東京国際空港における基本施設の液状化判定方法について

大村 厚夫*·池内 章雄**·大橋 照美***·小野寺 克幸****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

**(一財)沿岸技術研究センター 調査役

*** 前 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 先任建設管理官 **** 前 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 設計室係長(空港担当)

東京国際空港用地は、軟弱・不均一で地下水位が高く、地震時の過剰間隙水圧消散時間が比較的長くかかる細粒分の多い埋立造成地盤である。このため供用中の基本施設(滑走路、誘導路およびエプロン)の用地に対する液状化判定については、これら埋立履歴や土質性状を考慮した実務的な液状化予測・判定方法が採用されている。

本稿では,東京国際空港における液状化判定方法の概要と特徴について報告する. キーワード: 液状化予測, 液状化判定, 羽田シナリオ波, 石原らの方法

1. はじめに

東京国際空港は、昭和59年より始まった沖合い展開事業により I ~Ⅲ期に分けて段階的に整備され、新A~C滑走路が供用されている. 現在では、再拡張事業で完成したD滑走路の供用開始によって発着能力が大幅に増強され、国内航空ネットワークの基幹空港としての重要性が更に大きくなっている.

空港用地は、廃棄物処理場跡地であり、軟弱な粘性土層の上に浚渫へドロや建設残土を埋立てて造成した不均一な地盤で、地下水位もG.L.-3.0m程度と高い状態にある.レベル2地震発生時にも空港機能を維持することが求められており、全体的な航空機動線を確保できるよう、現在も耐震整備計画に基づきC誘導路等の液状化対策が継続されている.

なお、耐震対策に関する委員会は、平成9年度から継続的に開催されており、この中で対策工法の設計・施工法、液状化判定・対策範囲設定方法等が提案され、実施設計時の対応方法として取り込まれている.

2. 東京国際空港における液状化判定方法

東京国際空港の土木施設に求められる地震動レベル と耐震性能は以下の設定となっている.

表-1 地震動レベルおよび耐震性能の考え方

20 - 2223				
地震動レベル	いし レベル1 レベル2			
	羽田シナリオ波(羽田空港州)が ナルの設定)			
入力地震動	確率論的地震危険度解析に基づく	半経験的方法(経験的グリーン関数		
	再現期間 75 年の地震動	法)に基づく最大級の地震動		
最大基盤加速度	80. 4Ga l	EW: 487Gal ∕NS: 463Gal		
耐震性能	航空機の運航に必要な機能に影響	人命, 財産または社会経済活動に重		
(被害程度)	を与えないこと	大な影響を与えないこと		

2.1 耐震性照査フロー

液状化判定は、「埋立地の液状化対策ハンドブック」 および「港湾基準」に準じているが、埋立履歴や施設の 重要度などを考慮して、独自の基準・手法を定めて検討 を行っている. 耐震設計照査のフローを図-1 に示す.

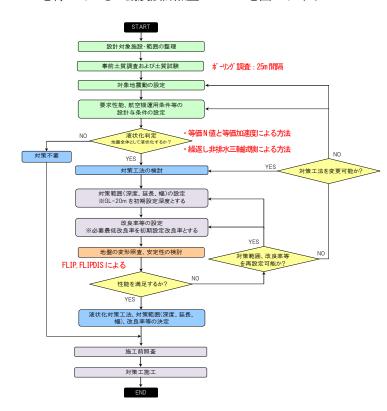


図-1 基本施設の耐震設計照査フロー図 1)

2.2 事前土質調査および土質試験

(1) 原位置試験

- ①ボーリング調査:詳細調査ボーリングは25m間隔を基本とし、工学的基盤層 (N値≥50, Vs≥300m/sec) は概ね200m間隔で確認する.
- ②標準貫入試験:深度1m毎の実施を基本とする.
- ③PS 検層:基盤層確認調査地点において、S波・P 波速度を調査する.

(2) 土質試験

- ①粒度試験:細粒分含有率 Fc を把握することで等価 N値の補正を行うための資料とする.
- ②液性・塑性限界試験: F_c が15%以上の土に対して 塑性指数 I_p を把握し、等価Nを補正するための資料 とする.
- ③繰返し非排水三軸圧縮試験:土の液状化強度を把握し、液状化判定(詳細判定)の基礎資料とする。また、動的変形特性($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$)を把握し、地震応答解析の基礎資料とする.

