

学 位 論 文 題 名

信頼性設計のためのCPTによる地盤の統計的性質に
関する研究

学位論文内容の要旨

WTO(世界貿易機構)によるTBT協定を受けて、我が国の社会基盤施設の設計法は、従来の仕様設計から性能規定へ移行している。このような状況下で、各関係学会等により性能設計に関する委員会や基準が設立・施行され、地盤工学会においても2006年3月に地盤工学会基準として、性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則が設定された。これらの報告書や基準等では、『仕様設計から性能設計に移行することで、新技術・新工法の採用など、設計の自由度が増し、建設コストの縮減につながることが期待される』と性能設計の導入効果が述べられている。

性能規定とは、対象とする構造物への要求性能が満たされているかを照査するための具体的な照査方法を詳細に規定したものである。地震力や風などの外力、あるいはこれに対応する部材の抵抗力などの性能を左右するすべての要因は確率的な現象であるので、性能は確率現象として捉える必要があり、信頼性設計法がこれを可能にする。しかし、信頼性設計法の内容はコンクリート等の人工材料の分野で確立されたため、このままの状態では地盤へ適用すると問題が生じる。すなわち、コンクリートなどの人工材料は厳密な品質管理の下でバラツキをコントロールすることが可能であるが、地盤は長年に渡って土粒子が堆積した自然物であり、その特性を把握する場合にも堆積環境などの自然の摂理を十分に考慮する必要がある。このため、地盤においてはバラツキをコントロールするのではなく、むしろ把握することに重点が置かれる。

現在のところ、地盤の諸定数のバラツキを定量化するためには、これらを確率変数とみなして確率モデルを適用することが有効な手段である。しかしながら、地盤の諸定数のバラツキに関するデータベース化が進んでいない。そこで、本論文では、海外を含む自然地盤を対象とした13か所、さらに埋立段階で得られた圧密途中の地盤で行った静的コーン貫入試験(CPT)から得られたデータに対して統計解析を行い、地盤のバラツキの特性を把握した。

本研究では全6章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本論文の背景について述べるとともに各章の概要について記載した。

第2章では、取り扱ったデータについて述べた。自然地盤の深度方向のばらつきを調べたデータは、海外を含む13か所で得られた。水平方向の地盤のばらつきは、江別市美原の泥炭地盤から得られたデータを解析して求めた。また、埋立過程の地盤特性を対象とした東京国際空港D滑走路建設工事の概要を述べるとともに、その地盤の特性について述べた。

第3章では、残差を求めるためのトレンドの算出方法について検討した。本章では、最小二乗法による曲線及び直線近似によってトレンドを求めた。この結果、トレンドは直線近似とすることが適切であることを示した。

第4章では、直線近似したトレンドと実測値の差を残差 (Residuals) として、その統計的性質、すなわち確率分布形状、深度および水平方向の自己相関性について検討した。残差の標準偏差 σ は、粘性土地盤ではおよそ 0.02MPa、粗粒土では、0.85MPa から 2.5MPa と約 100 倍大きくなった。Pearson Chart を用いて、残差の確率分布の形状を検討した結果、残差の分布は正規分布に、一部の地域の粗粒土地盤（検見川、東扇島、中標津）ではガンマ分布に従うことが分かった。対象とする深さを 0.5m として自己相関係数を算出した場合、相関距離は粘土地盤では 0.1m 前後、粗粒土地盤のそれは 0.2m 前後であった。また、算出した *Scale of fluctuation* δ_z の値は在住の研究報告と同じ傾向が得られた。美原の泥炭地盤を対象として、ボールコーン貫入試験 (BPT) による先端抵抗を用いて深度方向および水平方向に対する統計解析を行った。深度方向の残差の相関性は非常に小さく、相関距離（層全体を対象とした場合）は 0.5m 以下となった。一方、水平方向に対する相関性は大きく 50m を離れても、かなりの相関性があり、在住の研究結果と同様の傾向を確認することができた。

