

3次元地盤モデルを活用した 空港地下道の耐震補強設計

さけもと 酒本 まさき 真先¹・さとう 佐藤 せいいち 誠一¹・にしはら 西原 ふみかず 史和²・よこやま 横山 のぶゆき 伸幸³・ふじの 藤野 ともあき 友彰³

¹ 日本工営株式会社 地盤技術部（〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6）

² 日本工営株式会社 札幌支店（〒060-0005 北海道札幌市中央区北 5 条西 6-2）

³ 日本工営株式会社 空港港湾部（〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6）

本業務は、将来発生しうる巨大地震直後においても、空港における緊急輸送機能を確保することを目的として、滑走路直下を横断する地下道ボックスカルバートの耐震照査及び設計を行ったものである。対象空港は山岳空港であり、地下道は谷地形の造成地に設置されていることから基盤面が複雑に変化する。この基盤面の複雑さを考慮した耐震照査・設計を行うため、3次元地盤モデルを作成した。作成した3次元地盤モデルから、多数の2次元断面を取り出し、工区区分の設定を行い、耐震性能照査・設計を行った。本業務で実施した3次元地盤モデルの構築とそれを反映した簡易の3次元解析手法は一般的に3次元解析と比較して設計に適用可能な現実的な手法である。

Key Words: 3次元地盤モデル,耐震性能照査,ボックスカルバート,FLIP,地震応答解析

1. はじめに

過去の被害地震において、道路や鉄道等の交通ネットワークが一時的に寸断された場合、人命救助や応急復旧等の緊急輸送機能に対して地域の空港を拠点とした航空ネットワークが果たした役割は非常に大きい。例えば、平成7年兵庫県南部地震では鉄道、港湾、高速道路等の輸送関係施設が甚大な被害を受けたため、代替輸送機関として空港が重要な役割を果たした¹⁾。

本業務は将来発生しうる巨大地震直後にも空港における緊急輸送機能を確保することを目的として、滑走路直

下を横断する地下道ボックスカルバートの耐震照査及び設計を行った。

2. 対象施設概要

対象とする空港地下道の平面図を図1に示す。対象空港は山岳空港であり、地下道は谷地形の造成地に設置されている。そのため、地下道直下の基盤面は縦横断方向に複雑に変化する（図2、図3）。対象地点の土層は、せん断波速度 $V_s=1200\text{m/s}$ 程度の砂岩層と礫質土による盛土から構成される。

