010)[13]は，地震時の局所的な液状化を考慮した地盤支持力解析について，液状化強度の空間的不均質性をランダム場理論で表現し，数値極限解析(Numerical Limit analyses, NLA)[14,15]を用いたモンテカルロシミュレーションにより確率・統計的に地震時の支持力特性を明らかにしている．具体的には，地盤の一軸圧縮強さ$q_u$を対数正規分布と仮定し，平均強度$\mu_{q_u}$，変動係数$\mathrm{COV}_{q_u}$，自己相関距離$\theta$，及び正規乱数行列Xから，コレスキー分解を用いたmid-point法[16]により各要素の一軸圧縮強さを計算している[17,18]．

本論文では，固化系の液状化対策工法の一つである浸透固化処理工法で改良された地盤を対象とする．浸透固化処理工法は浸透注入により間隙水を薬液に置き換え，薬液のゲル化により粘着力を付加し，せん断強度を増加させる．しかし，浸透固化処理された地盤には，他の固化処理工法地盤と同様，薬液の浸透の不均一性および対象地盤の土質の不均質性などの理由により，自然堆積地盤に比べて材料定数に大きな空間的な不均質性を有するという課題が存在する．このような浸透固化処理地盤のせん断強度の不均質性は，設計時における固化処理地盤の支持力の決定に影響することが予想され，地盤の不均質性を考慮した性能規定に基づく支持力評価法が実務的にも求められている．しかし，浸透固化処理地盤の不均質性について実データを用いて詳細に検証した先行研究は存在せず，ばらつきを前提とした性能規定に基づく支持力評価法を提示する先行研究も存在しない．

そこで本論文では，空港の液状化対策を目的に浸透固化処理された実地盤を対象に，浸透固化処理地盤のせん断強度の不均質性を詳細に検証した．その上で，せん断強度をランダム場理論で表現し，有限要素法とせん断強度低減法を使ったモンテカルロシミュレーションにより強度の不均質性を考慮した支持力解析を行った．その結果を用いて，固化処理地盤の不均質性が支持力係数，破壊メカニズムおよび支持力の信頼性に与える影響を確率・統計的に考察した．なお，本論文では，原地盤のばらつきは考慮せずに，浸透固化処理による改良部のばらつきのみを2次元平面ひずみ条件で評価したものである．

## 2. 空港における浸透固化処理地盤の性能照査

### (1) 空港に求められる要求性能と性能規定値

平成17年8月，国土交通省航空局に設置された「地震に強い空港のあり方検討委員会[19]」では，地震時に求められる空港の役割が示されており，「緊急輸送の拠点となる空港」では，発災後極めて早期の段階で救急・救命活動等の拠点としての機能や，発災後3日以内において緊急物資・人員等輸送受入機能が求められている．

また，「航空輸送上重要な空港」では，上記に加えて，発災後3日を目途に定期民間輸送機の運航が可能となる機能や，地震災害による経済被害の半減を目指し再開後の運航規模は極力早期の段階で通常時の50%に相当する輸送能力のほか，航空ネットワークの維持及び背後圏経済活動の持続性確保と首都機能維持が求められている．

一方，大規模地震時における空港の性能規定値としては，「空港土木施設設計要領及び設計例（耐震設計編）[20]」において，航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する勾配を確保することや，航空機荷重に対して，必要な地盤の支持力を確保することが求められている．

### (2) 性能照査の必要性と照査方法

地盤定数にばらつきを有する改良地盤において，設計基準強度を満足しない部分では，設計地震動レベルの地震が発生した際に液状化が発生する恐れがあり，その場合に空港基本施設が設計限界値を満足するかどうかを照査する必要がある．しかし，こうした地盤上の空港基本施設では，従来の仕様規定では評価が困難であり，性能規定に基づく新たな方法により改良地盤の性能を照査する必要がある．

空港基本施設の設計における性能照査の流れを**図-1**に

示す．**図-1** はレベル 2 地震動に対する性能照査を想定したものである．なお，**図-1** 中に示している「局所的液状化」とは，本論文で対象とした浸透固化処理地盤で設計基準強度に満たない箇所が地震時に局所的に液状化するような事象を想定したものである．本論文では，このフローのうち，「a) 支持力照査　強度不均質性（局所的液状化を含む）を考慮した支持力解析」について，液状化対策を目的とした浸透固化処理地盤を対象に，せん断強度をランダム場理論で表現し，有限要素法とせん断強度低減法を使ったモンテカルロシミュレーションにより強度の不均質性を考慮した支持力解析を行う．ただし，この手法は，ある一つの条件で多大な計算時間を要するため，今後浸透固化処理工法で改良される全ての地盤で解析を実施することは現実的ではない．そこで，適合率と変動係数に着目したチャート図を作成することで，支持力性能評価を行うことを試みる．ここで適合率とは，せん断強度の分布を対数正規分布と仮定して求めた確率分布を母集団として，その母集団に対して設計基準強度を満足する強度の割合であり，不良率と相反する関係がある．このチャート図を用いれば，詳細な支持力解析を実施しなくても，改良後の浸透固化処理地盤の一軸圧縮強さの適合率とばらつきを把握することで，支持力が確保されているか否かを簡易に判断することが可能となる．なお，その方法の詳細については，6 章で述べる．

## 3.　浸透固化処理地盤の不均質性

浸透固化処理地盤のせん断強度のばらつきを調査するために，液状化対策を目的として浸透固化処理された A 空港の地盤における一軸圧縮強さの結果について整理を行った．浸透固化および深層混合処理などで固化系改良された土の液状化強度比$Rl_{20,5\%}$と一軸圧縮強さ$q_u$との間には，**図-2** に示すように，液状化強度比が大きくなれば一軸圧縮強さも一定勾配で増加するという比例関係が確認されている[21]．

そのため，液状化対策を目的とした固化処理地盤の品質管理は，採取された乱れの少ない試料の一軸圧縮強さ$q_u$が設計基準強度$q_{uck}$を満足しているかを確認することによって評価されることが原則とされており，同工事においても一軸圧縮強さ$q_u$による管理が行われた．**図-3** はA空港において浸透固化処理工法が実施された範囲の平面図である．工事は対象範囲を 13 ブロックに分割し実施された．A 空港は，市街地を形成する平野に位置している．空港周辺では，丘陵や段丘が形成されており，これらに挟まれた河川が流下する平地に位置している．