第5章では、羽田 D 滑走路の建設過程で得られたデータを用いて、圧密途上の地盤の圧密特性とその残差の性質について検討した。この調査によって得られた CPT のデータを用いて、サンドコンパクション (SCP) 工法およびサンドドレーン (SD) 工法によって改良された地盤の埋立過程における変化の把握を試みた結果、SD によって改良された地盤は、 Q_t および B_q による方法で求めた間隙水圧の分布はほぼ一致するが、SCP によって改良された護岸部は、両者の値が大きく異なった。これは、SCP によって形成された砂杭の剛性率が原地盤の粘性土より大きいため、埋土の荷重が砂杭に集中し、原地盤には小さな荷重が載荷するためと考えられる。そして、この砂杭に対する応力分担比は従来報告された値より、かなり大きいことが分かった。

各施工段階における CPT から求めた q_{net} に対して最小二乗法でトレンドを算出し、このトレンドからの残差をバラツキとして考えた。残差の標準偏差 σ は施工とともに増大し、埋立の最終施工段階では、原地盤の σ の約 10 倍の値が得られた。第4章と同様に自己相関係数を算出した結果、施工段階が進むと自己相関性が小さくなり、施工段階によっては自己相関係数の関数モデルが変化することが分かった。埋立の過程段階によっては、上部の q_{net} を直線近似表すことができない場合があることがわかった。これは、地盤が未圧密状態の場合に顕著に表れる。このような場合には、土層を複数のトレンドに分けて統計解析を行う方が、より正確に地盤のばらつきを把握することができることが分かった。

CPT による結果と比較するために、関西国際空港第二期事業を文献によるデータを用いて、我が国で通常行われている一軸圧縮試験を用いて同様な検討を行った。CPT で得られた残差の σ と $q_u/2$ によるそれを比較すると、CPT で得られた残差はかなり小さな値になった。このことは、CPT はボーリング孔を必要としないため人為的なバラツキが少ないことを示しており、CPT による施工管理の優位性を示していると考えられる。

第6章では、本論文で得られた知見と今後の展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 田 中 洋 行
副 査 教 授 藤 井 義 明
副 査 准教授 石 川 達 也

学 位 論 文 題 名

信頼性設計のためのCPTによる地盤の統計的性質に 関する研究

WTO(世界貿易機構)によるTBT協定を受けて、我が国の社会基盤施設の設計法は、従来の仕様設計から性能規定へ移行している。このような状況下で、各関係学会等により性能設計に関する委員会や基準が設立・施行され、地盤工学会においても2006年3月に地盤工学会基準として、性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則が設定された。これらの報告書や基準等では、“仕様設計から性能設計に移行することで、新技術・新工法の採用など、設計の自由度が増し、建設コストの縮減につながることが期待される”と性能設計の導入効果が述べられている。

性能規定とは、対象とする構造物への要求性能が満たされているかを照査するための具体的な照査方法を詳細に規定したものである。地震力や風などの外力、あるいはこれに対応する部材の抵抗能力などの性能を左右する全ての要因は確率的な現象であるので、性能は確率現象として捉える必要があり、信頼性設計法がこれを可能にする。しかし、信頼性設計法の内容はコンクリート等の人工材料の分野で確立されたため、このままの状態では地盤へ適用すると問題が生じる。すなわち、コンクリートなどの人工材料は厳密な品質管理の下でバラツキをコントロールすることが可能であるが、地盤は長年に渡って土粒子が堆積した自然物であり、その特性を把握する場合にも堆積環境などの自然の摂理を十分に考慮する必要がある。このため、地盤においてはバラツキをコントロールするのではなく、むしろ把握することに重点が置かれる。

現在のところ、地盤の諸定数のバラツキを定量化するためには、これらを確率変数とみなして確率モデルを適用することが有効な手段である。しかしながら、地盤の諸定数のバラツキに関するデータベース化が進んでいない。そこで、本論文では、海外を含む自然地盤を対象とした13か所、さらに埋立段階で得られた圧密途中の地盤で行った静的コーン貫入試験(CPT)から得られたデータに対して統計解析を行い、地盤のバラツキの特性を把握した。

本研究では全6章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本論文の背景について述べるとともに各章の概要について記載した。

