

液状化による地盤の不同沈下を考慮した滑走路の耐震性能評価

池内章雄*・稲田雅裕**・波多江裕司***・岸良安治*・小野寺隆柔*

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部

**前 国土交通省 九州地方整備局 博多港湾空港整備事務所長

***国土交通省 九州地方整備局 博多港湾空港整備事務所 前任建設管理官

地盤物性の違いによる液状化時の地盤の不同沈下は、土木構造物の被災状態を評価する上で重要である。しかし、この現象をFLIP等の二次元FEM解析で表現することは困難な場合が多い。本検討では、福岡空港を対象に、土質調査地点毎に液状化後の沈下量を算定、整理することで、地盤の不同沈下量を推定し、滑走路の耐震性能評価に反映させた。なお、液状化判定においては、地震継続時間等の波形特性を考慮することが可能な手法を適用した。

キーワード：液状化対策、不同沈下、レベル2地震動、地震波形の影響を考慮した液状化判定

1. はじめに

福岡空港は、2005年福岡県西方沖地震時に震度5強の揺れを受けたが、滑走路をはじめ空港基本施設に目立った地震被害は生じていない。一方で、福岡空港の西およそ4kmに分布する警固断層が活動した場合、マグニチュード7.2の地震が発生するとされており¹⁾、これを福岡空港が被りうる最大規模の地震に想定した耐震対策の検討が平成20年度から進められている。

福岡空港は、那珂川および御笠川沿いの沖積低地上に立地し、工学的基盤である風化花崗岩、沖積層下に分布する洪積層の出現深度が複雑なため、液状化対象層である沖積砂層の層厚や土質は空港敷地内で大きく変化する。このため、地震時に液状化が発生した場合、地盤の不同沈下が空港施設に与える影響が懸念される。滑走路のように長大な土木構造物の耐震性能は、地震時の変形照査により評価するのが一般的である。しかし、その際に用いられるFLIP等の二次元FEM解析では、地盤を連続体として取り扱うため、地層毎にモデルや定数がある程度簡略化され、N値などの土質特性のばらつきに起因する地盤の不同沈下を表現することは困難なことが多い。宮田ら²⁾は、確率論的手法により不同沈下を表現する研究を行っているが、実際の構造物について勾配や段差を照査する段階には至っていない。

また、福岡空港の滑走路では、現在のアスファルト舗装下に米軍建設時のコンクリートスラブが存在することが分かっており、地震時の地盤変形や不同沈下が滑走路面に与える影響は、アスファルト舗装のみの場合とは異なるものと考えられる。

一方で、福岡空港は2005年福岡県西方沖地震によって震度5強の揺れを受けたものの、液状化による被害を受けておらず、この状況を液状化判定・予測の指標に反映させ、レベル2地震動を評価する必要

がある。また、地震継続時間が長いレベル2地震動では、有効な繰返し回数などの波形特性が液状化の発生に影響すると考えられており、この点について、先ごろ港湾空港技術研究所の山崎らにより液状化判定の補正手法³⁾が提案されている。

以上の課題を踏まえ、沖積砂層が厚く、概略検討において地震時の液状化による被災が懸念された滑走路の北半部(図-1)を対象に、地盤の不同沈下を考慮した滑走路の耐震対策を検討した。

2. 液状化判定および評価

2.1 対象地震動および液状化判定方法

液状化判定において、地震応答解析に用いるレベル2地震波形は、警固断層を震源として福岡空港のサイト特性から設定した(図-2下)。

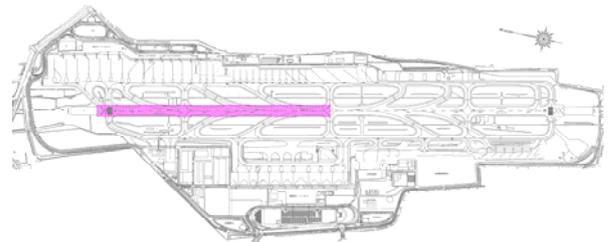


図-1 検討範囲(福岡空港滑走路)