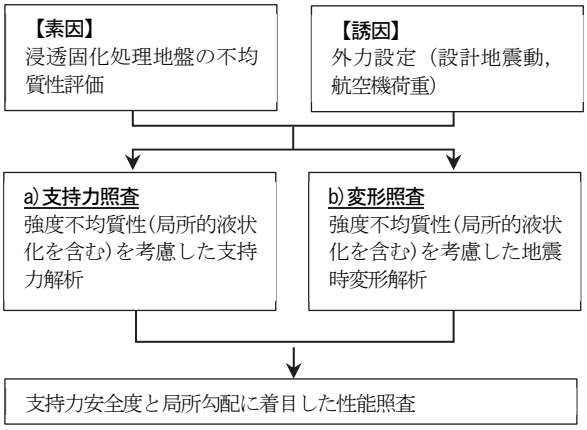



**図-1**　空港における浸透固化処理地盤の性能照査の流れ

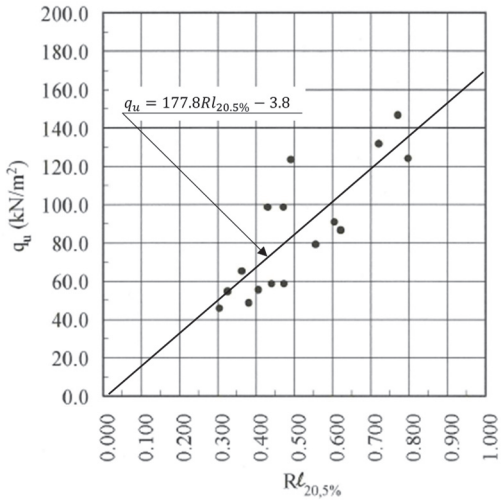



**図-2**　一軸圧縮強さと液状化強度比の関係[19]

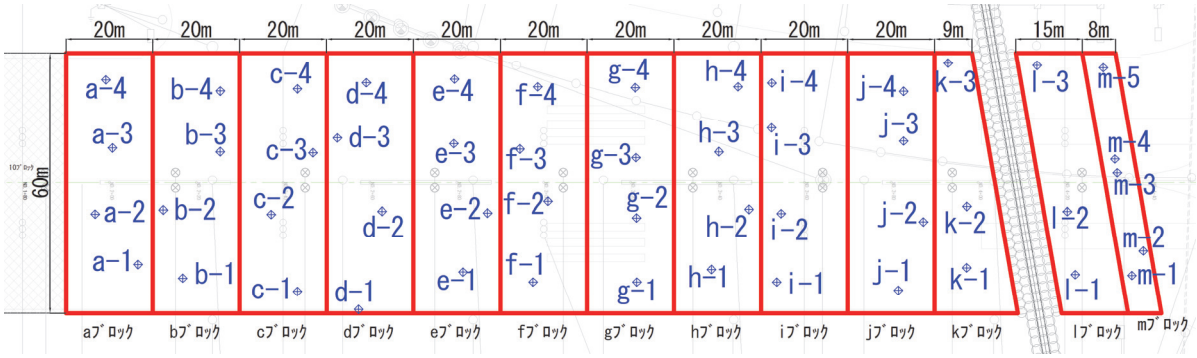



**図-3**　A 空港における浸透固化処理工法の工事が実施された範囲とブロック割

対象範囲では，上位より旧盛土であるB層が2m程度，透水性の低い粘性土層が1m程度，緩い砂質土層が4m程度堆積している地層構成であり，このうち砂質土層が想定L2地震動に対して液状化する判定結果となり，液状化対策が実施されている．なお，kブロックとlブロックの間には地下排水管が位置しており，別途工事で地盤改良が実施されている．本論文で整理対象とした工事範囲は**図-3**に示すa～mブロックの範囲である．対策が実施された範囲の改良体積は合計で約52,800m$^3$であり，改良工事後に地盤調査が実施された地点は**図-3**に示す全51地点である．1地点で求めた一軸圧縮強さのデータは15～20個程度で，合計897個のデータが取得された．工事範囲内の改良対象土の細粒分含有率は概ね$Fc$=5～25%前後，間隙率は$n$=39～44%，N値は3～15，液状化強度$R_{L20}$は0.27～0.32程度であった．この液状化対象層に対して，既設滑走路舗装への影響を考慮した浸透固化処理工法が採用され，設計基準強度は$q_{uck} = 60\mathrm{kN/m^2}$，薬液濃度9%でシリカによる薬液注入工事が行われた．**図-4**に，A空港の代表ブロック（hブロック）における一軸圧縮強さの頻度分布を示す．一軸圧縮強さのデータサンプル数72個に対して，平均値は125.9kN/m$^2$，変動係数0.544となった．この結果より，浸透固化処理地盤の一軸圧縮強さは，必ずしも同一値にならずある程度の空間的ばらつきが生じていることが分かる．そのため，浸透固化処理工法の設計では，現地地盤の不均質性を考慮するパラメータとして現場割増係数（$\eta = 1.2$）を設計基準強度に乗じている．また，この一軸圧縮強さの分布は，対数正規分布に従う傾向が見られたため，仮定した対数正規分布を**図-4**中に実線で示した．一軸圧縮強さのばらつきの原因としては，サンプリング時の乱れの影響や原地盤の細粒分含有率や間隙率の違い等が挙げられる．ただし，本論文で整理した一軸圧縮強さは，トリプルサンプリングによる試料に対して実施した一軸圧縮試験及び三軸UU試験による値が一部含まれるが，原位置試験（ピエゾドライブコーン（PDC）による$N_d$値，孔内水平載荷試験による変形係数等）や，シリカ含有量試験によるシリカ含有量増分から推定した値が大半であるため，サンプリング時の乱れの影響はほとんど含まれていないものと推察される．なお，このような不均質な改良対象地盤であるが，改良体の注入状況としてはPDC試験による過剰間隙水圧の増分やシリカ含有量増分により出来形が確保されていることが確認されている．

**表-1**に，一軸圧縮強さと対数正規分布の適合度検定を行った結果を示す．この結果より，当該ブロックの一軸圧縮強さの分布を対数正規分布と仮定した場合，カイ二乗値は3.75となり，有意水準0.05，自由度6の変数値$C_{1-\alpha,f}$=12.6よりも小さな値となることから，当該ブロックの浸透固化処理地盤における一軸圧縮強さの実測値の分布は，対数正規分布に適合していることが分かった．同様にして求めた各ブロックの一軸圧縮強さと対数正規分布の適合度検定結果を**表-2**に示す．この結果より，dブロックにおいてカイ二乗値は32.42となり，有意水準0.05，自由度6の変数値$C_{1-\alpha,f}$=12.6よりも大きな値となることから，同ブロックの一軸圧縮強さの分布は対数正規分布に適合しない結果となったが，その他のブロックでは，一軸圧縮強さの実測値の分布は，対数正規分布に適合していることが確認された．なお，対数正規分布に適合しなかったdブロックについては，実測分布を用いた評価を別途実施した．

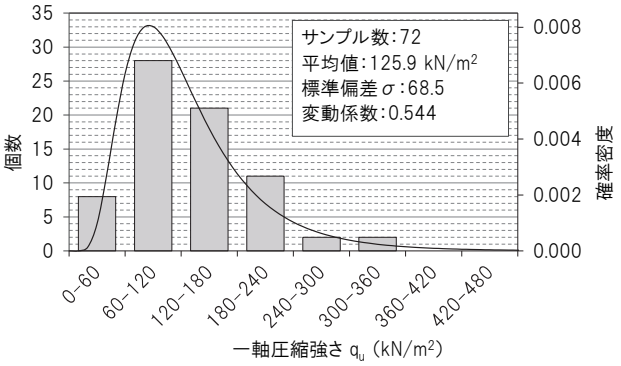



**図-4** A空港の代表ブロックにおける一軸圧縮強さの分布

**表-1** 代表ブロックにおける対数正規分布の適合度検定結果

| $q_u$(kN/m$^2$)の区間 | 観測度数 $n_i$ | 理論度数 $e_i$ | $(n_i-e_i)^2/e_i$ | 自由度 |
|---|---|---|---|---|
| 0～60 | 8 | 8.3 | 0.01 | 6 |
| 60～120 | 28 | 32.3 | 0.57 | |
| 120～180 | 21 | 19.2 | 0.16 | |
| 180～240 | 11 | 7.6 | 1.53 | |
| 240～300 | 2 | 2.8 | 0.24 | |
| 300～360 | 2 | 1.1 | 0.82 | |
| 360～420 | 0 | 0.4 | 0.42 | |
| 計 | 72 | 72 | 3.75 | |

**表-2** 各ブロックにおける対数正規分布の適合度検定結果

| ブロック | $(n_i-e_i)^2/e_i$ |
|---|---|
| a | 10.84 |
| b | 9.54 |
| c | 10.64 |
| d | 32.42 |
| e | 3.88 |
| f | 10.01 |
| g | 10.38 |
| h | 3.75 |
| i | 5.96 |
| j | 7.69 |
| k | 11.63 |
| l | 11.47 |
| m | 5.71 |

**図-5** は，改良範囲における全 13 ブロックのサンプル数 897 個の一軸圧縮強さの頻度分布を示したものである．一軸圧縮強さの平均値は137.1kN/m$^2$，変動係数0.623 となった．**表-3** に，一軸圧縮強さと対数正規分布の適合度検定結果を示す．一軸圧縮強さの分布を対数正規分布と仮定した場合，カイ二乗値は 4.58 となり，有意水準 0.05，自由度 6 の変数値$C_{1-\alpha,f}$=12.6 よりも小さな値となることから，A 空港で実施された浸透固化処理地盤における一軸圧縮強さの実測値の分布は，対数正規分布に適合していると言える．この傾向は，浸透固化処理工法技術マニュアルに示される他工事においても見られており，事後調査による一軸圧縮強さの変動係数が 0.2～0.5 程度であった事例や一軸圧縮強さの分布が示されている[22]．このことから，浸透固化処理工法により適切に改良された地盤の一軸圧縮強さは，対数正規分布に適合するものと考えられる．

本論文では，統計的手法を進めるにあたって，各ブロックで調査した一軸圧縮強さを対数正規分布と仮定し，適合率を全 13 ブロックに対して調べた．各ブロックにおける適合率の結果を**表-4** に示す．その結果，各ブロックにおける適合率は，62～97%程度であった．本論文では，そのような不均質な地盤に対して適合率と支持力安全度の関係を整理し，支持力性能の評価を行った．また，変動係数は 0.46～0.85 程度とブロックによってやや差異があったが，解析では，想定される変動係数の最大値を 1.0，最小値を 0.2 と想定し，これまでの他工事で確認された変動係数も考慮し，それらを網羅するように解析ケースを設定した．このように各ブロックごとに適合率や変動係数に差異が生じた理由として，ブロックごとに細粒分含有率や間隙率の分布が異なることに加えて，ブロックによっては礫分あるいは粘性土分を多く含有する地盤が介在する箇所が存在するためと考えられる．

浸透固化処理地盤の不均質性を考慮するには，コンクリートなどの材料と異なり，平均値や変動係数だけでなく，自己相関関数を用いた空間的な自己相関性を考慮する必要がある．A 空港のある地点における，同一土層，かつ同一改良仕様の地盤内において，鉛直方向に 20cm 間隔で求められた一軸圧縮強さについて，鉛直方向の間隔と自己相関係数を整理した結果を**図-6** に示す．

**表-3** A 空港のブロック全体における一軸圧縮強さと対数正規分布の適合度検定結果

| $q_u$(kN/m$^2$)の区間 | 観測度数 $n_i$ | 理論度数 $e_i$ | $(n_i-e_i)^2/e_i$ | 自由度 |
|---|---|---|---|---|
| 0～60 | 160 | 121.9 | 0.72 | 6 |
| 60～120 | 258 | 356.6 | 2.00 | |
| 120～180 | 238 | 229.0 | 0.01 | |
| 180～240 | 131 | 107.6 | 0.35 | |
| 240～300 | 60 | 48.5 | 0.46 | |
| 300～360 | 39 | 22.3 | 0.99 | |
| 360～420 | 11 | 10.6 | 0.05 | |
| 計 | 897 | 897 | 4.58 | |

**表-4** 各ブロックにおける適合率

| ブロック | 調査地点数 | 一軸圧縮強さのデータ数 | 変動係数 | 適合率 |
|---|---|---|---|---|
| a | 4 地点 | 86 個 | 0.590 | 91% |
| b | 4 地点 | 82 個 | 0.774 | 77% |
| c | 4 地点 | 83 個 | 0.552 | 94% |
| d | 4 地点 | 81 個 | 0.654 | 86% |
| e | 4 地点 | 65 個 | 0.846 | 62% |
| f | 4 地点 | 68 個 | 0.638 | 83% |
| g | 4 地点 | 68 個 | 0.540 | 94% |
| h | 4 地点 | 74 個 | 0.544 | 89% |
| i | 4 地点 | 78 個 | 0.714 | 80% |
| j | 4 地点 | 73 個 | 0.541 | 95% |
| k | 3 地点 | 58 個 | 0.586 | 92% |
| l | 3 地点 | 52 個 | 0.466 | 97% |
| m | 3 地点 | 48 個 | 0.616 | 83% |

