

三次元地盤モデルを活用した松山空港の耐震性能評価について

白井博己*・榊原雅人**・藤野正宏***・前田昌弘****・添田洋*****・岸田隆嗣*****

* (財) 沿岸技術研究センター 調査役
 ** (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員
 ***国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 所長
 ****国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 専門官
 *****日本海洋コンサルタント(株) 技術本部 技術部長
 *****日本海洋コンサルタント(株) 技術本部 技術課長

レベル1およびレベル2地震動に対する、地震後の空港の被害想定を行うため、空港直下の地盤を三次元でモデル化し、空港の基本施設(滑走路・誘導路・エプロン)の耐震性能評価を行った結果について報告する。

キーワード：耐震性能評価, 被害想定, 三次元地盤モデル, 液状化

1. はじめに

従来、空港の基本施設(滑走路, 誘導路, エプロン)における耐震性能評価は、ボーリング地点で地震後の沈下量を算定し、地表面勾配を求めて、「空港土木施設の設置基準・同解説」¹⁾(以下、「空港基準」と称する。)に示されている施設毎の最大勾配と比較して照査を行っていた。

しかし、ボーリング間隔は一般的に100m以上離れており、地震後のボーリング地点間の地表面高が直線補間と見なされるため、地表面勾配が適切に求められていないという課題があった。

このため、松山空港の耐震性能評価においては、沈下量の算定間隔を密(滑走路中心は20mピッチ)に設定し、地震後の地表面勾配を算定して、空港の基本施設の耐震性能評価を行った。沈下量の算定間隔を密にするために、空港内で数多く実施されたボーリング結果から、三次元可視化ソフトを用いて、任意地点の土層構成(三次元地盤モデル)を作成した。ここで、対象地震動は、レベル1地震動とレベル2地震動(東南海・南海地震, 中央構造線地震, M6.5直下地震, 芸予地震)である。

液状化に伴う沈下量・地表面勾配算定の他に、液状化予測・判定や図-1に示す外周護岸, 場周道路橋, 地下構造物及び空港の基本施設の耐震性能につ

いても評価し、地震後の空港の被害想定を行った。各検討結果の妥当性については、芸予地震(2001年3月24日に発生)における松山空港の被災状況と比較を行い確認した。

以下、本論文では、地盤条件の設定, 液状化に伴う沈下量の算定, 外周護岸の耐震性能評価, 空港基本施設の耐震性能評価, 被害想定図の作成及び空港機能の耐震性能評価について述べる。

2. 地盤条件の設定

2.1 三次元地盤モデルの作成

松山空港直下の三次元地盤モデルを図-2に示す。三次元地盤モデルは、三次元可視化ソフト「EVS-Standard」²⁾を使用して、図-3に示す既往のボーリングデータから作成した。ここで、ボーリング地点以外の土層厚の補間方法は、既知の地点の値を用いて未知の地点を確率的に推定するクリギング法²⁾である。液状化に伴う沈下量の算定及び外周護岸・地下構造物の耐震性能評価における任意地点の土層構成は、三次元地盤モデルより推定した。