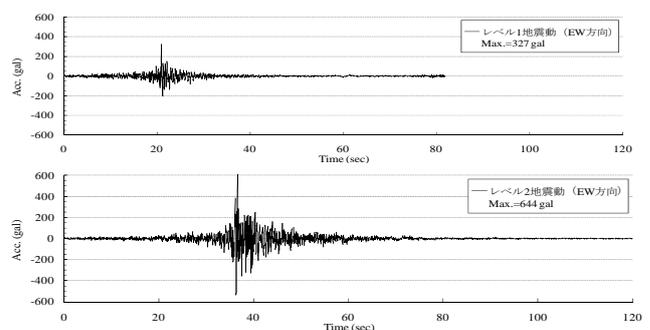


図-2 地震波形

(上：福岡県西方沖地震，下：レベル2地震動)

レベル1地震動とした福岡県西方沖地震の波形(図-1上)と比較すると、最大加速度が644galと大きく、地震動の継続時間が長い。

港湾施設及び空港施設の液状化検討では、等価加速度-等価N値関係により予測・評価する手法が一般的に用いられる⁴⁾。しかし、この手法では、等価N値については土質(細粒分含有率: F_c 、塑性指数: I_p)による補正がなされるが、外力となる等価加速度はSHAKEなどの地震応答解析により求まる地震時の最大せん断応力(τ_{max})によって決まるため、地震毎の波形の違いによる影響が考慮されていない。

本検討では、2005年福岡県西方沖地震と想定レベル2地震動の違いを液状化判定に反映させるために、港湾空港技術研究所の山崎らが提案する手法³⁾を用いて、波形の影響を考慮した液状化判定を行った。

この手法では、波形の影響を定量化した有効波数(N_{ef})を定義した上で、波形補正係数(c_a)を求め、外力(等価加速度)を補正する。なお、液状化の予測・判定は、補正した等価加速度を用いて、等価N値-等価加速度関係から行う。

なお、液状化判定は検討区間でこれまでに行われた土質調査実施箇所(26地点)を対象とした。

2.2 福岡県西方沖地震を踏まえた評価

福岡空港では、2005年福岡県西方沖地震の際に液状化による目立った地震被害は生じていない。このことを評価するために、まずは福岡県西方沖地震の波形を用いた液状化判定を行った。判定結果を地層毎に整理し、図-3に示す。波形の影響を考慮して等価加速度を補正することにより(図-3の黒塗点)、等価N値-等価加速度関係上のプロットは液状化しにくい方にシフトしたことが分かる。また、等価N値が大きいほど補正量が大きい傾向が示される。

等価N値-等価加速度関係における「液状化する」「液状化しない」の境界(しきい線)は、過去の地震による被災事例から設定されたもので、通常はII-IIIの境界をしきい線とすることが多い。福岡空港では、図-3に示すようにI-IIの境界をしきい線と考えることで、沖積砂層(As層)以外のほとんどが「液状化しない」判定となり、2005年地震時の状況と合う評価となる。

この場合も、沖積砂層(As層)では「液状化する」

と判定される点が残るものの、地点別にみると1点ないし2点(層厚にして1~2m程度以下)であり、沖積砂層全体に対して限定的なため、液状化による顕著な被害は現れなかったものと考えられる。

過去の事例から、液状化による顕著な被害は、過剰間隙水圧が周囲に広く伝播し、地盤全体として液状化したときに現れると考えられる⁴⁾。したがって、本検討では液状化による顕著な被害が生じる条件として、沖積砂層(As層)が「地盤全体として液状化する」こととし、この評価の目安として「液状化する」と判定される沖積砂層の層厚が2.5m以上であることとした。

この考えに基づき、レベル2地震動における液状化判定結果を地点毎に評価すると、滑走路北西部の5地点で沖積砂層が地盤全体として液状化すると評価される(図-4)。これ以外の地点は、液状化が発生するとしても部分的で層厚が薄いため、顕著な被害には至らないと考えられる。ただし、滑走路の北側では、滑走路横断方向に液状化程度が大きく異なることになるため、不同沈下による地盤の傾斜や凹凸、段差を生じる可能性がある。この点については、次項で述べる。