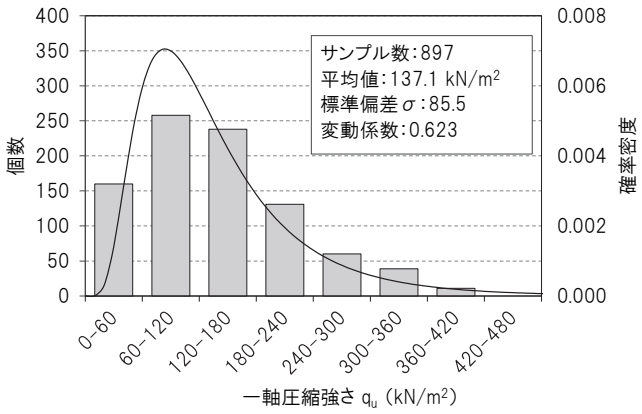



**図-5** A 空港で採取された試料の一軸圧縮強さ分布

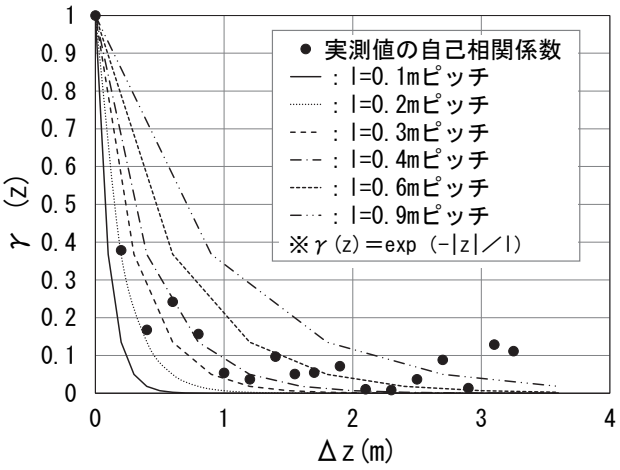



**図-6** 一軸圧縮強さの自己相関係数（鉛直方向）

**図-6** 中の黒プロットは，一軸圧縮強さの自己相関係数を 0～325cm まで概ね 20cm 間隔で示した結果である．また，**図-6** 中の各線は，0.1m～0.3m ピッチで自己相関係数を指数関数で近似した値である．**図-6** より鉛直方向の自己相関距離は 0.2～0.3m 程度となり，それより距離が離れるとほぼ自己相関が見られない結果となった．

また，水平方向の自己相関距離については，**図-7** に示すように Bor. m-1 地点を基点として，6m，24m，27m，48m の各調査地点との自己相関距離を確認した．各地点間の一軸圧縮強さについて水平方向の地点間距離と自己相関係数を整理した結果を**図-8** に示す．**図-8** 中の黒プロットは，一軸圧縮強さの自己相関係数を各調査地点間の距離毎に示した結果であり，各線は 5m～10m ピッチで自己相関係数を指数関数で近似した値である．**図-8** より，水平方向の自己相関距離はばらついており，ほぼ自己相関が見られない結果となった．

以上の結果から，浸透固化処理改良地盤の改良強度の自己相関距離は，鉛直方向 0.2～0.3m 程度，水平方向 2m 程度となり，ほぼ自己相関が見られない，つまりランダムな地盤であることが確認された．

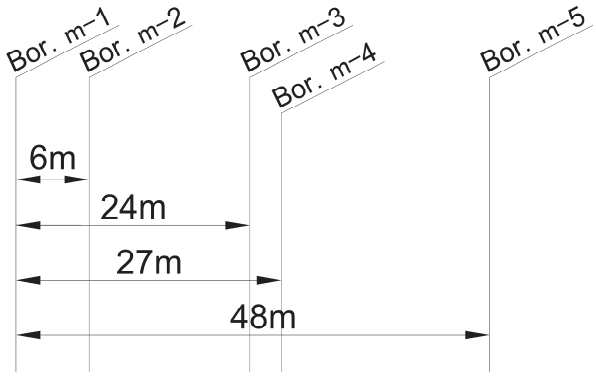



**図-7**　水平方向の自己相関距離を確認した調査箇所図

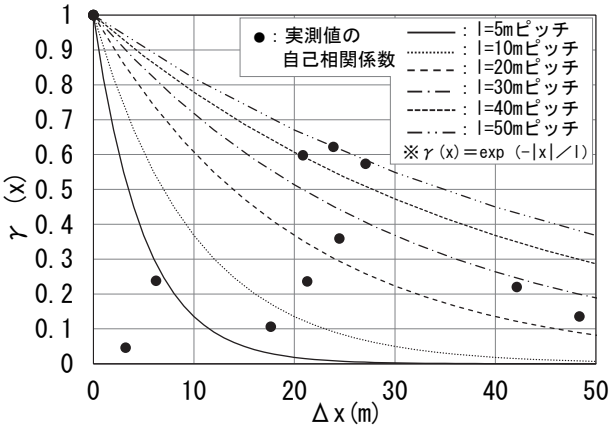



**図-8**　一軸圧縮強さの自己相関係数（水平方向）

## 4.　固化処理地盤における支持力解析手法

前章で示したように，浸透固化処理地盤のせん断強度は，対数正規分布に近いばらつきを有しており，統計的手法により改良体の強度評価を行っても問題ないことが確認された．本論文では，対象構造物を空港基本施設の滑走路であると仮定し，その要求性能の一つである航空機荷重に対する支持力に着目し，その性能を満足する適合率について検討を行うこととした．

### (1)　支持力計算の概要

本論文では浸透固化処理地盤による改良範囲のせん断強度のばらつきを評価するため，ランダム場理論を用いて空間的不均質性を表現した．なお，支持力解析に用いたプログラムコードは，FEM を用いたせん断強度低減法である「SSR-FEM[23]」とした．せん断強度低減法の考え方は，地盤の強度定数を徐々に低減させ，地盤全体が破壊した時点で全体安全率を定義するものである．この方法により，極限平衡法と同じように地盤の最小安全率とそれに対応するすべり領域の計算が可能となる．土のせん断強度$\tau_{\mathrm{f}}$を係数 $F$（以下，「$F$」と称す）で割った形で表せると仮定する．

$$\tau_{\mathrm{fF}} = \frac{c' + \sigma' \tan\emptyset'}{F} \tag{1}$$

はじめに $F$ に小さい値（例えば 0.1）を与える．その際，仮想的なせん断強度$\tau_{\mathrm{fF}}$は大きな値となるので，せん断強度を過大評価することになる．ここから段階的に $F$ の値を増加させていくことにより，地盤のせん断強度を徐々に下げていく計算を行う．ある段階で，弾塑性 FEM の反復計算が発散し，地盤が崩壊に至ったと判断されると，その際の $F$ を地盤の全体安全率と定義する．**図-9** に，せん断強度低減法による塑性域の進展イメージを示す．

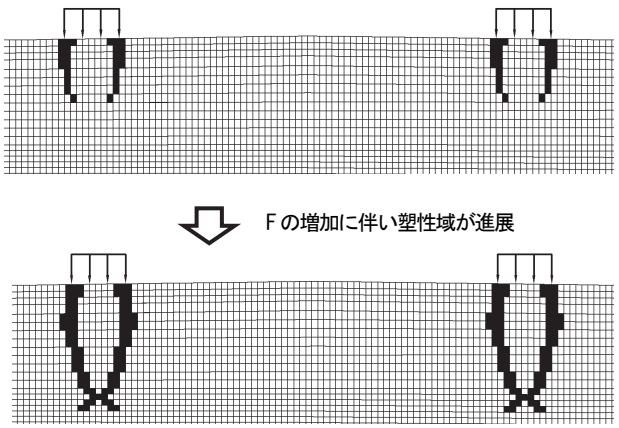



**図-9**　せん断強度低減法による塑性域の進展イメージ

本論文で実施した SSR-FEM の要素種別は 1 次要素，積分次数は 4 点積分である．弾塑性計算における剛性評価法としては，降伏するまでは線形，降伏後はひずみを無限大とするバイリニアモデルとし，その際の破壊基準はモール・クーロン，塑性ポテンシャルは関連流れ測とした．$F$ の増減に伴う地盤の塑性化によって発生する不釣り合い力を，この弾塑性計算における要素応力から節点反力（残差力）として計算し，解が収束するまで残差力を再配分する反復計算を行った．その際の反復計算の収束を判定する基準としては，残差力に対する全節点変位増分に対するそれまでの全変位増分の累積値で割った値が $1.0\times10^{-5}$ 以内に収まるまでとし，その際の反復回数は 500 回を上限とした．**図-10** に，本論文で実施した SSR-FEM における反復回数と $F$ の関係の一例を示す．$F$ が 0.5 を超えた辺りから，反復回数が急速に増加する傾向がみられる．

本論文では，液状化対策を目的とした浸透固化処理地盤を対象に，改良地盤の不均質性によるせん断強度の低減に伴う支持力不足に着目した検討を目的としたため，せん断強度をランダム場理論で表現し，有限要素法とせん断強度低減法を使ったモンテカルロシミュレーションにより強度の不均質性を考慮した支持力解析を行った．なお，既往研究[24]によれば，せん断剛性やポアソン比が極限支持力に与える影響は極めて小さいことが示されていることから，それらの不均質性については考慮せずに支持力解析を行った．

### (2) 支持力計算の条件

支持力解析の対象として，A 空港の代表的な改良地盤の断面をモデル化した．改良範囲は，滑走路幅 60m 全域とし，改良深度は GL-2m～GL-8m（改良厚 6m 程度）とした．地層モデルは，対象範囲の地質調査結果に基づき，水平成層によりモデル化した．なお，本支持力解析は，モデル全体としてせん断抵抗を調整する計算手法であるため，モデルの中でせん断抵抗が極端に大きくなる舗装体については，モデル化しないものとした．ただし，舗装体の自重は等分布荷重により考慮した．**図-11** に，解析モデルを示す．このモデルを対象に，A 空港の地質調査結果等も踏まえ，浸透固化処理工法による改良範囲内の一軸圧縮強さ $q_u$ について，想定される範囲内の適合率や変動係数のばらつきをランダム場理論で表現し，航空機荷重を載荷した支持力解析を行った．