2.2 地盤定数の設定

空港は、滑走路の延長が2,500mと非常に広範囲に及ぶ施設である。そのため、空港内において地盤定数が変化する。

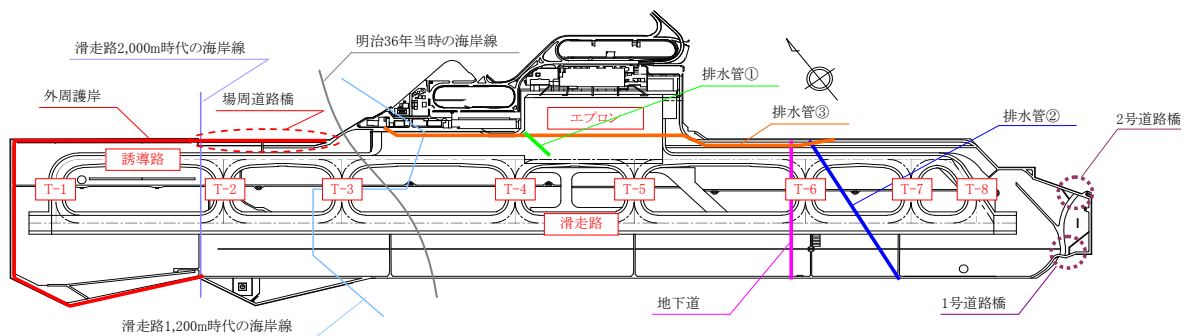


図-1 松山空港平面図

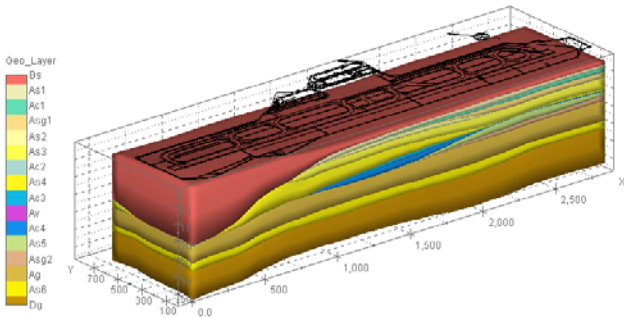


図-2 三次元地盤モデル

そこで、地盤定数の場所的変化を考慮するため、図-3に示すとおり空港全体を20工区に区別した。地盤定数は、各工区内で異常値を除いた層毎の平均値とした。また、滑走路延伸部（図-3参照）は、埋立により有効土被り圧が現状と土質調査時点で異なるため、埋立前のN値や一軸圧縮強度 q_u は除外した。