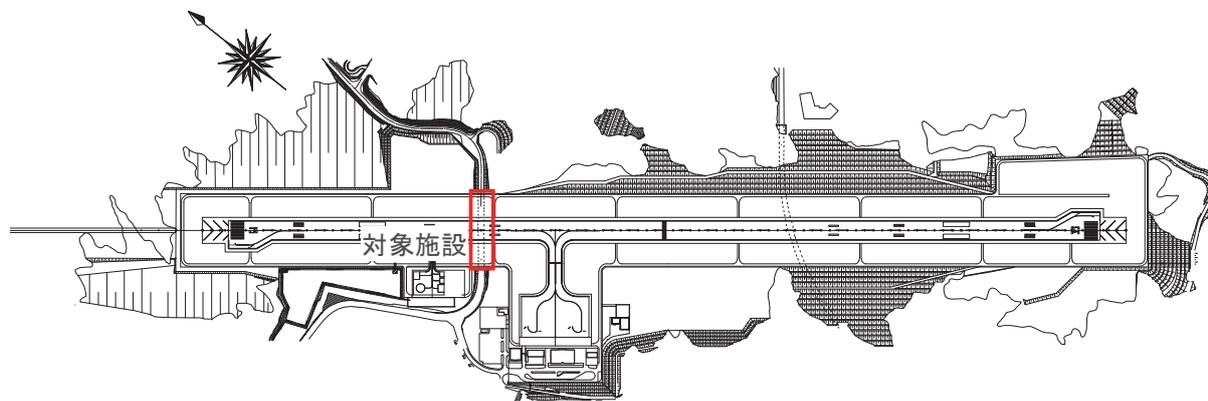


図1 対象施設平面図

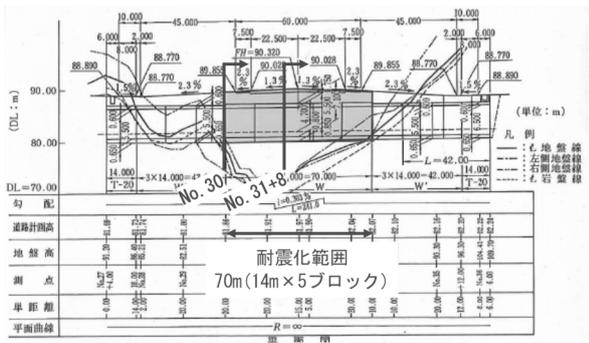


図2 対象施設縦断面図

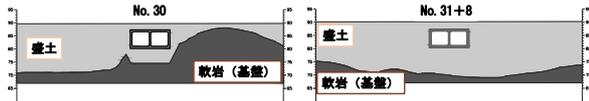


図3 対象施設横断面図

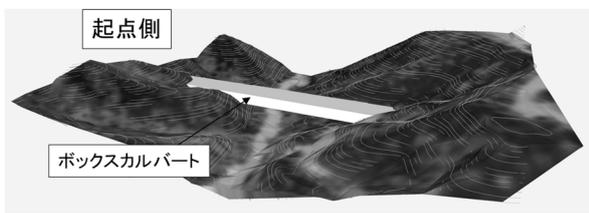


図4 三次元地盤モデル

対象地下道は内空 $5.5\text{m} \times 6.5\text{m}$ の2連ボックスカルバートであり、中央部は $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ の中柱が 2m ピッチで配置されている。対象地下道の全長は 182m （1ブロック $14\text{m} \times 13$ ブロック）で、このうち耐震化対象範囲は滑走路直下の 70m （5ブロック）区間である。

3. 検討方針

(1) 地盤モデルの構築

対象地下道直下の基盤面の起伏形状の違いは耐震照査結果や対策検討に大きな影響を与えることが想定される。そのため、基盤面の起伏形状に応じた工区区分の設定及び代表断面の選定により、合理的な設計を行うことを目的として、設計当時の計画平面図等に基づき3D CADを用いて三次元地盤モデルを構築した。さらに、3Dプリンタを用いて三次元地盤モデルから模型を作成し、基盤面の変化を視覚的に捉え、工区区分の検討、耐震対策工の検討及び施工計画検討等、業務の各段階で活用した。

(2) 工区区分及び代表断面の設定

三次元地盤モデルから地下道横断方向に 1m ピッチで土層断面を作成した（図5）。ここで、起点側から各ブロックを①～⑤とすると、①④⑤ブロックは基盤面の傾斜が比較的大きく、②③ブロックは比較的基盤面が平坦な傾向であることが確認された。また、①ブロックは北側に基盤が盛り上がっているのに対し、④⑤ブロックは

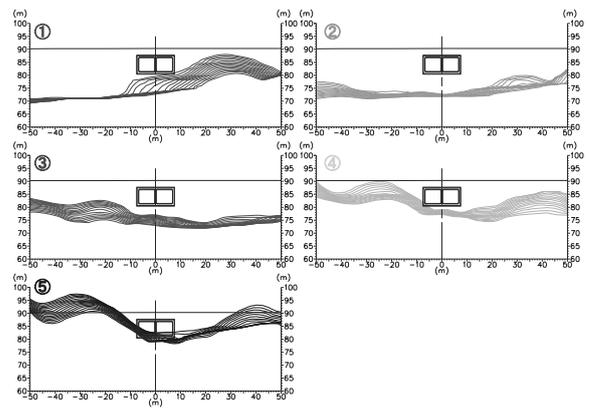


図5 各ブロックの基盤面形状（ 1m ピッチ）

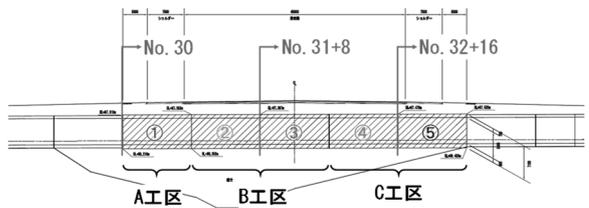


図6 工区区分と代表断面位置

表1 工区区分と代表断面一覧表

| 工区区分 | 対象区間 | 代表断面 |
|------|------|----------|
| A | ① | No.30 |
| B | ②③ | No.31+8 |
| C | ④⑤ | No.32+16 |