改良範囲内のメッシュの間隔は，地盤調査で確認された鉛直方向で 0.2～0.3m 程度の自己相関距離であることを考慮し，0.2m×0.2m 程度に分割し，解析メッシュの節点数は 12,342，要素数は 11,959 とした．ただし，航空機荷重の載荷部周辺は，計算精度が確保できるようにより密に分割した．要素数が 11,959 と多くなることから，理論解との整合を確認したうえで，三角形モデルは使用せずに矩形メッシュによりモデル化し極力要素数を削減するものとした．**図-12** に，解析メッシュを示す．境界条件は，解析領域の底面は X・Y 方向の変位を固定，解析領域の側面は X 方向の変位を固定，Y 方向の変位をフリーとした．

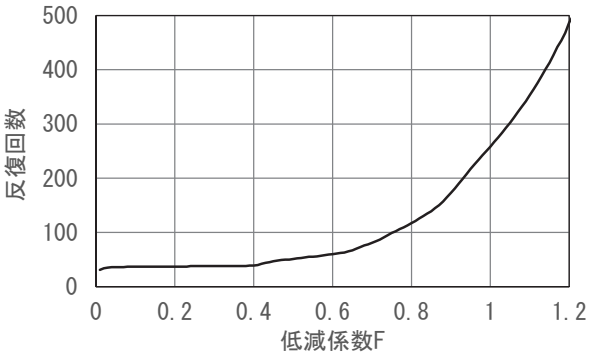



**図-10**　SSR-FEM における反復回数と $F$ の関係

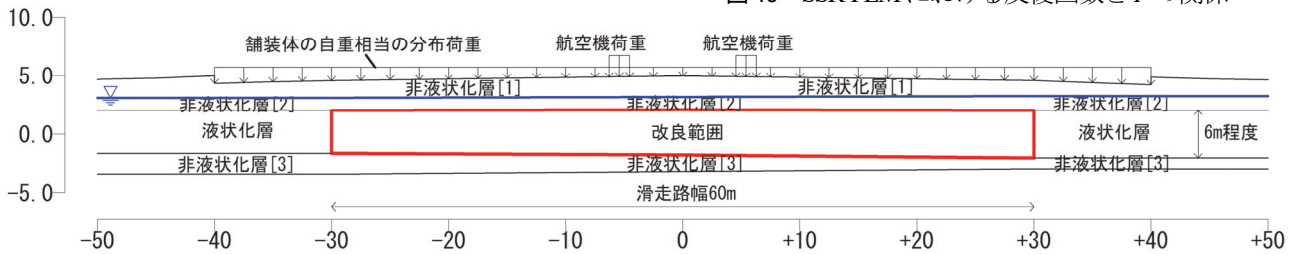



**図-11**　解析モデル

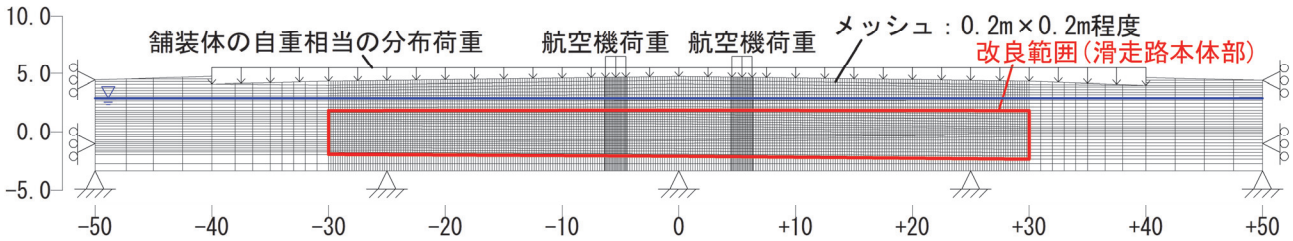



**図-12**　解析メッシュ

航空機荷重は，A 空港において想定される LA-1 機材の中で最大となる B777-9 を想定した．**表-5** に，B777-9 の荷重諸元を，**図-13** に，B777-9 の車輪配置と支持力解析に用いた荷重を示す．本支持力解析は，奥行き幅 1m の平面ひずみ要素による滑走路横断方向の解析であるため，**図-13** 中の解析断面方向に対して荷重(P1 及び P2)を考慮した．解析断面奥行き方向については，舗装体内(GL-1m 程度)での荷重分散を考慮して分布荷重を設定した．一方，解析断面方向については，荷重分散は解析モデル内で考慮されるものと判断し，評価として危険側の設定となることを避けるため分布荷重の設定では地中での荷重分散範囲を考慮しないものとした．**表-6** に，航空機荷重の設定結果を示す．なお，「空港土木施設設計要領及び設計例（構造設計編）」[25]では，土被り 4m 未満の地下構造物に対して衝撃荷重を考慮することを標準としている．当該空港の浸透固化改良の深度は，3m 程度の土被りの断面も見られたため，航空機の衝撃荷重として設定した静的荷重の 30%の割り増しを考慮した．また，この航空機荷重は，想定される最大限の荷重を考慮しているため，荷重のばらつきについては解析上考慮しないものとした．

改良範囲及び原地盤の構成式は弾完全塑性体(モール・クーロンモデル)とし，破壊基準はモールクーロン，塑性ポテンシャルは関連流れ則とした．その際に必要となる解析定数は，単位体積重量$\gamma$，弾性係数$E_{50}$，せん断強度$c$，ポアソン比$\nu$であり，A 空港の土質調査結果に基づき代表的な値を用いた（**表-7**）．単位体積重量は，湿潤密度試験結果より設定した．弾性係数$E_{50}$は N 値より推定した（$E_{50}$＝2,800×N）．ただし，改良範囲については，浸透固化処理工法技術マニュアルを参考に改良範囲外の液状化層の 1.1 倍とした[26]．ポアソン比は一般値の 0.33 とした．非液状化層のせん断強度は三軸圧縮試験結果より設定した．液状化層のせん断強度は，完全液状化の状態を想定しゼロとした．浸透固化処理地盤による改良範囲のせん断強度$c$の設定にあたっては，せん断強度のばらつきを評価するため，ランダム場理論を用いた空間的不均質を考慮した各要素の一軸圧縮強さの空間分布を計算した．具体的には，浸透固化処理された地盤の一軸圧縮強さ$q_u$を対数正規分布と仮定し，平均強度$\mu_{q_u}$，変動係数$\mathrm{COV}_{q_u}$，自己相関距離$\theta$，及び正規乱数行列Xから，コレスキー分解を用いた mid-point 法により各要素の一軸圧縮強さを計算した．

**表-5**　B777-9 機材の荷重諸元

| 機材 | 総質量 (t) | 脚荷重/輪荷重 (kN) | 接地圧 (N/mm$^2$) | 接地幅 (cm) |
|---|---|---|---|---|
| B777-9 | 352.4 | 1630/272 | 1.58 | 34.4 |

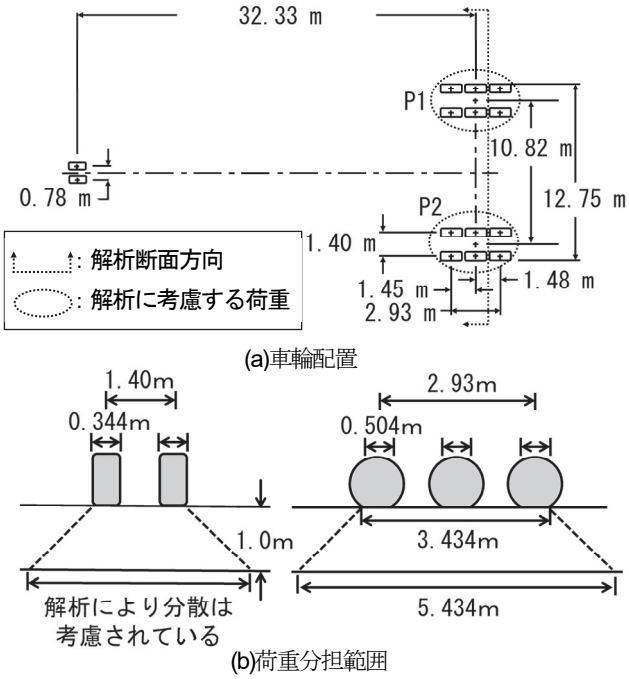



**図-13**　B777-9 機材の車輪配置と解析に考慮する荷重

**表-6**　航空機荷重の設定結果

| 機材 | | B777-9 |
|---|---|---|
| 接地圧 | | 1.58(N/mm$^2$) |
| 接地幅 | | 344(mm) |
| 接地長 | | 500(mm) |
| 車輪 1 輪当りの荷重 $P_0$ | | $P_0$=1.58×344×500÷1000≒272(kN) |
| 航空機荷重(衝撃荷重考慮)※30%割り増し | $P_1$ | $P_1$=6×$P_0$/(1.400+0.344)/(2.930+0.504+1.000×2)×1.3≒224(kN/m$^2$)<br>※解析モデル上の載荷幅：1.744m |
| | $P_2$ | =$P_1$ |

**表-7**　解析定数の一覧

| 層名 | 土質 | 単位体積重量 湿潤 $\gamma_t$ (kN/m$^3$) | 単位体積重量 飽和 $\gamma_{sat}$ (kN/m$^3$) | $N$値 | 弾性係数 $E_{50}$ (kN/m$^2$) | せん断強度 $c$ (kN/m$^2$) | せん断強度 $\varphi$ (°) | ポアソン比 $\nu$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 非液状化層[1] | 砂質土 | 18.9 | 19.4 | 11 | 30,500 | 8.3 | 37.7 | 0.33 |
| 非液状化層[2] | 粘性土 | 16.5 | 16.6 | 3 | 9,500 | 18.5 | 18.4 | 0.33 |
| 改良範囲 | 砂質土 | 18.2 | 19.0 | - | 23,100 | ケース毎に設定 | 0.0 | 0.33 |
| 液状化層 | 砂質土 | 18.2 | 19.0 | 8 | 21,000 | 0.0 | 0.0 | 0.33 |
| 非液状化層[3] | 粘性土 | 17.8 | 17.8 | 6 | 17,640 | 31.1 | 16.0 | 0.33 |