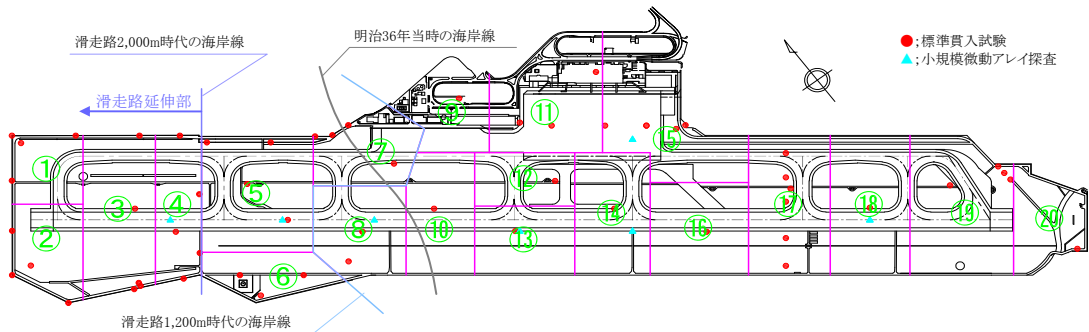


図-3 土質定数の工区分け

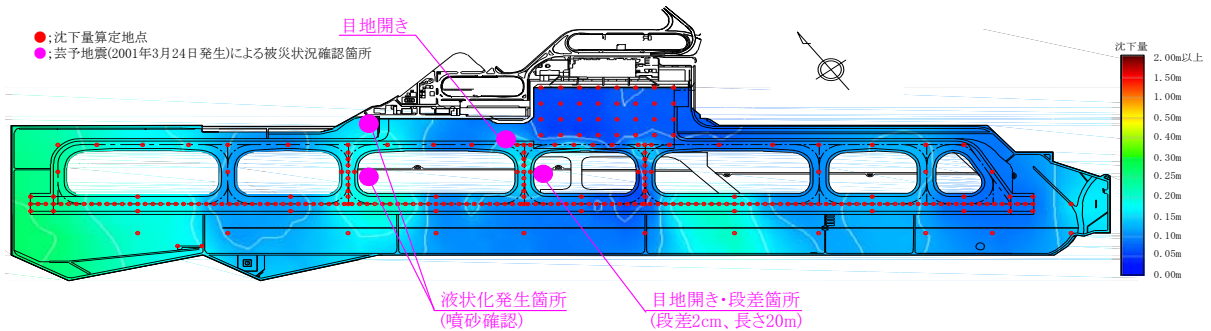


図-4 沈下量コンター図（方法1：全砂層に液状化パラメータを設定，芸予地震）

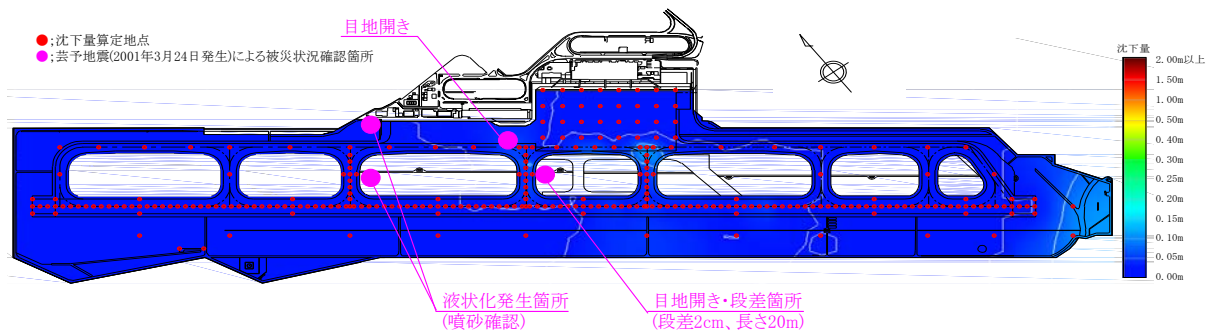


図-5 沈下量コンター図（方法2：液状化層に液状化パラメータを設定，芸予地震）

3. 液状化に伴う沈下量の算定

3.1 沈下量の算定方法

液状化に伴う沈下量の算定方法として、下記の2ケースを想定した。

方法1；全砂層に液状化パラメータを設定

方法2；液状化層に液状化パラメータを設定

以下、具体的な算定方法を述べる。

(1) 全砂層に液状化パラメータを設定(方法1)

全砂層に液状化パラメータを考慮してFLIPによる一次元地震応答解析を行い、得られた過剰間隙水圧比から永瀬・石原・田部³⁾及び石原・吉嶺⁴⁾の「体積ひずみと過剰間隙水圧比の関係図」により沈下量を算定した（図-4）。

(2) 液状化層に液状化パラメータを設定(方法2)

SHAKEを用いた液状化判定⁵⁾を行い、液状化すると判定された層にのみ液状化パラメータを考慮してFLIPによる一次元地震解析を行い、方法1と同様に過剰間隙水圧比から沈下量を算定した(図-5)。

3.2 沈下量算定結果の再現性の確認

方法1と方法2で算定した沈下量と芸予地震における被災状況を比較して再現性を確認し、再現性が高い算定方法を用いて検討を行った。

方法1(図-4)と芸予地震における被災状況を比較すると、芸予地震の空港基本施設の被災状況がほぼ無被災なのに対して、方法1では滑走路・誘導路において最大25cm程度の沈下が発生し、沈下量を過大に評価する結果となった。

一方、方法2(図-5)と芸予地震における被災状況を比較すると、方法2の最大沈下量が10cm程度となり、概ね無被災を再現できた。

以上より、沈下量の算定方法は方法2とした。

4. 外周護岸の耐震性能評価

外周護岸の耐震性能評価では、FLIPによる二次元地震応答解析を実施して、外周護岸の変形に伴う背面土の沈下量を算定した。各地震動の護岸法線直角方向成分を求めて入力地震動とした。

芸予地震の解析結果(消波ブロック被覆堤)を図-6に示す。芸予地震における被災状況と比較すると、護岸変形量(水平:約19cm,鉛直:約5cm)は小さなものとなり、ほぼ無被災の状況を再現できた。

5. 空港の基本施設の耐震性能評価

基本施設の耐震性能評価は、液状化に伴う沈下量の算定及び外周護岸・地下構造物の耐震性能評価より得られた沈下量から勾配を求め、「空港基準」¹⁾に示された基本施設の規定勾配と比較することにより行った。地震作用後の滑走路中心位置において、

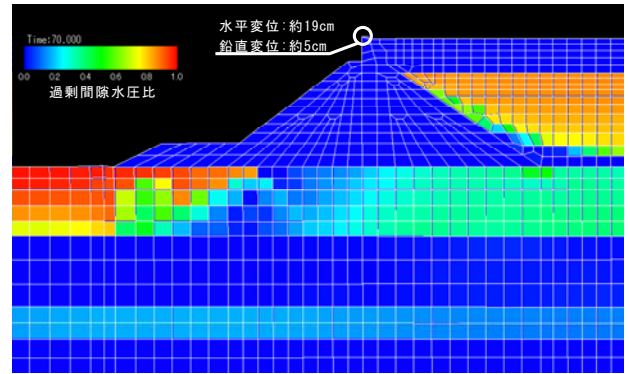


図-6 残留変形図例(芸予地震)

