

# 締固め工法により液状化対策した地盤の性能規定型 耐震性能照査法に関する研究

金子, 智之

<https://hdl.handle.net/2324/7396310>

---

出版情報 : Kyushu University, 2025, 博士 (工学), 論文博士  
バージョン :  
権利関係 :



氏 名 : 金子 智之

論文名 : 締固め工法により液状化対策した地盤の性能規定型耐震性能照査法に関する研究

区 分 : 乙

## 論文内容の要旨

本論文では、砂質地盤の液状化対策の中で、密度増大工法に分類される締固め工法を対象とした。この締固め工法は、砂質地盤を締固める原理であるため、その液状化対策効果としては密度増加だけでなく地盤内水平方向の有効応力増加（水平土圧係数  $K$  値の増加）もあり、それにより液状化抵抗が大きくなることが知られている。そのため、 $K$  値の増加による効果を設計に取り入れた、より合理的かつ経済的な設計が課題となる。また、もう一つの課題として、締固め工法により液状化対策された地盤では、対象となる地盤の土質、締固めの不均質性等から、液状化対策後の地盤においてせん断強度や液状化強度等に大きなばらつきがある。そのため、空港施設などのように液状化対策範囲の大きい施工現場では、液状化対策後に数本のチェックボーリングが実施されることがあるが、チェックボーリング毎に  $N$  値が異なり、場合によっては目標  $N$  値を下回る深度を含む地点が生じることがある。そのような地点を考慮した上で、液状化対策ブロックの地盤全体として要求性能を満足するかどうかの液状化対策の有効性の照査手法の確立が課題となる。一つ目の課題に対して、締固め工法により滑走路直下を液状化対策した地盤を対象に、支持力及び変形解析において、より実地盤挙動に即した液状化対策地盤モデルを構築することを目的として、 $K$  値増加の効果を取り入れた数値解析手法を提案した。また、二つ目の課題に対して、地盤の不均質性に起因して部分的に目標  $N$  値に達していない締固め工法により液状化対策した地盤に対して、有限要素法を用いたモンテカルロシミュレーションにより液状化対策の不均質性を考慮した支持力及び変形解析を行った。その結果に基づき、大規模地震時において空港に求められる性能である、航空機荷重に対する地盤の支持力や滑走路表面の変形（勾配）の照査手法を提案した。

第 1 章では、はじめに本研究の背景と目的について述べるとともに、本研究の流れや本論文の構成について示した。

第 2 章では、締固め工法に関する既往研究を示すとともに、それに基づく締固め工法の原理と分類、締固め工法による改良効果、締固め工法の設計法、地盤の均質性を仮定した液状化対策地盤と不均質を考慮した液状化対策地盤のそれぞれに対する地震後の変形解析手法について示した。これにより、本研究で解決すべき課題を明らかにした。

第 3 章では、SCP 工法及び CPG 工法の既存の施工現場における液状化対策前後の土質調査結果に基づき、改良後  $N$  値と  $K$  値に着目して改良効果の分析を行った。これにより、締固め工法の設計や耐震性能の照査において、 $K$  値の増加による効果も反映させてよいことや、液状化対策隣接域における改良効果を取り入れた地震時の変形解析の必要性を明らかにした。

第 4 章では、締固め工法により液状化対策した地盤を対象に、地震後における滑走路や誘導路の変形量を照査する際の変形解析において、締固め工法による  $K$  値の増加を再現できる解析手法を構

築することを目的とした。そのため、東京国際空港における CPG 工法の試験施工を対象として、密度増加と  $K$  値増加のそれぞれの効果を取り入れた解析法について検討した。締固め工法の施工では、砂杭や低流動性材料等を地盤内に強制的に押し上げることで杭中間  $N$  値が上昇する。この施工過程および  $N$  値の増加を再現するため、有限要素法で分割された解析メッシュにおいて、CPG 工法を模擬した改良杭の要素の節点に「横方向強制変位を与える方法」により検討を行った。その結果、解析による  $K$  値の深度分布は実測  $K$  値（0.8 程度）と整合しており、妥当な  $K$  値分布を得ることを確認した。また、既往研究の「横方向荷重を与える方法」で見られた解析結果の  $K$  値分布のばらつきや、未改良地盤の  $K$  値も増加するという不自然な挙動は改善され、均一に  $K$  値の上昇が見られる結果となった。この結果や CPG 工法の注入管理による施工方法を踏まえると、「横方向強制変位を与える方法」が解析モデル化方法として適していることを明らかにした。

第 5 章では、締固め工法により液状化対策した地盤における不均質性を評価するため、締固め工法（CPG 工法）により液状化対策した 3 空港（A 空港、B 空港、C 空港）における液状化対策後の地盤調査結果による  $N$  値、細粒分含有率、塑性指数、及び有効土被り圧について整理した。その結果に基づき、港湾の液状化予測・判定法に基づく液状化安全率  $F_L$  を算出した上で、その分布状況を評価した。整理した  $F_L$  の分布は、3 空港ともにカイ二乗適合検定により対数正規分布に適合するとともに、 $F_L$  の平均値は 1.4~1.6、変動係数は 0.36~0.50 となり、概ね同程度の分布となった。また、 $F_L$  について、鉛直方向及び水平方向それぞれの自己相関係数を整理した上で自己相関距離を求めることにより、空間的な自己相関性を評価した結果、3 空港ともに、 $F_L$  の自己相関距離は、鉛直方向 1~2m 程度、水平方向 10~15m 程度となることを明らかにした。

第 6 章では、部分的に目標  $N$  値に達していない深度が存在する締固め工法により液状化対策した地盤に対して、性能規定型の支持力及び変形照査手法を確立することを目的とした。そのため、第 5 章で整理した A 空港、B 空港及び C 空港の滑走路における代表的な液状化対策地盤をモデル化し、 $F_L$  分布をランダム場理論で表現した。その結果に基づく有限要素法を用いたモンテカルロシミュレーションにより、液状化対策した地盤の不均質性を考慮した支持力及び変形解析を行った上で、A 空港を例として具体的な照査の手順を示した。支持力照査の結果、例えば極限支持力を 95%信頼性下限値とすると、その支持力安全率  $F_s$  は、正規分布を仮定した場合には 1.2、対数正規分布を仮定した場合には 1.5 となり、地盤全体として地震後に必要となる支持力性能を満足することを明らかにした。また、変形（勾配）照査の結果、地表面変化勾配の最大値は 0.8% となり勾配の設計限界値が 1.5% の場合には、滑走路の性能を満足することを明らかにした。なお、滑走路の勾配の分母となる区間距離には特に定められたものが無いため、施設管理者が施設毎に事前に決めておく必要があることに留意する必要があることを示した。以上により、大規模地震時において空港に求められる性能である、航空機荷重に対する地盤の支持力や滑走路表面の変形（勾配）の照査手法を提案することができた。

第 7 章では、本研究で得られた成果を総括し展望をまとめた。