両側で基盤が盛り上がる傾向であることが確認された。さらに、各ブロックの基盤が最も浅くなる断面、最も深くなる断面、中間的な断面の3断面に対し、2次元地震応答解析を実施し、ボックスの頂版と底版での相対変位を算定した。

基盤面の形状及び2次元地震応答解析結果を踏まえ設定した工区区分及び代表断面を図6に示す。代表断面は地震応答解析結果より、各工区区分内で頂版-底版間の相対変位が最大となる断面を選定した。

4. 横断方向の耐震性能照査結果と対策検討結果

(1) 検討条件

横断方向断面の耐震性能照査は、複雑な基盤起伏形状を考慮するため、動的解析手法のうち空港等での実績が多いFLIP²⁾を使用した。構造物は非線形はり要素でモデル化し、地盤-構造物間にはすべり・剥離を考慮するためのジョイント要素を設定した。

横断方向断面の照査項目及び照査基準値は表2に示す通りとした。「空港土木施設耐震設計要領及び設計例³⁾」では、レベル2地震作用時に道路・駐車場（地中構造物の場合）に対して求められる設計限界値の例として、

「人命、財産または社会的経済活動に重大な影響を及ぼすおそれのある場合には、ひび割れの修復等短期間で補修できる程度の損傷」であることが示されている。降伏モーメントを超過しない状態下の場合、航空機荷重を支持することが可能であり、所要の性能を満たすことから、曲げに対する許容値は降伏モーメントとした。

表2 横断方向断面の照査項目及び許容値

| 項目 | 許容値 | 備考 |
|-----|---------|---------|
| 曲げ | 降伏モーメント | ひび割れは許容 |
| せん断 | せん断耐力 | |

(2) 耐震性能照査結果

各代表断面に対し、地震応答解析を実施した結果、無対策の場合にはすべての断面で曲げ・せん断ともに耐震性能を満足しないことが確認された(図7)。なお、対象施設の頂版・底版・側壁におけるせん断鉄筋の配置間隔が、「コンクリート標準示方書 設計編⁴⁾」の構造細目を満足しないことから、照査上はせん断鉄筋を考慮していない。

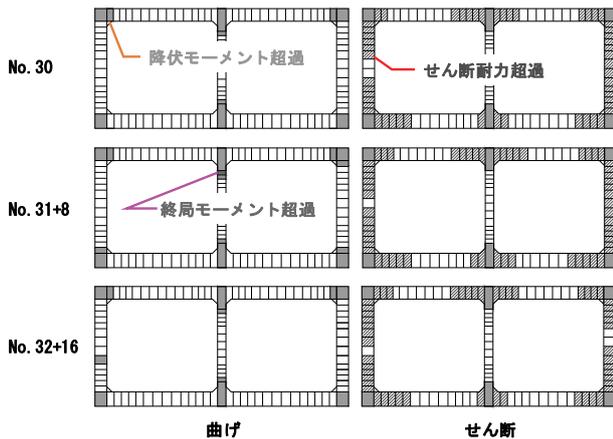


図7 耐震性照査結果(無対策断面)

(3) 耐震対策工の検討

無対策断面に対する地震応答解析結果を踏まえ、表3に示す通り耐震対策工法を抽出した。ここで、対象地下道内における水道管等の埋設状況を考慮し、増厚可能部材は頂版のみとして対策工法の検討を実施した。また、無対策の場合には、部材外側(地山側)で許容値を超過する曲げモーメントが発生することが確認されたため、部材内側の曲げ耐力増加のみに寄与する鋼板接着工法等は除外して検討した。

各対策工法に対し、対策後断面の照査を実施した結果、頂版増厚及び中柱増設では曲げの許容値を満足する断面が成立しない結果となった。そのため、曲げ対策については地盤改良による対策を基本とした。ただし、地盤改良工法は他工法と比較して経済性に劣るため、他工法と