**図-14** に，浸透固化処理された地盤の一軸圧縮強さ$q_u$を示す．また，**図-15** に，計算結果の一例を示す．ランダム場理論では異なる正規乱数行列Xを使用して，強度の空間分布が異なる地盤を何ケースも作成することができる．なお，本論文における支持力解析は，地震中の動的な荷重が作用している状況ではなく，地震後に過剰間隙水圧が蓄積している時点を想定し性能照査を実施した．これは，空港に求められる要求性能に従い，発災後 3 日以内において緊急物資・人員等輸送受入が行われる状況を想定したためである．さらに本解析では，安全側の評価を行うため，設計基準強度を満たさない要素については，地震時に液状化が発生し過剰間隙水圧比が 1.0 となった状態が継続しているものとして取り扱い，その要素についてはせん断強度をゼロとした．そのため，支持力解析時の地盤の一軸圧縮強さ$q_u$の分布は，**図-16** に示すような分布とした．

上記の浸透固化処理地盤による改良範囲におけるせん断強度のばらつきの評価手法を用い，適合率や変動係数を数種類変化させた支持力解析を行うことで，一軸圧縮強さ$q_u$のばらつき毎に支持力安全度と適合率の関係を求めた．ここで，支持力安全度とは，地盤の抵抗（耐力）に基づく極限支持力と航空機荷重の作用により生じる応答値との比（耐力作用比）[27]である．この比が 1.0 以上であることを確認することによって，航空機荷重に対する地盤支持力を評価するものである．支持力安全度を求める際の耐力である極限支持力は，信頼性下限値を用いた．そのため，支持力安全度が 1.0 以上であっても，全てのケースにおいて支持力安全度が満足されるものではない．つまり，少なからず破壊確率が含まれていることに留意する必要がある．

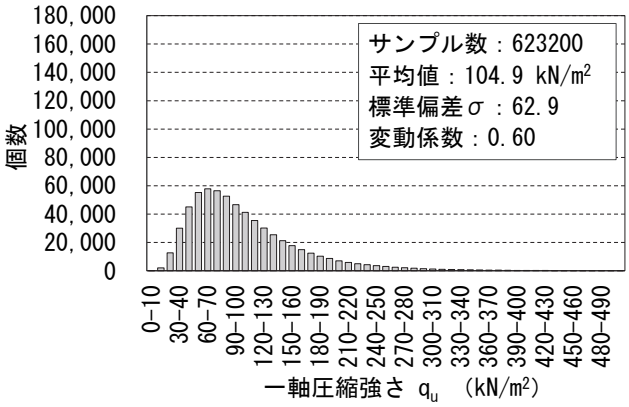



**図-14** ランダム場理論による一軸圧縮強さの分布

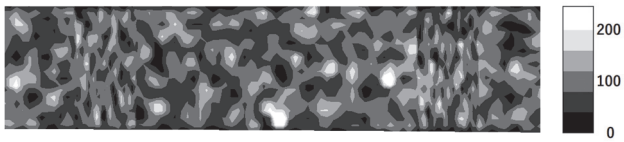



**図-15** 各要素の一軸圧縮強さの計算結果例

解析を行った適合率は，**表-8** に示す 9 ケースである．**表-4** に示したように，各ブロックで調査した一軸圧縮強さの変動係数は 0.46～0.85 程度であった．このことを踏まえ，**表-8** に示す各適合率に対して，変動係数を 0.2～1.0 の幅を持たせ，数パターン変化させて解析を行った．なお，一軸圧縮強さのばらつきが対数正規分布に適合するなら，適合率と変動係数が決まれば一軸圧縮強さの平均値は一義的に決定されることとなる．

**表-8** 解析ケースの一覧

| Case | | 適合率(%) | 変動係数 | 平均強度(kN/m²) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | 100.0 | - | 60.0 |
| 2 | a | 90.0 | 0.2 | 73.9 |
| | b | 90.0 | 0.4 | 101.3 |
| | c | 90.0 | 0.6 | 136.1 |
| | d | 90.0 | 0.8 | 186.1 |
| | e | 90.0 | 1.0 | 237.3 |
| 3 | a | 76.7 | 0.2 | 58.9 |
| | b | 76.7 | 0.4 | 74.5 |
| | c | 76.7 | 0.6 | 94.4 |
| | d | 76.7 | 0.8 | 118.7 |
| | e | 76.7 | 1.0 | 148.6 |
| 4 | a | 72.0 | 0.2 | 68.4 |
| | b | 72.0 | 1.0 | 140.0 |
| 5 | a | 68.0 | 0.2 | 49.0 |
| | b | 68.0 | 0.4 | 62.0 |
| | c | 68.0 | 0.6 | 76.5 |
| | d | 68.0 | 0.8 | 91.5 |
| | e | 68.0 | 1.0 | 112.3 |
| 6 | a | 61.4 | 0.2 | 43.2 |
| | b | 61.4 | 0.4 | 55.7 |
| | c | 61.4 | 0.6 | 65.8 |
| | d | 61.4 | 0.8 | 76.9 |
| | e | 61.4 | 1.0 | 95.1 |
| 7 | | 48.9 | 0.6 | 48.3 |
| 8 | | 38.3 | 0.6 | 35.7 |
| 9 | | 29.0 | 0.6 | 25.8 |

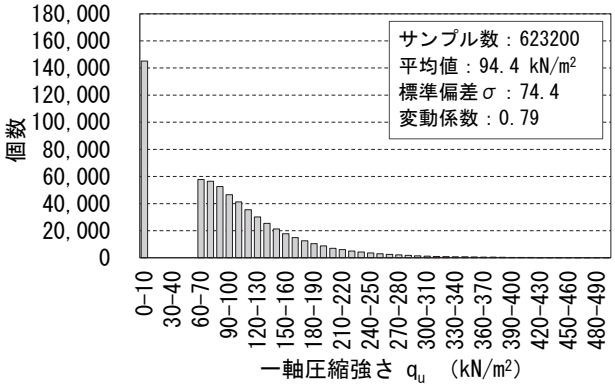



**図-16** 支持力解析時の一軸圧縮強さの分布

### (3) 支持力計算の検証解析

本論文では，支持力解析に用いるプログラムコードを，FEM を用いたせん断強度低減法である「SSR-FEM」とした．そこで，はじめに，SSR-FEM の計算精度が確保されていることを確認するための検証解析を行った．検証解析では，改良範囲のせん断強度を一律に粘着力$c = 100$(kN/m$^2$)と仮定し，プラントルの理論解における極限支持力相当の載荷重に対する支持力安全度を求めた．ここで求めた支持力安全度は，理論上 1.0 となるはずであるため，この検証解析における支持力安全度の結果が 1.0 付近となれば計算精度が確保できていると評価するものとした．**図-17** に，検証解析の解析モデル図を示す．改良範囲のせん断強度を一律に粘着力$c = 100$(kN/m$^2$)と仮定した場合，プラントルの理論解における極限支持力は，下式となる．

$$q_u = c \cdot N_c = 514(\mathrm{kN/m^2}) \tag{2}$$

ここに，φ=0°の時，粘着力に関する支持力係数$N_c = 5.14$である．そのため，検証解析では載荷重をプラントルの理論解における極限支持力相当の 514(kN/m$^2$)とした．その結果，得られた支持力安全度は概ね 1.0 となることが確認され，本検討で用いる解析コードは計算精度を確保できていると評価した．なお，**図-18** に検証解析における最大せん断ひずみ分布を示す．**図-18** に示すように，載荷重周辺に最大せん断ひずみが拡がっていることが分かる．

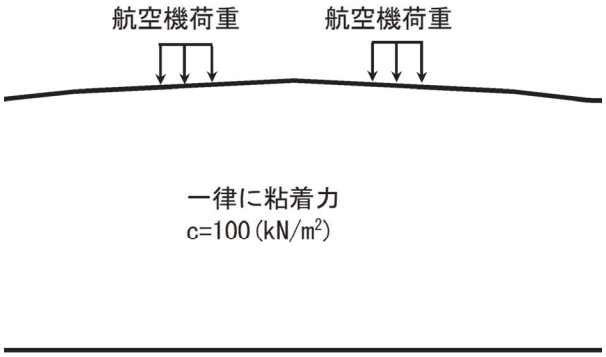



**図-17** SSR-FEM による支持力解析の検証モデル図

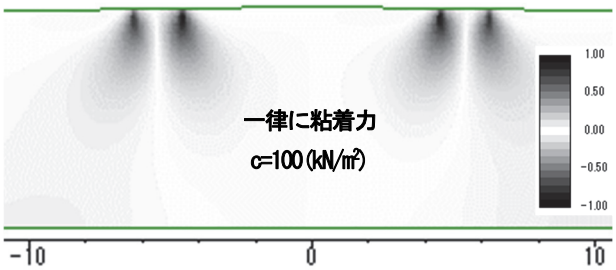



**図-18** 検証解析による最大せん断ひずみ分布図

## 5. せん断強度の空間的不均質性を考慮した支持力特性

本章では，4 章で示した支持力解析手法に基づき，せん断強度（改良後地盤では一軸圧縮強さ$q_u$）のばらつきや適合率毎に支持力安全度を求めた．

### (1) 支持力解析に必要な計算回数

支持力解析に必要な繰り返し計算の回数を求めるため，支持力安全度と計算回数の関係を整理し，解析結果が収束する計算回数の確認を行った．一例として，**図-19** に適合率 76.7%，変動係数 0.2～1.0 のケースである Case3 の支持力安全度と計算回数との関係を示す．また，**図-20** にその際の支持力安全度の変動係数と計算回数の関係を示す．これらの結果より，支持力安全度および耐力の変動係数は，計算回数が 70～80 回程度以上あれば概ね収束している．そのため，本論文では安全側に配慮し支持力解析の繰り返し計算回数を 100 回とした．この結果，計算回数 10 回の場合でも各変動係数ケースの支持力安全度のばらつきは，大きくない結果となった．これは，せん断強度をばらつかせた改良範囲が，GL-2m 以深と比較的深いことにより支持力安全度のばらつきへの影響が小さかったものと推察される．なお，これは忽那ら(2007)[28]等の先行研究でみられた結果と同様の傾向であった．