2.3 入力地震動 (羽田シナリオ波)

平成20年度以降の設計では、羽田シナリオ波について検討を行っている。図-2にNS方向とEW方向のレベル2地震波形を示す。なお、レベル2地震動については、軌跡図およびフーリエスペクトル図等で明確な強軸方向が見られないことから、液状化判定ではNSおよびEWの2方向波形により検討を行っている。

なお,最大加速度の強軸方向を含む5方向成分に対する地震応答解析結果を図-3に示す. 液状化検討対象となるG.L.-20m以浅では,最大せん断応力,等価加速度の差異は小さいことが解る.

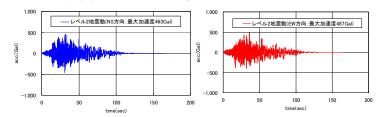


図-2 羽田シナリオ波 L2 (NS 方向・EW 方向)

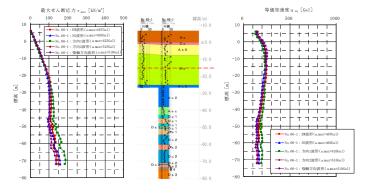


図-3 羽田シナリオ波 L2 の地震応答解析結果(例)

2.4 簡易判定方法

簡易判定に必要な等価N値と等価加速度の算定は、港湾基準(平成24年8月部分改訂)に準じているが、細粒分含有率(F)に応じた等価N値の補正については、実務的方法として補正係数(β)を設定している.

(1)等価加速度

等価加速度は、地盤の地震応答計算により求まる最大せん断応力の時刻歴を用いて算定する.

$$\alpha_{\rm eq} = 0.7 \ (\tau_{\rm max}/\sigma_{\rm v}) \cdot g \cdot (1/C_{\alpha})$$

ここに、 $\alpha_{\rm eq}$: 等価加速度(Gal)、 $\tau_{\rm max}$: 最大せん断応力(kN/m²)、g:重力加速度(980Gal)、 $\sigma_{\it v}$: 有効上載圧力(kN/m²)、 C_a : 波形補正係数

(2) 等価 N値

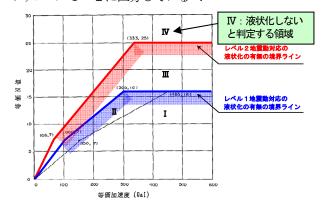
等価 N値は、次式により算定を行う.

$$(N)_{65} = \{N - 0.019(\sigma_{v}-65)\}$$

 $/\{0.0041(\sigma_{v}-65)+1.0\}$

ここに, (N)₆₅: 等価 N値, N: 土層の N値, σ': 有効上載圧力(kN/m²)

(3)等価N値と等価加速度による液状化予測・判定対象土層の等価N値と等価加速度が, $I \sim IV$ のどの範囲にあるかを判断する。港湾基準に準じており,判定のみレベル $1 \cdot 2$ に区分している 2.



判定	粒度とN値によ	粒度とN値による液状化判定		
結果	る液状化予測	レベル1	レベル 2	
I	液状化する	液状化すると判定する	液状化すると判定する	液
П	液状化の可能性 が大きい	液状化すると判定するか、繰返し 三軸試験結果により判定する	液状化すると判定するか、繰返し三軸試 験結果により判定する	液状化する
Ш	液状化しない可 能性が大きい	液状化しないと判定する	液状化すると判定するか、繰返し三軸試験結果により判定する。 構造物に特に安全を見込む必要がある場合は、液状化すると判定するか、繰返し 三軸試験により判定する。	すると判定
IV	液状化しない	液状化しないと判定する	液状化しないと判定する	

図-4 等価 N値と等価加速度による判定区分

(4) 細粒分を多く含む場合の N値の補正

細粒分(粒径が75 μ m以下の成分)を5%以上含むものについては、等価N値の補正を行い、補正後の等価N値を用いて判定する。補正は以下の3ケースの場合に分けて行う。

ケース	塑性指数 I_p		細粒分含有率 F _c
1	10 未満 or なし	あるいは	15%未満
2	10以上20未満	かつ	15%以上
3	20 以上	かつ	15%以上

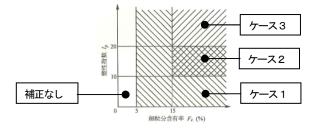


図-5 N値の補正方法と F_c 及び I_p の関係ケース1:等価N値(補正後)= $(N)_{65}/\beta$ ただし、 β は図-6の値を適用する.

