

新千歳空港における 土木施設の耐震対策について

加藤 幸輝¹・青井 晃樹²

^{1,2}北海道開発局 札幌開発建設部 千歳空港建設事業所 (〒066-0012 北海道千歳市美々)

2004年新潟中越地震においては、道路・鉄道等の基幹交通網が甚大な被害を受け地上交通ネットワークが一時的に損なわれた。その際、新潟空港ではきわめて早期に運用が再開されたため、救命救急活動・緊急物資輸送の拠点となっただけでなく地上交通ネットワークの代替機能も発揮し、災害時における空港の役割・機能が地域経済等にとっても非常に重要であることが広く市井に認識されたところである。この様な背景のもと、全国各地の拠点空港においても空港施設の耐震対策が進められている。

本報告では、新千歳空港における災害時の空港のあり方に関する基本方針の概要を述べるとともに、空港土木施設の耐震照査・耐震設計の概要及びそれら結果に基づいて現在施工中の地下道ボックスカルバートの耐震対策工事について報告するものである。

1. はじめに

新千歳空港の滑走路・誘導路等の基本施設直下には、道路・河川・鉄道等のボックスカルバートやその他の土木施設が多数埋設されて横断しており、大規模地震により地下構造物が被災した場合、空港基本施設の損傷によって空港機能に障害が生じるだけでなく、地域の経済活動等に甚大な影響を及ぼすことが懸念される。しかしながら、これら施設は総じて整備年次が古いために活断層直下型等の大規模地震を想定した耐震性能については照査されていない状況であった。

この様な状況のもと、平成19年度に「新千歳空港防災拠点あり方検討委員会」「新千歳空港耐震技術検討委員会」が設置され、空港施設の耐震化に必要な各種検討がおこなわれた。

本文では、それら委員会の検討事項であった新千歳空港における災害時のあり方から空港基本施設の耐震照査・耐震対策設計に至る概要、及び現在実施中の耐震対策工事について報告する。

2. 災害時における新千歳空港の役割

(1) 想定地震の選定

災害時に空港が防災拠点としての役割を果たせる活動対象範囲は、空港を起点として半径100kmの範囲としている。これは、空港から被災地までヘリコプターによる輸送を前提とした範囲限界である。この考え方を基に、

当該活動範囲圏内にて被害発生が予想される地震を各計画（地震調査研究推進本部による計画、地域防災計画等）より抽出した後、地震の種類・位置・規模・発生確率等を総合的に勘案し、「石狩低地東縁断層帯」を被災想定の対象地震として選定している。この地震の被災規模は兵庫県南部地震と同程度になると考えられている。

なお、施設耐震照査用のシナリオ波としては、新千歳空港各施設の安定性にとって最も不利となる断層破壊モードを「石狩低地東縁断層帯」より設定しており、これについては後述する。

(2) 災害時に空港が確保すべき機能、必要となる施設

新千歳空港が災害時に確保しておくべき機能は以下の通りである。

①救命・救急活動等の拠点機能

（発災後きわめて早期の段階）

②緊急物資・人員等輸送受け入れ機能

（発災後3日以内）

③航空ネットワークの維持および背後圏経済活動の継続性確保（発災後3日を目標）

これらを念頭に災害時に必要となる空港施設の規模を検討すると、各段階ごとに図-1の通りとなる。

図-1から理解できる通り、ローディングエプロンの一部と高速脱出誘導路を除くほとんど全ての施設を3日を目標に供用する必要がある。実際の災害時における現場の混乱等を想像すると、広大な空港の大半を被災後に3日間で補修することはほぼ不可能であり、施設の重要度や要求性能等を考慮しながら極力被災を受けない施設整備（事前の耐震対策等）が必要となる。