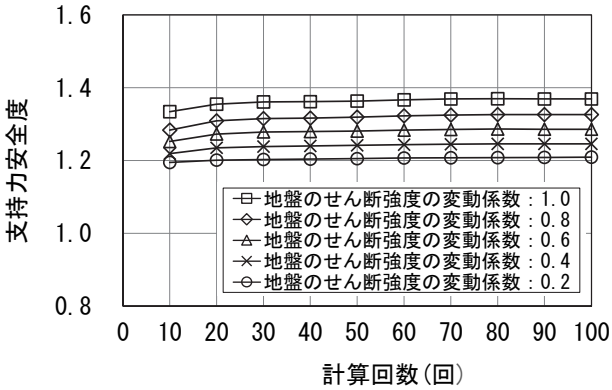



**図-19** 支持力安全度と計算回数の関係

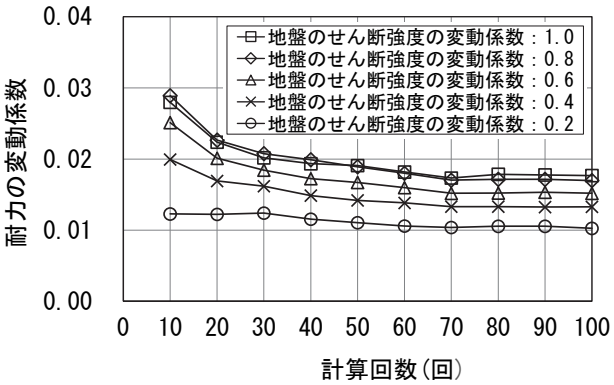



**図-20** 支持力安全度の変動係数と計算回数の関係

### (2) 地震後の航空機荷重に対する支持力照査

はじめに，浸透固化処理地盤による改良範囲内でせん断強度のばらつきが無く，全要素の一軸圧縮強さが設計基準強度（$q_{uck} = 60\mathrm{kN/m^2}$）を満足するように一律 $q_u = 60\mathrm{kN/m^2}$ とした，つまり適合率 100%とする Case1 の結果について示す．Case1 では，せん断強度をばらつかせていないため，計算回数によらず，支持力安全度は一律 1.40 となった．**図-21** に，Case1（適合率 100%）の最大せん断ひずみ分布図を示す．この結果より，対象とする航空機荷重により最大せん断ひずみが改良範囲まで及ぶものの，改良範囲内で収まる結果となった．

次に，浸透固化処理地盤による改良範囲内でせん断強度をばらつかせた結果の一例として，適合率を 76.7%とした Case3 について示す．**表-4** に示したように，各ブロックで調査した一軸圧縮強さの変動係数は 0.46～0.85 程度であった．このことを踏まえ，本解析においても変動係数に幅を持たせた解析ケースの設定を行った．Case3 では，変動係数を 0.2～1.0 の間で 0.2 刻みで変化させた，計 5 ケースについて解析を行った．各ケースについて，ランダム場理論を用いて一軸圧縮強さの空間分布が異なる地盤を 100 通り作成し，それぞれの地盤状況に対して支持力計算を行った．ここでは，変動係数を 0.2 とした Case3a と，1.0 とした Case3e の結果について示す．

**図-22** に，Case3a（適合率 76.7%，変動係数 0.2）及び Case3e（適合率 76.7%，変動係数 1.0）で設定したランダム場理論による一軸圧縮強さの分布図を示す．**図-22** 中の黒着色部は，設計基準強度に満たない要素（せん断強度ゼロの要素）を示している．**図-23** に Case3a 及び Case3e の支持力解析で入力した一軸圧縮強さの頻度分布図を示す．Case3 の適合率は 76.7%であるため，設計基準強度に満たない要素の割合は，改良範囲の全要素に対して 23.3%となる．

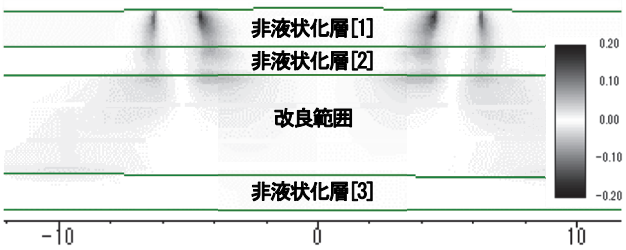
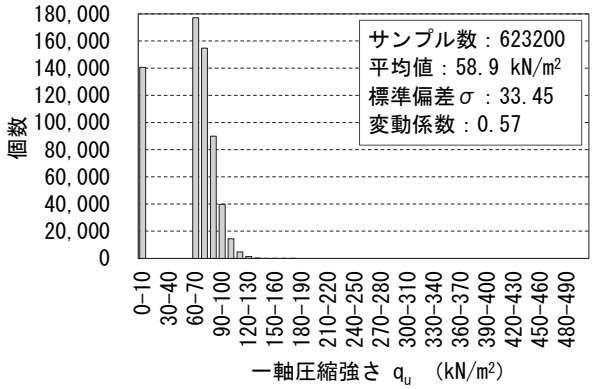
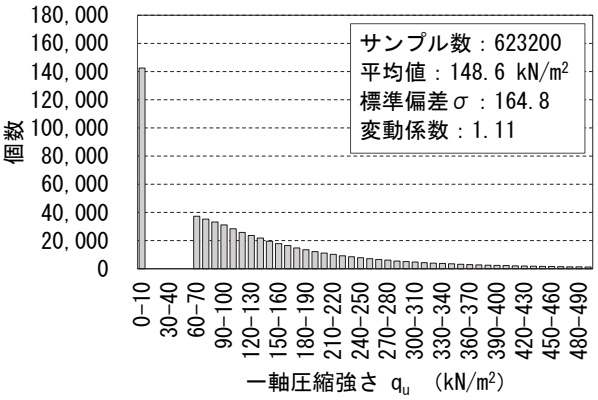



**図-21** Case1（適合率 100%）の最大せん断ひずみ分布

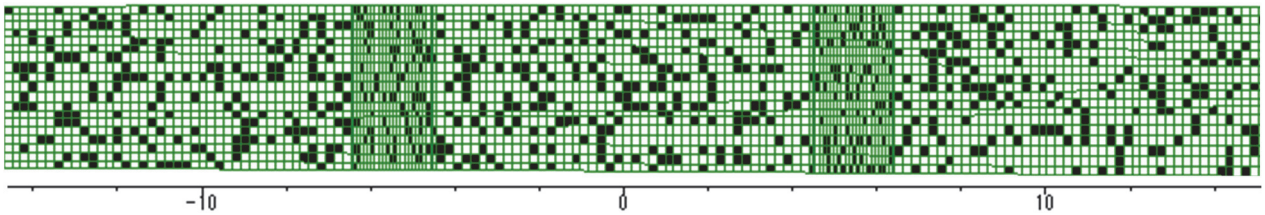



(a) Case3a（適合率 76.7%，変動係数 0.2）

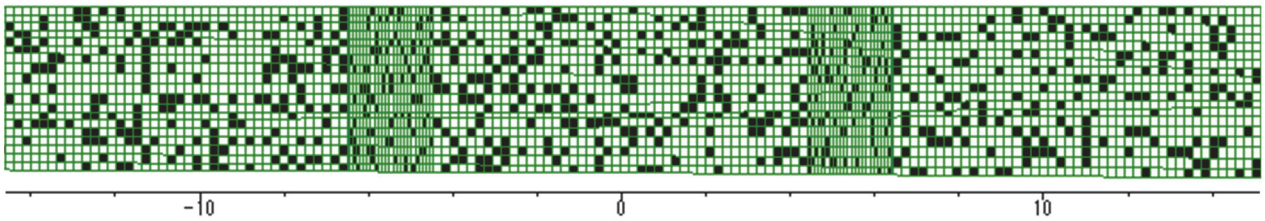



(b) Case3e（適合率 76.7%，変動係数 1.0）

**図-23** ランダムケース（Case3）の支持力解析時の一軸圧縮強さの分布例




(a) Case3a（適合率 76.7%，変動係数 0.2）




(b) Case3e（適合率 76.7%，変動係数 1.0）

**図-22** ランダム場理論による一軸圧縮強さの分布図

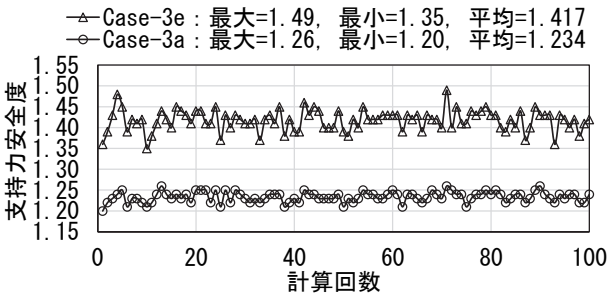



図-24　ランダムケース（Case3）の支持力安全度と繰り返し計算回数の関係例

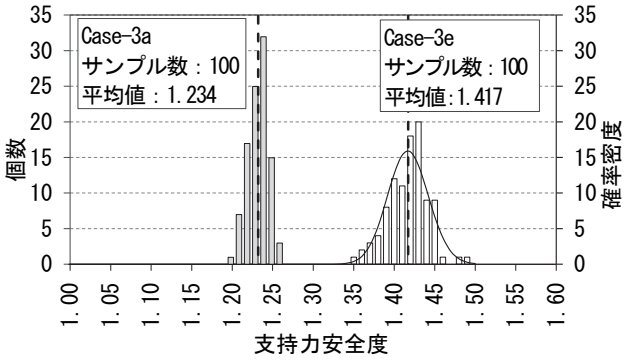
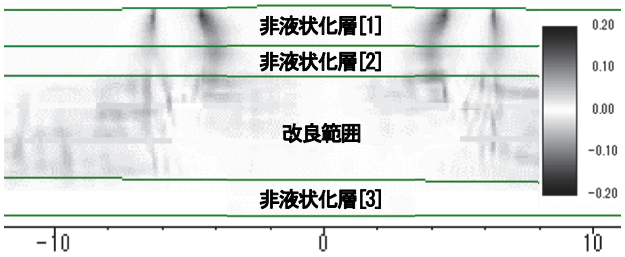