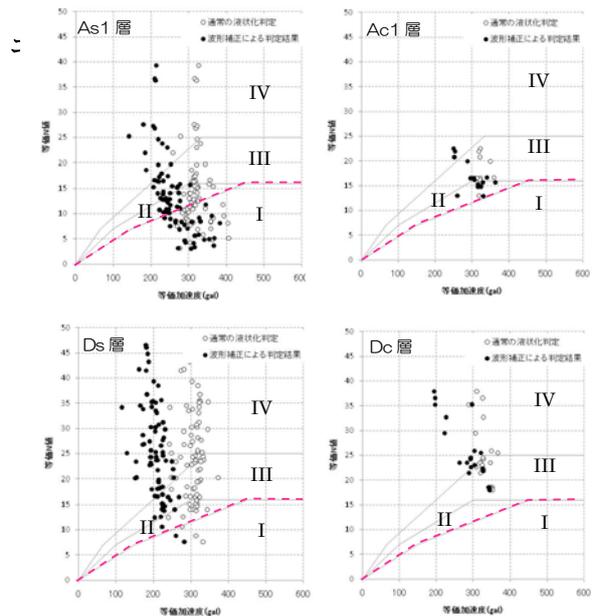


図-3 福岡県西方沖地震波形による液状化判定結果
As1層: 沖積砂層, Ac1層: 沖積粘土層,
Ds層: 洪積砂層, Dc層: 洪積粘土層



図-4 レベル2地震動において沖積砂層(As層)が地盤全体として液状化すると評価される地点

3. 液状化による地盤の不同沈下

液状化に伴う地震時の変形照査は、FLIP等の二次元FEM解析によって求めることが多い。しかしながら、FEM解析では、地盤を連続体として取り扱うため、地層毎にモデルや定数が均一化され、地点毎に物性にばらつきが生じたとしても、それによる沈下量の違いを表現することは困難なことが多い。福岡空港では、液状化層厚が大きく変化するとともに、N値や細粒分含有率(F)にもばらつきが見られるため、土質調査地点毎に個別に沈下量を算出、整理することで液状化に伴う地盤の不同沈下を把握することとした。

各地点の沈下量は、液状化安全率(F_L)と体積歪(ε_v)の関係を整理した石原らの資料⁵⁾(図-5)および液状化層厚(h)から次式により算出した。

$$\text{液状化後の沈下量}(\Delta) = \text{体積ひずみ}(\varepsilon_v) \times \text{液状化層厚}(h)$$

ここで、液状化安全率(F_L)は、液状化判定結果から判定深度毎に次式により求めた。

$$\text{液状化安全率}(F_L) = F_L = \frac{(N)_{65}}{N^*}$$

(N)₆₅ : 液状化判定深度での等価N値

N* : 液状化判定深度における等価加速度に対するI-IIの境界での等価N値(限界N値)

なお、液状化判定において沖積砂層が地盤全体として液状化すると評価された地点(図-4)については、地震時に過剰間隙水圧が伝播し、著しく液状化すると考えられるため、その地点で算定される体積歪の最大値と沖積砂層の全層厚の積により推定最大沈下量を算定した。

図-6に各地点におけるレベル2地震動による沈下量を示す。また、沈下量の分布を面的に整理すると、滑走路の北側において、沈下量が大きく、不同沈下を生じる可能性が高いことが示される(図-7)。