表3 耐震対策工法一覧表

| No. | 工法 | 目的 | |
|-----|---------|----------|------------|
| 1 | 構造部材の補強 | 鉄筋挿入 | せん断耐力増加 |
| 2 | | 頂版増厚 | 曲げ・せん断耐力増加 |
| 3 | | 中柱増設 | 曲げ耐力増加 |
| 4 | 地盤改良 | 発生断面力の低減 | |

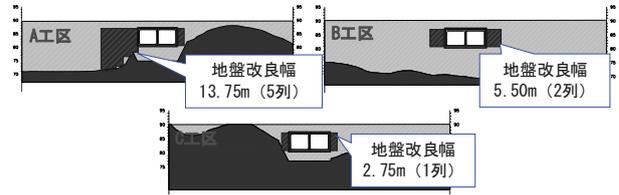


図8 耐震対策断面(地盤改良形状)

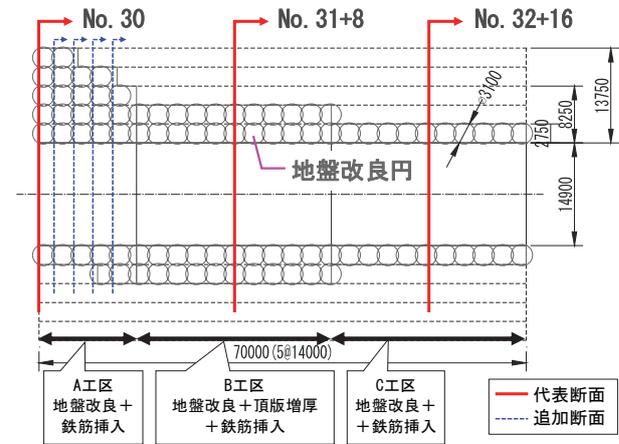


図9 耐震対策工法平面図(地盤改良配置図)

の併用についても検討した。

各工区の代表断面に対する耐震対策検討結果を図8に示す。耐震対策工法は、A、C工区については地盤改良+鉄筋挿入の併用を選定した一方で、B工区については地盤改良+頂版増厚+鉄筋挿入工法を選定した。これは、B工区については頂版増厚との併用により、必要な地盤改良幅を低減させることができたためである。

地盤改良工法については供用中空港の滑走路直下での施工であることを踏まえ、三重管式の高圧噴射攪拌工法を選定した。また、地盤改良工事は空港運用時間外の限られた時間で実施しなければならないため、地盤改良径は大口径である3.5mのものを選定した。ただし、地盤材料が礫質土であるため、有効径を10%減じて、改良径3.1mで配置を検討検討した。

なお、代表断面に対して対策工法を検討した結果、A-B工区境で地盤改良範囲が急変する結果となったため、ボックスの地震時挙動が異なり、耐震上の弱点となることが想定された。そこで、地盤改良径ごとに土層断面と対策工を反映した追加断面(図9中青破線部)で横断方向の地震応答解析を行い、各断面で地盤改良幅及び深度

の最適化を図ることにより、地盤改良の擦り付け形状を検討した(図9)。

5. 縦断方向の耐震性能照査

(1) 検討手法

「空港土木施設耐震設計要領及び設計例⁵⁾」では、線状地下構造物の縦断方向解析手法として、構造物の軸線方向に沿った地盤の地震時変位が正弦波状の分布をするものと考え、これを地盤ばねを介して地中施設に入力する手法(応答変位法)が記載されている。しかし、本手法では地盤変位の算定方法が確立されていないことや地盤改良や基盤面の起伏といった地盤変化を考慮することが困難といった課題がある。また、一般的な三次元地震応答解析では、解析プログラムの制約上、地盤変化と地震動の位相差を同時に考慮した解析が困難であることや、解析に莫大な時間を要するといった課題がある。そこで、本業務では地盤変化及び地震動の位相差を考慮した解析方法として、動的な応答変位法(簡易三次元解析)を実施した。簡易三次元解析の概念図を図10に示す。簡易三次元解析では、多数の2次元断面に対して地下道軸方向及び軸直交方向に地震応答解析を実施し、得られた地盤変位の時刻歴を地盤ばねを介して位相差を考慮して構造物に入力する方法である。本方法における地震応答解析そのものは2次元断面であるため、地盤改良や基盤面の起伏といった地盤変化を精度よく考慮することが可能である。また、解析時間も通常の2次元断面の解析時間と同程度である。