図-25　ランダムケース（Case3）の支持力安全度の頻度分布例

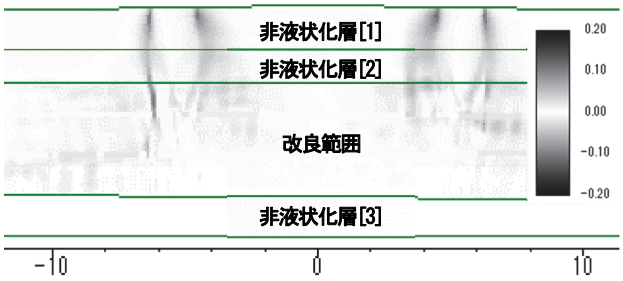
図-24 に，Case3a 及び Case3e における支持力安全度と繰り返し計算回数の関係を示す．また，図-25 に，支持力安全度の頻度分布を示す．Case3a の支持力安全度は，1.20～1.26 の間でばらつき，平均値は 1.23 となった．変動係数を 1.0 とした Case3e の支持力安全度は，1.35～1.49 の間でばらつき，当然のことながら変動係数 0.2 の場合と比べて安全度の変動幅が大きくなる．また，平均値は 1.42 となり，変動係数を 0.2 とした Case3a に比べて支持力安全度の平均値は大きくなる．これは，一軸圧縮強さが対数正規分布に適合していると仮定するならば，ばらつきが大きい Case3e（変動係数 1.0）の平均強度を小さくしなければ，ばらつきの小さな Case3a（変動係数 0.2）と同じ平均強度にならないからである．

図-26 に，Case3a 及び Case3e の最大せん断ひずみ分布を示す．改良範囲内のせん断強度をばらつかせた Case3 では，せん断強度をばらつかせない適合率 100%の Case1(図-21)に比べて，最大せん断ひずみが改良範囲のより深部まで及ぶ結果となった．ただし，Case3a と Case3e では，最大せん断ひずみ分布に大きな違いは見られなかった．

図-27 に，Case3a 及び Case3e の変形図を示す．なお，図-27 の変形スケールは，改良範囲内の変形を見易くするため，構造物スケールの 20 倍で表示している．両ケースともに航空機荷重載荷範囲の周辺で沈下量が発生しており，改良範囲まで変形が及んでいることがわかる．ただし，Case3a と Case3e では，最大せん断ひずみ分布の結果と同様に，変形モードに大きな違いは見られなかった．

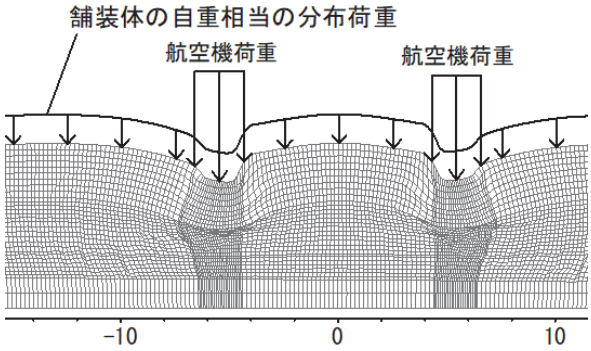



(a) Case3a（適合率 76.7%，変動係数 0.2）

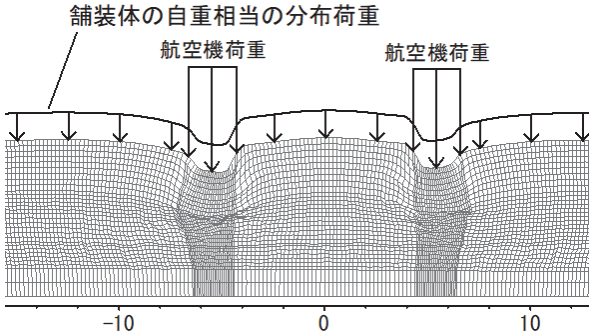



(b) Case3e（適合率 76.7%，変動係数 1.0）

図-26　ランダムケース（Case3）の最大せん断ひずみ分布例




(a) Case3a（適合率 76.7%，変動係数 0.2）

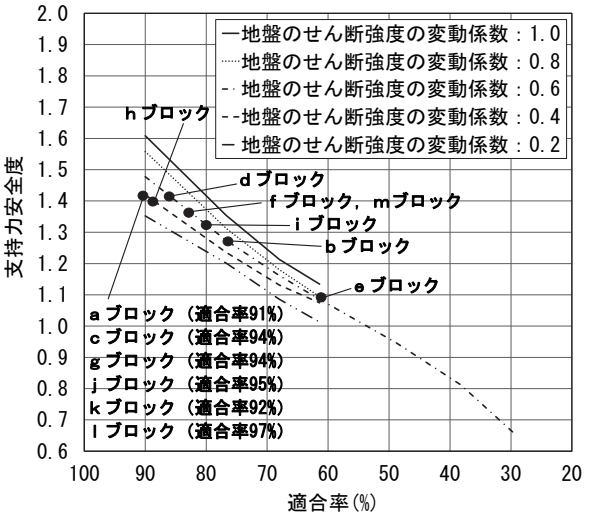



(b) Case3e（適合率 76.7%，変動係数 1.0）

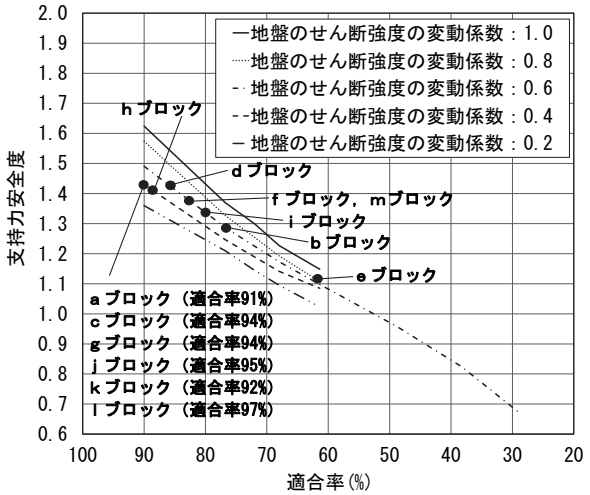
図-27　ランダムケース（Case3）の変形図

## 6. 性能規定に基づく支持力評価法

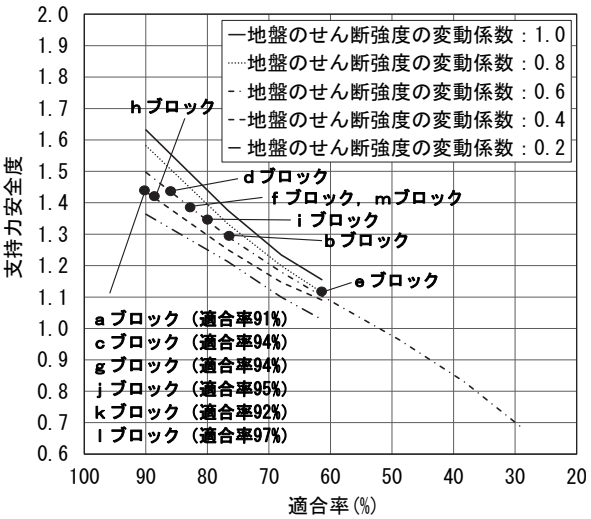
3 章に示したように，各ブロックで調査した一軸圧縮強さの適合率は，62～97%程度，変動係数は 0.46～0.85 程度であった．このことを踏まえ，4 章では，適合率 9 ケースについて，変動係数を 0.2～1.0 の間で支持力解析を行った．その結果より，一軸圧縮強さ$q_u$のばらつき毎に支持力安全度と適合率の関係を求めた．




(a) 極限支持力の信頼性下限値 99%ケース




(b) 極限支持力の信頼性下限値 95%ケース




(c) 極限支持力の信頼性下限値 90%ケース

**図-28** 支持力安全度と適合率の関係

**図-28** に，支持力安全度と適合率の関係を示す．耐力である極限支持力を信頼性下限値 99%，95%，90%とする各 3 ケースについて示した．**図-28** 中には，想定される地盤のせん断強度の変動係数の範囲（$COV$=0.2，0.4，0.6，0.8，1.0）のそれぞれに対する支持力安全度の結果を示している．**図-28** 中の黒プロットは，各ブロックの事後調査で得られた一軸圧縮強さの適合率と変動係数を基にプロットしたものである．ただし，**図-28** 中の支持力安全度と適合率の関係は，変動係数 0.2～1.0 の間で 0.2 刻みで得られているが，実測値の黒プロットがその間の値となる場合には，安全側の値となるようにオンライン上にプロットしている．この結果，全ブロックについて，支持力安全度は 1.0 より大きくなった．また，極限支持力の信頼性下限値を 90%から 99%にするほど支持力安全度は小さくなり，安全側の評価となった．