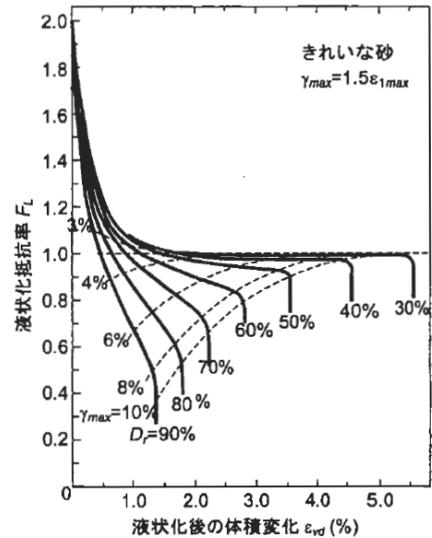


図-5 液状化安全率(F_L)と液状化後の体積歪関係⁵⁾

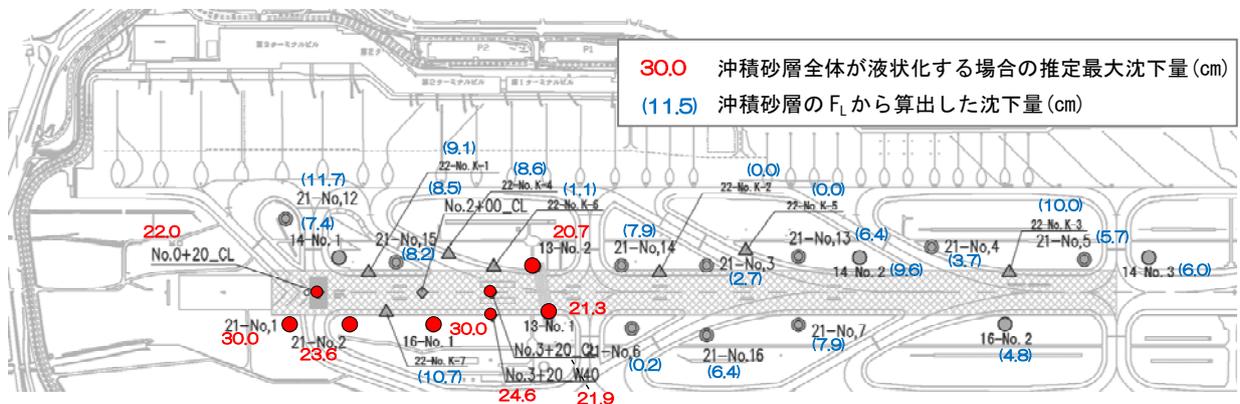


図-6 各地点におけるレベル2地震動による沈下量の算定結果

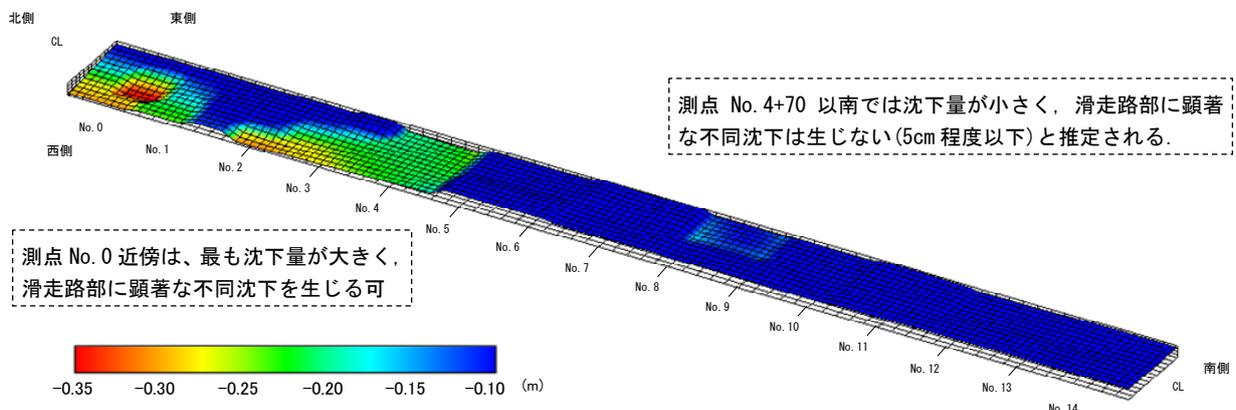


図-7 対象範囲の沈下量分布の三次元イメージ

4. 地盤の不同沈下による滑走路への影響

福岡空港の滑走路では、現在のアスファルト舗装下に米軍建設時のコンクリートスラブが存在する(図-8)。コンクリートスラブは、アスファルト舗装のように不同沈下による地盤の変形に追随せず、そのためスラブと路盤の間に空隙(空洞)を生じる可能性がある。この場合、液状化が発生しても滑走路表面に直接変形は現れないものの、空隙上に航空機荷重が载荷された時に発生する応力による舗装版の陥没や破壊が問題となる。

本検討では、「ある範囲における沈下量の最大-最小値の差」≒「地盤の不同沈下量」≒「スラブと路盤の間に生じる空隙(空洞)の大きさ」と考え、不同沈下による滑走路への影響を検討した。