ケース2:等価 N値(補正後)

= $\{(N)_{65}/0.5\}$ 及び $\{N+\Delta N\}$ ここで, $\Delta N = 8+0.4(I_p-10)$

ケース3:等価N値(補正後) = $\{N+\Delta N\}$ ここで, ΔN = $8+0.4(I_0-10)$

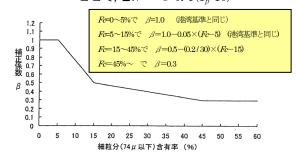


図-6 Fに応じた等価N値の補正係数 β

2.5 詳細判定方法(石原らの方法)

(1)液状化安全率 F_t

繰返し非排水三軸試験による予測・判定は, 簡易判定の結果がⅡあるいはⅢ判定の深度において実施する.

なお、液状化の予測・判定は以下で求められた液状化 安全率F,を用いて行う.

$$F_L = R_{\text{max}} / L_{\text{max}}$$

- F_L≥1.0の時:液状化しないと判定
- F,<1.0 の時: 液状化すると判定
- (2) 最大せん断応力比 Lmx の算定方法

検討する深度における最大せん断応力比 L_{max} は次式により求める.

$$L_{\max} = \tau_{\max} / \sigma_{v}$$

ここに、 τ_{dist} : 任意の深度におけるせん断応力の 最大値(kN/m^2)で地震応答解析により求め る. σ_{v} : 有効上載圧力(kN/m^2)

(3)液状化強度比 Rmx の算定方法

液状化強度比 R_{max} は、次式により求める.

 $R_{\text{max}} = (0.9/C_k) \cdot \{(1+2K_0)/3\} \cdot (\tau_{\ell}/\sigma_c)_{\text{NR}=20}$ ここに、 C_k : 換算係数(波形パターンから次表より求める)、

K_o: 静止土圧係数(計測値.ただし計測値が無い場合には K_o=0.5 とする.)

(τ_ℓ/σ_c')_{№ =20}: 繰返し回数が 20 波の時の繰返しせん断応力比(ひずみ両振幅が 5%の時を基準とする.)

波形パターン		ーン	定義	換算係数 Ck	
	衝	撃	型	最大せん断応力が起こる側の波形のみを考えるとして、 τ_{\max} の6割以上の振幅をもつ波頭が、 τ_{\max} の起こる以前に2つ以下しか存在しない場合	0. 55
	振	動	型	3 つ以上の波頭が、 τ_{\max} が通過する以前に、 τ_{\max} の大きさの 6 割以上の振幅をもっている場合	0.70

2.6 液状化の対策範囲

(1) 地盤全体としての液状化の有無の判定

レベル2地震動に対する地盤全体としての液状化 判定基準は、「埋立地の液状化対策ハンドブック」を参 考に以下のように定めている.

レベル2地震動

各深度の I ~IVの判定結果に対し、

- I~Ⅲの判定結果が2点連続するケース
- Ⅰ~Ⅲの判定結果が3点以上となるケース

上記のいずれかの場合には、「地盤全体として液状化する」と判定する。

ただし、レベル1では表中「Ⅰ~Ⅲ」を「ⅠまたはⅡ」に読替える

(2) 液状化対策範囲の設定

中抜き施工が可能な静的圧入締固め工法の場合には, 以下の基本方針と設定パターンで対策範囲を設定している.

基本方針 1): I・Ⅱ・Ⅲが2深度以上連続する範囲を対策深度に設定す

基本方針 2): Ⅰ・Ⅱ・Ⅲが2深度以上存在する地層において,各地層で

最上部と最下部のⅠ・Ⅱ・Ⅲで囲まれる範囲を対策深度に 設定する

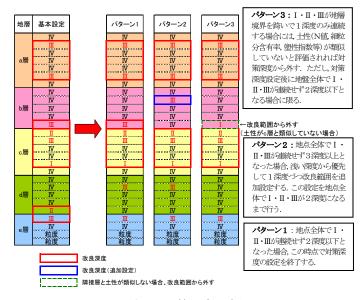


図-7 液状化対策深度設定例

(3) 対策下端深度の考え方

G. L. -20m 以浅が液状化する場合には,全ての液状化層を対策することを基本とする. ただし,改良対象深度が G. L. -20m 以深まで及ぶ場合には,液状化が地表面の変形や安定性へ与える影響を照査して,合理的に対策深度を決定するフローが設定されている.

(4) 余改良域の考え方

静的圧入締固め工法における余改良域については、 地盤改良域と周辺未改良域との緩衝領域として設定されてきたが、既往の模型振動台実験や現場液状化実験等の知見に基づき、耐震性能(液状化後の地盤支持力や規定勾配)が大きく損なわれる場合を除き、余改良域を設けないことが基本となっている³.