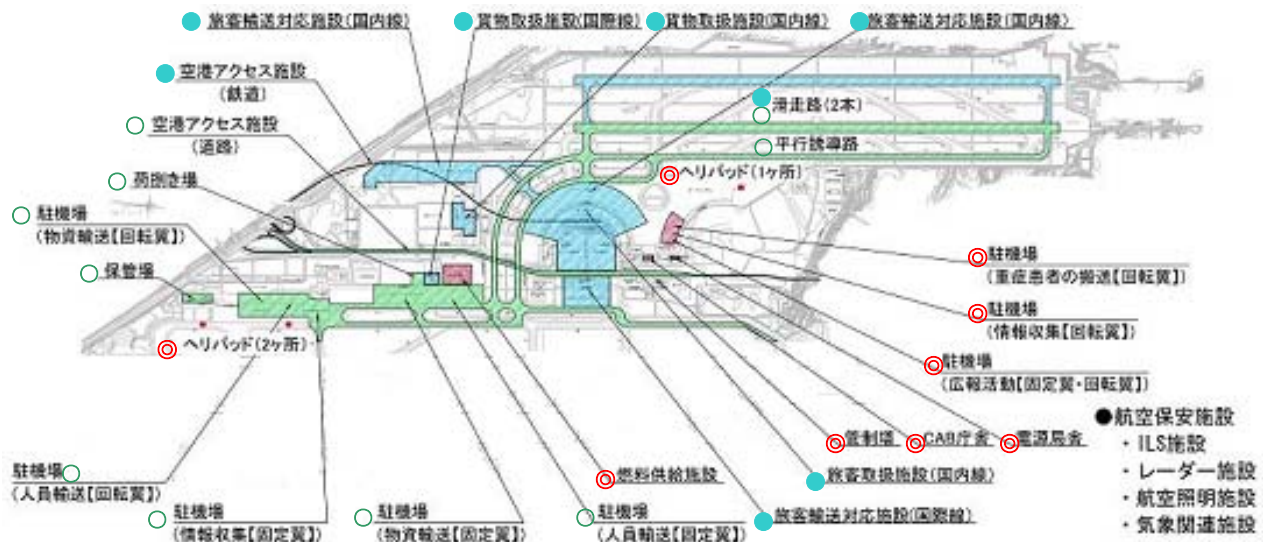


図-1 新千歳空港において災害時に必要となる施設規模 【凡例】 発災後 ①極めて早期に必要 ②3日以内 ③3日を目途

3. 地下構造物の耐震照査・耐震対策設計

(1) 新千歳空港の地形地質概要

本地域は、支笏火山（カルデラ；現在の支笏湖）とその外輪山である樽前山・恵庭岳の活火山を近傍に有している。それら火山は、太古よりの度重なる噴火によって周辺に広大な火砕岩台地を形成した。新千歳空港周辺地区はその東部に当たる。そのため、当該地区は厚い火山灰層に覆われており、その地形的特徴は極めて単調で一般に起伏に乏しい平坦な様相を呈する。

(2) 新千歳空港地点のサイト増幅特性

新千歳空港には地震計が3箇所設置されており、観測データが蓄積されている。それら観測記録には、当該地点の地形・地質、地盤構成等に起因する地震時における地盤震動に係わる多くの情報が含まれており、スペクトルインバージョン解析¹⁾を実施することにより、当該地点の地震基盤から地表までのサイト増幅特性を得た。

その結果、新千歳空港は一つのサイト内に属すること、また、そのサイトは低震動数（=長周期）の基盤波をより増幅する傾向を持つことが示された。

(3) Lv1地震動の算定

レベル1地震動の算定は、国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾施設研究室にご協力を仰ぎ、算定して頂いた。その手法²⁾は、同所のHP³⁾上に公開されている重要港湾、地方港湾におけるレベル1地震動と同様である。

なお、同手法によるレベル1地震動に関する確率論的地震危険度解析は、新千歳空港において設定する工学的基盤（GL-61.5mのDs層）より浅い位置を工学的基盤

（GL-21.3mのSpfl層中段）としておこなわれている。そこで、前者の新千歳空港における工学的基盤のレベル1地震動は、後者の地震動の重複反射理論による引き戻し計算をおこない算定し直している。

その結果、算定されたレベル1地震動は、参考までに過去の基準で算定される地震動（例えば、八戸波・大船渡波等）とを比較すると、概ね全ての固有周期Tに対してその応答値は小さくなった。また、算定されたレベル1地震動の最大加速度は73galであり、後述するレベル2地震動の最大加速度391galと比較しても十分に小さい。したがって、今回の耐震照査の対象となる地下構造物に関しては、レベル2地震動に対するその要求性能を満足することによって、レベル1地震動に対する要求性能は十分に満足する（包含する）様である。

(4) