



神戸空港島における地盤問題と対応策に関する研究

山本, 卓生

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2012-03-06

(Date of Publication)

2012-09-10

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙3177

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003177>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名	山本 卓生		
論文 題目	神戸空港島における地盤問題と対応策に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	澁谷 啓
	副査	教授	芥川 真一
	副査	教授	飯塚 敦
	副査		
			印

要 旨

神戸市では、戦後、神戸港において港湾施設の整備増強を進め、昭和30年代には神戸港の東西沿岸部で約540haの埋立造成を行い、港湾施設の拡充とともに都市施設の整備も行われた。その後の経済発展に伴い、港湾機能と都市機能を新たに創造する必要性から、大規模な海上埋立により複合機能を有する海上都市空間であるポートアイランドや六甲アイランドを誕生させた。

これら海上埋立事業を通して、神戸港の海底地盤の調査研究がこれまで進められてきた。ポートアイランドの建設は全国に先駆けた大規模埋立事業であり、当時は硬質で過圧密状態を呈し、圧縮することがないと考えられていた洪積粘土層が沈下することを、埋立初期段階からの継続的な沈下計測により明らかにした。その後、ポートアイランド(第2期)や六甲アイランドでは、洪積層の地盤性状を把握する目的でMa9層までの地盤調査を行い、物理・力学特性についての知見を得るとともに、埋立に伴う洪積粘土層の層別沈下や間隙水圧の変化を継続的に計測している。

本研究は、ポートアイランドの南側海域において大規模埋立により建設された神戸空港島を対象としている。当海域は、ポートアイランドや六甲アイランドなどのこれまでの埋立海域と比べ大水深であり、弾性波探査やMa9層までの地盤調査の結果から、沖積粘土層および洪積粘土層が厚く堆積するとともに、撓曲構造が存在するため地層が北西から南東に向かって傾斜していることが分かった。このことから、空港島の建設にあたっては、これまでの神戸港の埋立実績から得られた地盤工学的知見や埋立技術を活用するとともに、当海域特有の地盤問題への対応策を検討する必要がある。

第1章では、本研究の背景となるこれまでの神戸港での埋立事業の変遷を概説し、そこから得られた神戸港の海底地盤の特性や沈下性状について述べるとともに、本研究の対象である神戸空港島の建設海域の地層構成を示し、本論文で扱う地盤問題と対応策の概要を示した。

第2章では、護岸部の地盤変形解析手法の構築を行った。空港島周囲を囲む緩傾斜石積護岸を約2年という短期間で施工することにより大きな地盤変形が発生することが予測された。このため、先行して工事が実施された沖合側の緩傾斜石積護岸を対象に当該地盤における変形性状を精度よく表現できる変形解析モデルを構築した。解析モデルには関口・太田による弾・粘塑性モデルを採用し、護岸工事着工前に実施した土質調査結果から、地盤や埋立材料の土質パラメータを設定して事前解析を実施した。事前解析結果と施工現場から得られた動態観測結果を比較すると、水平変位の深度分布に大きな差異が認められ、深度方向の分布形状も大きく異なっていた。このことから、SD改良域について、事前解析では複合地盤として取扱い、見かけの透水係数を設定していたが、砂杭の機能をより正確に表現するため鉛直方向の排水境界を設けるようモデルの改良を行って再解析を実施した。その結果、水平変位について実測値と類似した変形モードを得ることができた。

第3章では、粘土層の圧密挙動の把握・評価と圧密予測の一次元解析モデルの構築を行った。洪積層の詳細な圧密挙動を把握するため空港島内で実施されている区間圧縮量と間隙水圧の現地計測結果をとりまとめ、Ma12層とMa11層の圧密特性を評価した。Ma12層ではひずみ速度と過圧密比(OCR)の相関関係が明瞭に表れ、Ma11層では現地計測結果から把握できた圧密降伏応力は2点のみであったが、いずれも事前土質調査の室内圧密試験で得られた圧密降伏応力より小さかった。圧密降伏応力のひずみ速度依存性は疑似過圧密粘土特有の性質だが、現地での計測結果を室内試験結果と比較することによりこの性質を確認することができた。また、空港という施設の特性上、従来以上に精巧な造成管理、沈下予測が求められたため、深度約300mのMa9層までを対象とした圧密予測の一次元解析モデルを構築した。解析モデルは島内全域に適用するため、盛土荷重は深浅測量結果を用いて20mメッシュで設定し、埋立造成工事の進捗に合わせて随時更新した。

また、工事途上に得られる現地計測結果を基に、主に排水層や過圧密比(OCR)の再検討を行い予測精度の向上を図った。本モデルの圧密予測解析結果を用いて最終造成高さや勾配を設定した結果、滑走路等の空港施設は開港時に規定の勾配を満足することができ、開港5年後においても滑走路の縦断形状はほぼ維持されていた。

第4章では、護岸と滑走路の耐震安全性の検討を行った。神戸空港は防災拠点として整備されることから、滑走路・護岸等の主要施設はレベル2地震動に対しても施設機能を確保する必要がある。設計入力地震動としてポートアイランド観測波を用い、併せて各種調査結果に基づいて作成した大阪湾断層の模擬地震波を利用して、空港埋立地盤の液状化時における動的有効応力解析を実施し、護岸及び滑走路の液状化による沈下と水平変位を評価した。動的有効応力解析にはFLIPとLIQCAを用いた。解析の結果、緩傾斜石積護岸は地震時の変形に追従しやすく、地震時の沈下および地震後の過剰間隙水圧の消散に伴う沈下が生じた場合にも護岸の最低必要天端高さ(KP+3.7m)を確保でき、重大な被害が生じないことがわかった。滑走路については、液状化によって大きな沈下が生ずる結果となったため、液状化対策としてサンドコンパクションパイル(SCP)工法を用いることとした。SCPの設計にあたっては、ポートアイランド観測波を入力地震動として、排水後の残留変形を予測できるLIQCAを用いて解析を行った。改良深度をいくつか設定した解析結果から、滑走路部で不同沈下が生じない改良深度15mを得た。また、液状化が発生しない高いせん断強度として相対密度 $Dr=85\%$ を改良目標に設定し、パイル径70cmで1.8m正方形配置の検討結果を得た。

第5章では、神戸空港島に受入れた超高含水比の液状粘性土に対して行ったプラスチックボードドレーン(PBD)による地盤改良について、各種計測を実施し、その測定結果に基づき、地盤改良効果の発現メカニズムの解明および改良効果の評価を実施した。PBDによる地盤改良は、液状粘性土層下部にある透水性が高い敷砂層および盛砂層にPBDの先端を打設することにより、PBD内の水圧分布を島外の海面と同じになるようにし、内水位との水位差を利用して圧密を促進させるものである。液状粘性土層とPBDの間隙水圧を測定したところ、両者間にほぼ予想通りの水頭差が生じていることが確認できた。また、含水比が200%以下の範囲においては、ボールコーン試験(BPT)によって得られた粘着力から換算された含水比と、原位で採取した試料を用いて実測した含水比に良好な相関関係が確認されたことから、BPT試験により含水比を推定できる可能性が示された。PBDに生じる曲げ変形の測定では、曲げ変形の発生位置は不均質であり、一部に卓越する箇所が計測されたが、沈下傾向とPBD内の間隙水圧変化を考慮すると、相当な大変形を生じても排水性能を維持することが示された。

第6章では、各章で得られた結論をとりまとめた。

本研究は、これまでの神戸港の埋立事業から得られた地盤工学的知見を基に、さらに複雑な地層構成を成す神戸空港島建設海域を対象として、新たに生じた設計・施工上の地盤工学的課題に対する技術的対応策に関して研究したものであり、大規模埋立事業における地盤の力学的挙動の予測・解明に大きく貢献する重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の山本卓生は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。

特記事項

・発表論文数 4編(内1編投稿中)

(別紙様式3)

論文内容の要旨

氏名 山本 卓生

論文題目

神戸空港島における地盤問題と対応策に関する研究

神戸市では、戦後、神戸港において港湾施設の整備増強を進め、昭和30年代には神戸港の東西沿岸部で約540haの埋立造成を行い、港湾施設の拡充とともに都市施設の整備も行われた。その後の経済発展に伴い、港湾機能と都市機能を新たに創造する必要性から、大規模な海上埋立により複合機能を有する海上都市空間であるポートアイランドや六甲アイランドを誕生させた。

これら海上埋立事業を通して、神戸港の海底地盤の調査研究がこれまで進められてきた。ポートアイランドの建設は全国に先駆けた大規模埋立事業であり、当時は硬質で過圧密状態を呈し、圧縮することがないと考えられていた洪積粘土層が沈下することを、埋立初期段階からの継続的な沈下計測により明らかにした。その後、ポートアイランド(第2期)や六甲アイランドでは、洪積層の地盤性状を把握する目的でMa9層までの地盤調査を行い、物理・力学特性についての知見を得るとともに、埋立に伴う洪積粘土層の層別沈下や間隙水圧の変化を継続的に計測している。

本研究は、ポートアイランドの南側海域において大規模埋立により建設された神戸空港島を対象としている。当海域は、ポートアイランドや六甲アイランドなどのこれまでの埋立海域と比べ大水深であり、弾性波探査やMa9層までの地盤調査の結果から、沖積粘土層および洪積粘土層が厚く堆積するとともに、撓曲構造が存在するため地層が北西から南東に向かって傾斜していることが分かった。このことから、空港島の建設にあたっては、これまでの神戸港の埋立実績から得られた地盤工学的知見や埋立技術を活用するとともに、当海域特有の地盤問題への対応策を検討する必要がある。

第1章では、本研究の背景となるこれまでの神戸港での埋立事業の変遷を概

説し、そこから得られた神戸港の海底地盤の特性や沈下性状について述べるとともに、本研究の対象である神戸空港島の建設海域の地層構成を示し、本論文で扱う地盤問題と対応策の概要を示した。