表-1 基本施設の規定勾配

	最大縦断勾配	最大横断勾配
滑走路	1.0%	1.5%
滑走路(末端から1/4以下)	0.8%	1.5%
過走帯	1.5%	2.5%
誘導路	1.5%	1.5%
エプロン	1.0%	1.0%

縦断方向の標高D.L.(m)を図-7に、縦断勾配を図-8に示す。図-8より、過走帯では東南海・南海,中央構造線及び直下型の各地震において、滑走路部では東南海・南海と中央構造線の各地震において、規定勾配を満足しない結果となった。

6. 地震毎の被害想定図の作成

液状化予測・判定,液状化に伴う沈下量,外周護岸・地下構造物の耐震性能評価及び空港基本施設の耐震性能評価の結果をとりまとめ,各地震動に対する被害想定図を作成した。ここで,作成例として,被害が最も大きな中央構造線地震の被害想定図を図-9に示す。

7. 空港機能の耐震性能評価

7.1 地震後に要求される性能

松山空港に要求される地震後の性能を以下のとおり想定した。

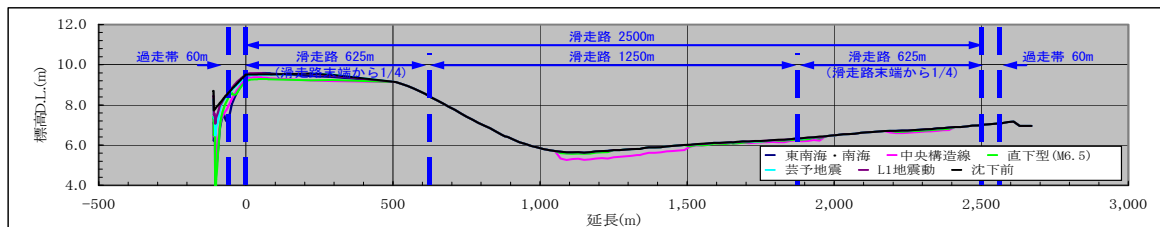


図-7 滑走路縦断図

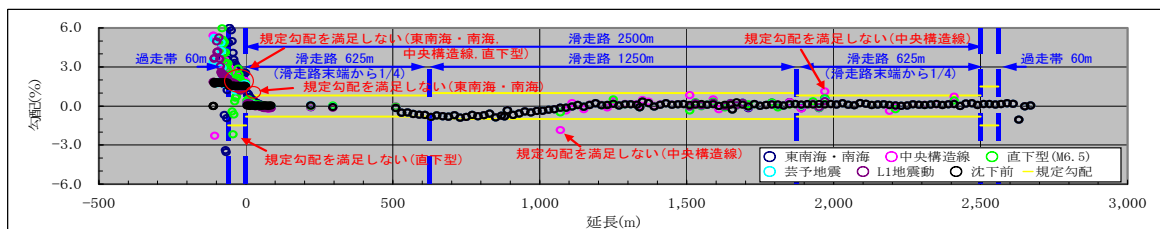


図-8 滑走路縦断勾配

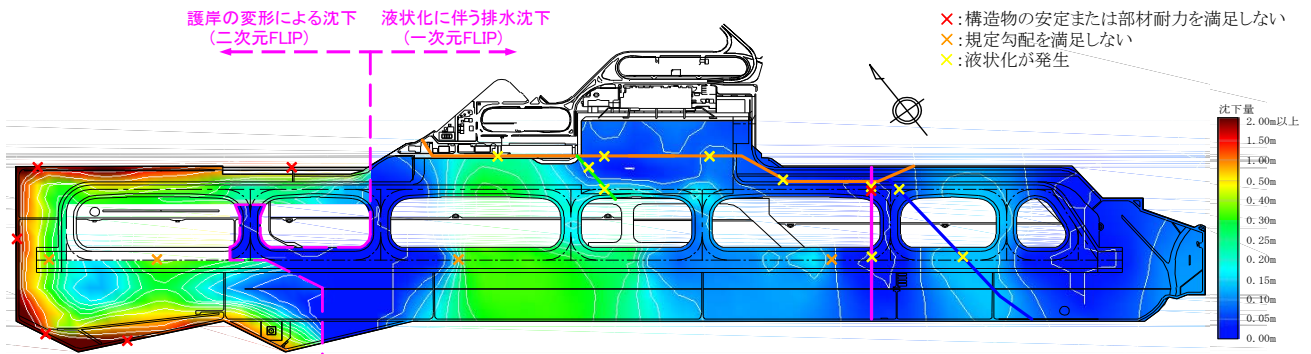


図-9 被害想定図 (中央構造線地震)