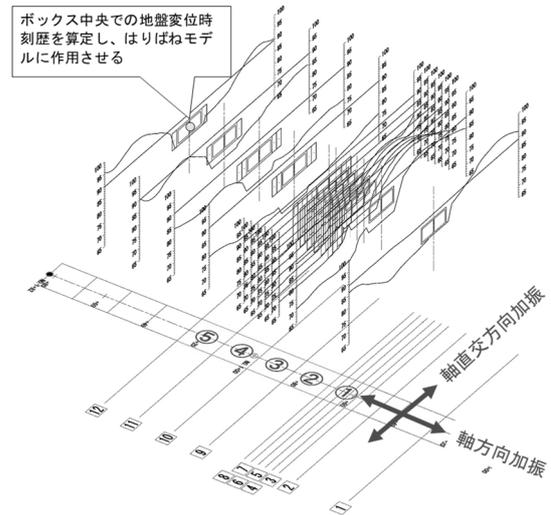


図10 簡易3次元解析の概念図

表4 縦断方向の照査結果

| 項目 | 許容値 | 応答値 | 判定 | |
|-----|------------|------------------------|-------|----|
| 軸力 | 引張 | 1.91 N/mm ² | 1.72 | OK |
| | 圧縮 | 24 N/mm ² | 3.68 | OK |
| せん断 | 80344 kN | 13074 | OK | |
| 曲げ | 50182 kN・m | 49300 | OK | |
| 目地 | 開き | 5.7 mm | 0.46 | OK |
| | ずれ | 700 mm | 136.1 | OK |

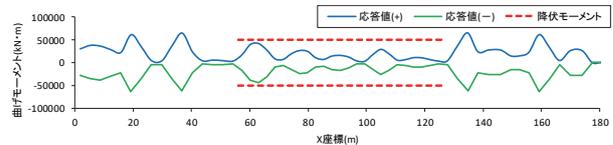


図11 縦断方向解析結果(曲げモーメント)

(2) 検討結果

簡易三次元解析による縦断方向解析の結果を表4に示す。縦断方向解析では躯体に発生する断面力に加え、ボックス間の目地の開き・ずれについても照査を実施した。照査の結果、耐震対策範囲である滑走路直下区間は地盤改良の影響により発生断面力が低減される傾向であることが確認された(図11)。表4に示す通り、躯体に発生する断面力及び目地部のいずれも許容値を満足する結果となった。

6. まとめと今後の展望

本業務では、三次元地盤モデルを活用して、基盤形状が複雑な空港地下道の耐震対策工法の設計を行った。大規模インフラ施設の耐震性照査や設計において地盤の三次元的変化を踏まえた評価は重要な課題であるが、一般的な三次元解析は莫大な時間とコストを要するために設計手法として現実的ではない。本業務で提案・実施した

三次元地盤モデルの構築とそれを反映した簡易三次元解析は既存手法の組合せで構成され、設計に適用可能な現実的な手法であることから、今後大規模インフラ施設の耐震性照査に積極的に適用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 運輸省：平成7年度 運輸白書、第1章 阪神・淡路大震災と運輸 第2節 地震発生後の対応、<http://www.mlit.go.jp/ha-kusyo/transport/heisei07/7INDEX.HTM>, 1995
- 2) 井合進・松永康男・亀岡知弘：ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのパラメータの同定、港湾技術研究所報告、第29巻、第4号、pp.27-56, 1990.
- 3) 一般財団法人 港湾空港総合技術センター：空港土木施設耐震設計要領及び設計例、pp.11, 2015.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編、pp.325-327, 2012.
- 5) 一般財団法人 港湾空港総合技術センター：空港土木施設耐震設計要領及び設計例、pp.付10-付11, 2015.