土田ら⁶⁾は、数値シミュレーションによる地盤の不同沈下予測に基づき、様々な舗装形式における影響の現れ方を検討しており、この中でコンクリートスラブ下の空隙について、約6cmの沈下(空隙)上に航空機荷重が载荷(二脚载荷)されると空港舗装コンクリートの設計基準曲げ強度(5,000kN/m²)に相当する応力が発生している。したがって、コンクリートスラブがあることで地盤の不同沈下の影響が舗装表面の変形として現れない場合も、約6cm以上の不同沈下が想定されるときは、航空機荷重の载荷により舗装版の陥没や破壊を生じる可能性が高いと考えられる。

本検討では、土田らの研究および本検討における不同沈下量の推定精度を考慮し、福岡空港においては液状化により5cm程度以上の不同沈下(舗装版下の空隙)が想定される場合、舗装版の陥没や破壊を生じ、航空機の運航に影響を及ぼすと評価することにした。

5. 耐震対策範囲の検討

検討結果を踏まえ、①沖積砂層が地盤全体として液状化する、②液状化により5cm程度以上の不同沈下(舗装版下の空隙)を生じる、ことに着目して被災範囲を想定し、耐震整備範囲を検討した(図-9)。この際、液状化層下面の傾斜に基づき、地盤の側方流動が発生する可能性についても整理し参考とした。

この結果、福岡空港におけるレベル2地震動による被災想定範囲は、滑走路北側の起点から470mの区間となる。



図-8 福岡空港における滑走路舗装の標準的な構成

6. おわりに

土質にばらつきがある場合や成層が複雑な地盤では、液状化に伴う地盤の不同沈下が問題となる。しかし、FEMによる変形解析ではこの現象をうまく表現できない場合が多い。本検討では、既存の手法を組み合わせることで、地盤の不同沈下を耐震性能評価に反映させることを試みた。ここで報告したのは一つの事例であるが、対象地盤や構造物の特徴を踏まえ、適切な手法と評価基準を適用することが必要である。

参考文献

- 地震調査研究推進本部：警固断層帯の長期評価について。
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/07mar_kego/index.htm, 2007.
- 宮田正史・井合 進・一井康二：液状化による不同沈下の予測手法の開発。港湾技研資料, no. 908, 1998.
- 山崎浩之・江本翔一：地震動波形の影響を考慮した液状化の予測・判定に関する提案。港湾空港技術研究所報告, 49-3, 2010.
- 「埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)」。財団法人沿岸開発技術研究センター, 421p, 1997.
- Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. Soils and Foundations, 28-1, 1992.
- 土田 孝・小野憲司：数値シミュレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用。港湾技術研究所報告, 27-4, 1988.

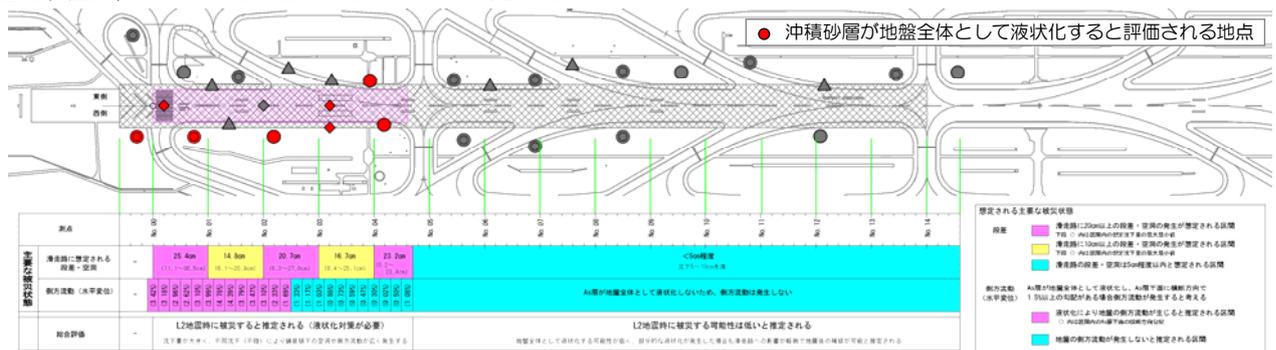


図-9 福岡空港におけるレベル2地震動による被災想定結果