第2章では、取り扱ったデータについて述べた。自然地盤の深度方向のバラツキを調べたデータは、海外を含む13か所で得られた。水平方向の地盤のバラツキは、江別市美原の泥炭地盤から得られたデータを解析して求めた。また、埋立過程の地盤特性を対象とした東京国際空港D滑走路建設工事の概要を述べるとともに、その地盤の特性について述べた。

第3章では、残差を求めるためのトレンドの算出方法について検討した。本章では、最小二乗法による曲線および直線近似によってトレンドを求めた。この結果、トレンドは直線近似とすること

が適切であることを示した。

第4章では、直線近似したトレンドと実測値の差を残差 (Residuals) として、その統計的性質、すなわち確率分布形状、深度および水平方向の自己相関性について検討した。残差の標準偏差は、粘性土地盤ではおおよそ 0.02MPa、粗粒土では、0.85MPa から 2.5MPa と約 100 倍大きくなった。Pearson Chart を用いて、残差の確率分布の形状を検討した結果、残差の分布は正規分布に、一部の地域の粗粒土地盤 (検見川、東扇島、中標津) ではガンマ分布に従うことが分かった。対象とする深さを 0.5m として自己相関係数を算出した場合、相関距離は粘土地盤では 0.1m 前後、粗粒土地盤のそれは 0.2m 前後であった。また、算出した Scale of fluctuation の値は在住の研究報告と同じ傾向が得られた。美原の泥炭地盤を対象として、ボールコーン貫入試験 (BPT) による先端抵抗を用いて深度方向および水平方向に対する統計解析を行った。深度方向の残差の相関性は非常に小さく、相関距離 (層全体を対象とした場合) は 0.5m 以下となった。一方、水平方向に対する相関性は大きく 50m を離れても、かなりの相関性があり、既往の研究結果と同様の傾向を確認することができた。

第5章では、羽田 D 滑走路の建設過程で得られたデータを用いて、圧密途上の地盤の圧密特性とその残差の性質について検討した。この調査によって得られた CPT のデータを用いて、サンドコンパクション (SCP) 工法およびサンドドレーン (SD) 工法によって改良された地盤の埋立過程における変化の把握を試みた結果、SD によって改良された地盤は、 Q_t および B_q による方法で求めた間隙水圧の分布はほぼ一致するが、SCP によって改良された護岸部は、両者の値が大きく異なった。これは、SCP によって形成された砂杭の剛性率が原地盤の粘性土より大きいため、埋土の荷重が砂杭に集中し、原地盤には小さな荷重が載荷するためと考えられる。そして、この砂杭に対する応力分担比は従来報告された値より、かなり大きいことが分かった。

各施工段階における CPT から求めた q_{net} に対して最小二乗法でトレンドを算出し、このトレンドからの残差をバラツキとして考えた。残差の標準偏差は施工とともに増大し、埋立の最終施工段階では、原地盤の約 10 倍の値が得られた。第4章と同様に自己相関係数を算出した結果、施工段階が進むと自己相関性が小さくなり、施工段階によっては自己相関係数の関数モデルが変化することが分かった。埋立の過程段階によっては、上部の q_{net} を直線近似で表すことができない場合があることがわかった。これは、地盤が未圧密状態の場合に顕著に表れる。このような場合には、土層を複数のトレンドに分けて統計解析を行う方が、より正確に地盤のバラツキを把握することができることが分かった。

CPT による結果と比較するために、関西国際空港第二期事業を文献によるデータを用いて、我が国で通常行われている一軸圧縮試験を用いて同様な検討を行った。CPT で得られた残差の標準偏差と $qu/2$ によるそれを比較すると、CPT で得られた残差はかなり小さな値になった。このことは、CPT はボーリング孔を必要としないため人為的なバラツキが少ないことを示しており、CPT による施工管理の優位性を示していると考えられる。

これを要するに、著者は、信頼設計に必要な地盤の統計的性質を個人誤差の少ない CPT から得られたデータを解析することにより明らかにしたものであり、地盤工学の発展に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。