(1) レベル1地震動

レベル1地震動による損傷等が当該施設の機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさない使用性を確保するものとする。

(2) レベル2地震動

レベル2地震発生直後(地震発生後3日間程度)に、緊急物資及び人員の輸送拠点としての機能を確保するものとする。具体的には、空港の基本施設のうち、滑走路2,000m及び滑走路とエプロンを直結している取付誘導路(図-1に示すT-4 or T-5)、エプロンを使用することを想定した。ただし、航空機が回頭できることを前提条件とした。

7.2 空港機能の耐震性能評価

外周護岸・地下構造物及び基本施設等の耐震性能評価より、地震動毎の松山空港の耐震性能評価は、以下のとおりである。

(1) レベル1地震動に対する耐震性能評価

空港基本施設の地震後の地表面勾配は地震前の地表面勾配とほぼ同等であることから、地震後の航空機の離着陸は事前対策や復旧対策なしに可能となる。

(2) レベル2地震動に対する耐震性能評価

レベル2地震動のなかで、中央構造線地震の被害が最も大きく、耐震対策を実施しておかなければ航空機の離着陸ができない。

今後、松山空港の耐震対策を行う場合には、中央構造線地震に対して耐震対策を実施する必要がある。中央構造線地震に対する耐震対策を実施することで、他の地震動に対しても地震後に要求される耐震性能は確保される。

1) 東南海・南海地震に対する耐震性能評価

陸側滑走路の2,000mを使用すれば、地震後の航空機の離着陸は事前対策や復旧対策なしに可能となる。

2) 中央構造線地震に対する耐震性能評価

事前対策や復旧対策を行わなければ、地震後の航空機の離着陸は不可能である。

3) M6.5直下地震に対する耐震性能評価

事前対策や復旧対策を行わなければ、地震後の航空機の離着陸は不可能である。

4) 芸予地震に対する耐震性能評価

地震後の航空機の離着陸は事前対策や復旧対策なしに可能となる。実際の被災状況は、ほぼ無被災であり、復旧対策なしに滑走路は供用された。

8. おわりに

今後、松山空港の耐震対策を行う場合には、最も被害の大きい中央構造線地震に対して実施する必要がある。中央構造線地震に対して耐震対策を実施することで、他の地震動に対しても地震後に要求される耐震性能は確保される。耐震対策は、液状化を発生させないように地盤改良を行うことが最善であるが、滑走路等の液状化に伴う沈下を抑制して規定勾配を満足するために必要最小限となる地盤改良を行うことができれば、液状化(沈下)対策のコスト縮減も可能であると考えられる。

また、今回検討した被害状況を考慮して、緊急使用する滑走路の一部(2,000m)、誘導路及びエプロンの施設(航空機の移動経路)の設定や耐震対策の検討とともに、航空機離着陸の際の回頭方法(施設)についても検討する必要がある。

本検討においては、松山空港耐震性能評価技術検討委員会(委員長:善功企九州大学大学院教授)において委員の方々にご審議、ご指導をいただきました。ここに委員の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人 港湾空港建設技術サービスセンター:空港土木施設の設置基準・同解説, 2008.
- 2) 有限会社太田ジオリサーチ:EVS Environmental Visualization System,国土交通省新技術情報提供システム (NETIS), NETIS登録No. KK-050007-A, 2007.
- 3) 永瀬英生・石原研而・田部元太:多方向の不規則荷重を受ける砂の沈下特性, 第21回土質工学発表会, pp767~770, 1986.
- 4) 石原研而・吉嶺充俊:地震時の液状化に伴う砂地盤の沈下量予測, 第26回土質工学研究発表会, pp. 767-770, 1991.
- 5) 財団法人 沿岸開発技術研究センター:埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), 1997.