第2章では、護岸部の地盤変形解析手法の構築を行った。空港島周囲を囲む緩傾斜石積護岸を約2年という短期間で施工することにより大きな地盤変形が発生することが予測された。このため、先行して工事が実施された沖合側の緩傾斜石積護岸を対象に当該地盤における変形性状を精度よく表現できる変形解析モデルを構築した。解析モデルには関口・太田による弾・粘塑性モデルを採用し、護岸工事着工前に実施した土質調査結果から、地盤や埋立材料の土質パラメータを設定して事前解析を実施した。事前解析結果と施工現場から得られた動態観測結果を比較すると、水平変位の深度分布に大きな差異が認められ、深度方向の分布形状も大きく異なっていた。このことから、SD改良域について、事前解析では複合地盤として取扱い、見かけの透水係数を設定していたが、砂杭の機能をより正確に表現するため鉛直方向の排水境界を設けるようモデルの改良を行って再解析を実施した。その結果、水平変位について実測値と類似した変形モードを得ることができた。

第3章では、粘土層の圧密挙動の把握・評価と圧密予測の一次元解析モデルの構築を行った。洪積層の詳細な圧密挙動を把握するため空港島内で実施されている区間圧縮量と間隙水圧の現地計測結果をとりまとめ、Ma12層とMa11層の圧密特性を評価した。Ma12層ではひずみ速度と過圧密比(OCR)の相関関係が明瞭に表れ、Ma11層では現地計測結果から把握できた圧密降伏応力は2点のみであったが、いずれも事前土質調査の室内圧密試験で得られた圧密降伏応力より小さかった。圧密降伏応力のひずみ速度依存性は擬似過圧密粘土特有の性質だが、現地での計測結果を室内試験結果と比較することによりこの性質を確認することができた。また、空港という施設の特性上、従来以上に精巧な造成管理、沈下予測が求められたため、深度約300mのMa9層までを対象とした圧密予測の一次元解析モデルを構築した。解析モデルは島内全域に適用するため、盛土荷重は深淺測量結果を用いて20mメッシュで設定し、埋立造成工事の進捗に合わせて随時更新した。また、工事途上に得られる現地計測結果を基に、主に排水層や過圧密比(OCR)の再検討を行い予測精度の向上を図った。本モデルの圧密予測解析結果を用いて最終造成高さや勾配を設定した結果、滑走路等の空港施設は開港時に規定の勾配を満足することができ、開港5年後においても滑走路の縦断形状はほぼ維持されていた。

第4章では、護岸と滑走路の耐震安全性の検討を行った。神戸空港は防災拠点として整備されることから、滑走路・護岸等の主要施設はレベル2地震動に対しても施設機能を確保する必要がある。設計入力地震動としてポートアイラ

ンド観測波を用い、併せて各種調査結果に基づいて作成した大阪湾断層の模擬地震波を利用して、空港埋立地盤の液状化時における動的有効応力解析を実施し、護岸及び滑走路の液状化による沈下と水平変位を評価した。動的有効応力解析には FLIP と LIQCA を用いた。解析の結果、緩傾斜石積護岸は地震時の変形に追随しやすく、地震時の沈下および地震後の過剰間隙水圧の消散に伴う沈下が生じた場合にも護岸の最低必要天端高さ(KP+3.7m)を確保でき、重大な被害が生じないことがわかった。滑走路については、液状化によって大きな沈下が生ずる結果となったため、液状化対策としてサンドコンパクションパイル(SCP)工法を用いることとした。SCP の設計にあたっては、ポートアイランド観測波を入力地震動として、排水後の残留変形を予測できる LIQCA を用いて解析を行った。改良深度をいくつか設定した解析結果から、滑走路部で不同沈下が生じない改良深度 15m を得た。また、液状化が発生しない高いせん断強度として相対密度 $D_r = 85\%$ を改良目標に設定し、パイル径 70cm で 1.8m 正方形配置の検討結果を得た。

第 5 章では、神戸空港島に受入れた超高含水比の浚渫粘性土に対して行ったプラスチックボードドレーン(PBD)による地盤改良について、各種計測を実施し、その測定結果に基づき、地盤改良効果の発現メカニズムの解明および改良効果の評価を実施した。PBD による地盤改良は、浚渫粘土層下部にある透水性が高い敷砂層および盛砂層に PBD の先端を打設することにより、PBD 内の水圧分布を島外の海水面と同じになるようにし、内水位との水位差を利用して圧密を促進させるものである。浚渫粘性土層と PBD の間隙水圧を測定したところ、両者間にほぼ予想通りの水頭差が生じていることが確認できた。また、含水比が 200%以下の範囲においては、ボールコーン試験(BPT)によって得られた粘着力から換算された含水比と、原位置で採取した試料を用いて実測した含水比に良好な相関関係が確認されたことから、BPT 試験により含水比を推定できる可能性が示された。PBD に生じる曲げ変形の測定では、曲げ変形の発生位置は不均質であり、一部に卓越する箇所が計測されたが、沈下傾向と PBD 内の間隙水圧変化を考慮すると、相当な大変形を生じても排水性能を維持することが示された。

第 6 章では、各章で得られた結論をとりまとめた。