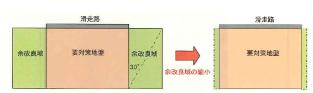


図-8 余改良幅縮小のイメージ

3. 対応方法の検証結果

3.1 細粒分含有率 F.による補正係数 B

(1) 補正係数 βの設定経緯

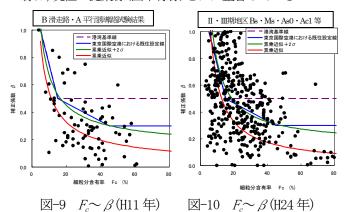
東京国際空港内の液状化対象地盤は、細粒分を多く含み、塑性指数が 10 以下の低塑性な土が多いという特性がある. 当時の検討では、港湾基準に示されている N値・粒度による液状化判定結果と繰返し三軸試験による判定結果の間に不整合が生じていた.

この理由として、港湾基準では低塑性な土の場合、細粒分含有率 F_c が 15%以上になると補正係数(β)が 0.5 で一定になることが考えられた。この問題点を見直すため、当時の委員会では F_c ~ β の関係を図-9 に整理した。各プロットの回帰線(図中赤線)から標準偏差の 2 倍を加算して安全性を配慮した線が図中緑線である。 F_c = 15%を超えると港湾基準の線との間に大きな差異が見られた。これにより、東京国際空港ではより整合性の高い β を与えることのできる図中青線で細粒分補正を行い、補正後の等価 N値を算定している。

なお、この $F_c \sim \beta$ 関係の整理方法については、参考文献 4) を参照のこと.

(2) $F_c \sim \beta$ 関係の検証結果

図-10 はII・III期地区の $F_c \sim \beta$ 関係を示している。プロットにばらつきがあるものの平均 $+2\sigma$ を示す図中緑線は、既往の提案線(図中青線)とほぼ整合している。



3.2 繰返し三軸試験結果の援用

繰返し非排水三軸試験が実施されていない地点に対して液状化の詳細判定を実施する際,①~④の全てに適合する場合に,近隣他地点の三軸試験結果を援用して液状化判定を行っている.

- ①近隣の同一地層であること
- ②粒度分布の差異が通過百分率で10%以内であること
- ③細粒分含有率 F.の差異が 5%以内であること
- ④等価 N値の差異が 2程度以内であること

なお、援用可能な資料がない深度については、安全側 を配慮して「液状化する」と判定している.

援用条件に適合する各試料の液状化強度比 R120の相

関を図-11 に示す. プロットは45 度ラインの近傍にあり、比較的良い相関関係を示している.

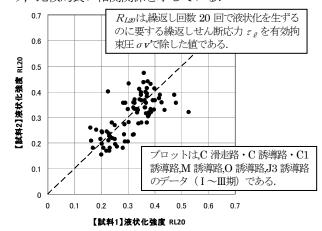


図-11 援用条件試料の液状化強度相関図

4. 今後に向けて

本業務を通じて、東京国際空港における液状化対策 の考え方が整理・確認されたが、今後の耐震対策方法に ついて課題が残されている.

(1) 事前土質調査

ボーリング調査間隔が25mであることから、液状化判定結果に基づく対策範囲についても、ボーリング中間点で区分している。今後は、物理探査やサウンディング調査と組合せることにより、土層区分・調査の精度向上を図り、対策範囲をより合理的に決定できる事前調査方法の組合せを構築する必要がある。

(2) 新規地盤改良工法

供用施設の液状化対策工法として,主に静的圧入締固め工法および溶液型薬液注入工法が採用されている. 今後は、地盤性状や構造物との近接状況,施設の運用状態から規定される施工形態に適した,より経済的・効率的な対策工法の現地適用性確認の実施が期待される.

5. 謝辞

本稿は、国土交通省関東地方整備局横浜技術調査事務所発注の「平成24年度 東京国際空港基本施設耐震対策検討業務」の一部を取まとめたものである.

業務にあたっては、「東京国際空港基本施設耐震対策 検討業務検討会」メンバー及び関係者から貴重なご意 見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上 げます。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修, (財) 沿岸技術研究センター: 埋立地 の液状化対策ハンドブック(改訂版), 1997.
- 2)国土交通省港湾局監修、(社)日本港湾協会:港湾の施設の 技術上の基準・同解説、平成19年7月.
- 3) 空港土木施設耐震設計要領及び設計例, 平成20年7, SCOPE, 例-3 液状化対策範囲の検討例.
- 4)善 功企:低塑性な細粒分を多く含む地盤の液状化判定 (E-8 1167),第35回地盤工学研究発表会,2000年6月.