**図-28(b)**より，同じ適合率のケースを比較すると，ばらつき（変動係数）が大きくなるほど支持力安全度が大きくなる傾向となる．これは，**図-29** に示すように，適合率が同じケースを比較すると，一軸圧縮強さのばらつき（変動係数）が大きくなるほど一軸圧縮強さの平均値が大きくなるためと考えられる．また，変動係数が 0.6 のケースに着目すると，適合率の低下に伴い支持力安全度は小さくなり，適合率が 30%程度の時には，支持力安全度は 0.7 程度となる．なお，適合率が概ね 60%より大きければ，いずれの地盤のばらつき（$COV$=0.2～1.0）を考慮しても支持力安全度は 1.0 以上を満足することが確認された．

以上のことから，**図-28** で示す結果を用いることで，詳細な支持力解析を実施しなくても，改良後の地盤の一軸圧縮強さの適合率とばらつきを把握することで，液状化対策を目的に浸透固化処理された地盤の支持力が許容値を満足しているか否かを簡易に判断することが可能となる．

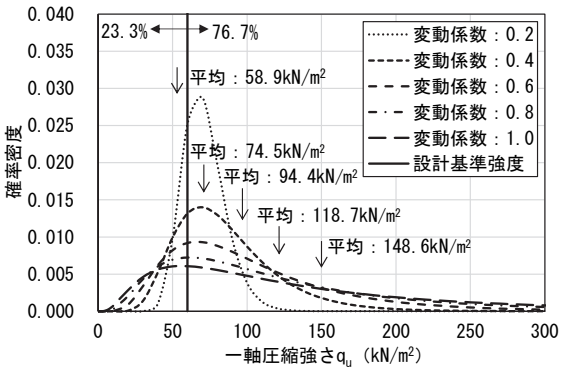



**図-29** Case3（適合率 76.7%，変動係数 0.2～1.0）のケースにおける一軸圧縮強さの対数正規分布

## 7. 結論

本論文では，浸透固化処理工法が実施された地盤を対象にせん断強度のばらつきを前提とした性能規定による地盤の支持力評価を行うことを目的として，統計的手法により強度の不均質性を考慮した支持力解析手法について検討した．検討の結果，以下のことが明らかとなった．

1)浸透固化処理工法が実施された地盤は，改良前の原地盤の土質等の不均質性などに起因してせん断強度にばらつきを有しており，一軸圧縮強さの実測値の分布は対数正規分布に適合する．

2)同一層，同一改良仕様の浸透固化処理地盤における改良強度の自己相関距離は，鉛直方向で 0.2～0.3m, 水平方向で 2m 程度となり，非常にランダム性の高い地盤となる．

3)せん断強度にばらつきのある浸透固化処理地盤では，同じ適合率で比較した場合，変動係数が 0.2 から 1.0 まで増加すると，支持力安全度の平均値が 15%程度大きくなる．

4)支持力安全度と適合率の関係を求めたところ，極限支持力の信頼性下限値が大きいほど支持力安全度が小さくなり，安全側の評価となる．また，同じ適合率のケースではばらつき（変動係数）が大きいほど支持力安全度が大きくなり，適合率が概ね 60%以上であれば，変動係数に関わらず支持力安全度が 1.0 を超える．

5)浸透固化処理地盤の一軸圧縮強さの平均値と適合率から，性能規定に基づいて支持力照査が可能となるチャート図を提案した．これにより，詳細な支持力解析を実施しなくても適合率とばらつきから地盤の支持力が許容値を満足するかを簡易に判定可能となる．

なお，本論文の結果は，A 空港の浸透固化処理地盤に対して実施したものであり，他現場に適用する際には地盤状況や改良範囲等，比較したうえで適用可否を検討する必要がある．本論文では航空機荷重につき想定される最大の機材を想定し，一定の荷重として取り扱っているが，一般的には航空機荷重にもばらつきがあることから，これを考慮した支持力解析手法の検討が今後の課題である．

また，地震発生時の土木施設の使用可否を判定するためには，地震に伴う地盤の変形量を把握することが重要であり，今後，地盤の強度のばらつきを考慮した地震時の変形量の照査について，更に検討を進めていく必要がある．

**謝辞**：浸透固化処理地盤の地盤定数等の実データについては，施工者である東亜建設工業株式会社から使用の許諾を頂いた．記して謝意を表します．

### 参考文献

1) 公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp. 786-787, 2018.5.
2) 笠間清伸，善功企，陳光斉：液状化対策した固化処理地盤の強度増加と不良率，自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集，No. 32, pp. 21-24, 2008.
3) 財団法人土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル，pp. 259, 1999.
4) 財団法人沿岸技術研究センター：沿岸技術ライブラリーNo. 29 海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル（改訂版），pp. 38-39, 2018.
5) 土田孝，小野憲治：数値シミュレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用，港湾技術研究所報告，Vol. 27, No. 4, pp. 123-200, 1988.
6) 宮田正史，井合進，一井康二：液状化による不同沈下の予測手法の開発，港湾空港技術研究所資料，No. 908, pp. 1-24, 1998.
7) 大竹雄，本城勇介：応答曲面を用いた実用的な地盤構造物の信頼性設計法：液状化地盤上水路の耐震設計への適用，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 68, No. 1, pp. 68-83, 2012.
8) Box, G. E. P. and Draper, N. R.: *Empirical Model Building with Response Surface*, John Wiley, 1987.
9) Griffiths, D. V. and Fenton, G. A.: Bearing capacity of spatially random soil: The undrained clay Prandtl problem revisited, *Geotechnique*, Vol. 51 (4), pp. 351-359, 2001.
10) Griffiths, D. V., Fenton, G. A. and Manoharan, N.: Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive soil: probabilistic study, *J. Geotech. Eng., ASCE*, Vol. 128(9), pp. 743-755, 2002.
11) Popescu, R., Deodatis, G. and Nobahar, A.: Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 20, pp. 324-341, 2005.
12) 忽那惇，善功企，陳光斉，笠間清伸：局所的液状化を考慮した砂地盤の支持力解析，第 8 回地盤改良シンポジウム論文集，pp. 237-240, 2008.
13) 笠間清伸，善功企，陳光斉：確率数値極限解析を用いた固化処理地盤の地震時支持力特性，第 9 回地盤改良シンポジウム論文集，pp. 345-350, 2010.
14) Lyamin, A. V. and Sloan, S. W.: Lower bound limit analysis using non-linear programming, *Intl. Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 55 (5), pp. 573-611, 2002.
15) Sloan, S. W. and Kleeman, P. W.: Upper bound limit analysis using discontinuous velocity fields, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 127, pp. 293-314, 1995.
16) Matthies, H. G., Brenner, C. E., Bucher, C. G. and Guedes Soares, C.: Uncertainties in probabilistic numerical analysis of structures and solids - Stochastic finite elements, *Structural Safety*, Vol. 19 (3), pp. 283-336, 1997.
17) 笠間清伸，善功企，Whittle, A. J.: 確率数値限界解析を用いた粘性土地盤の支持力特性，応用力学論文集，Vol. 11, pp. 291-298, 2008.
18) Baecher, G. B. and Christian, J. T.: *Reliability and Statistics in Geotechinical Engineering*, John Wiley & Sons: NY, 2003.
19) 国土交通省航空局：平成 18 年度地震に強い空港のあ

り方検討委員会報告，2007.4.
20) 国土交通省航空局：空港土木施設設計要領及び設計例（耐震設計編），2019.4.
21) 一般財団法人沿岸技術研究センター：沿岸技術ライブラリーNo. 55 浸透固化処理工法技術マニュアル（改訂版），pp. 143, 2020.
22) 一般財団法人沿岸技術研究センター：沿岸技術ライブラリーNo. 55 浸透固化処理工法技術マニュアル（改訂版），pp. 111-112, 2020.
23) Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. and Lewis, R. W.: Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics, *Geotechnique*, Vol. 25, No. 4, pp. 671-689, 1975.
24) 小林正樹：有限要素法による地盤の安定解析，港湾技術研究所報告，Vol. 23, No. 1, pp. 83-101, 1984.
25) 国土交通省航空局：空港土木施設設計要領及び設計例（構造設計編），p. 11, 2019.4.
26) 一般財団法人沿岸技術研究センター：沿岸技術ライブラリーNo. 55 浸透固化処理工法技術マニュアル（改訂版），p. 100, 2020.
27) 公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p. 27, 2018.5.
28) 忽那惇，善功企，陳光斉，笠間清伸：数値極限解析を用いた液状化の局所性を考慮した地盤の支持力特性，土木学会地震工学論文集，pp. 331-335, 2007.

**(Received September 2, 2021)**
**(Accepted January 25, 2022)**

# PERFORMANCE-BASED EVALUATION FOR THE BEARING CAPACITY OF GROUND IMPROVED BY PERMEATION GROUTING METHOD

Kiyonobu KASAMA, Tatsuya NAGAYAMA, Nobuhiko HAMAGUCHI, Yoshihisa SUGIMURA, Teruhisa FUJII, Tomoyuki KANEKO and Koki ZEN

T here is a ground improvement technology called the permeation grouting method, which is used as a liquefaction countermeasure for sandy ground. The ground improved by the permeation grouting method, has a large spatial variability in material property such as shear strength compared to natural soil deposits. The spatial variability in the shear strength of the improved ground is anticipated to affect the bearing capacity. Therefore, a bearing capacity evaluation based on the performance specification is required considering the spatial variability of the ground. In this paper, a random field theory is used to represent the spatial variability of shear strength of the improved ground, and a bearing capacity analysis is conducted by Monte Carlo simulation using the finite element method and the shear strength reduction method. The effect of spatial variability of the improved ground on the reliability of bearing capacity, failure mechanism and bearing capacity is discussed stochastically and statistically.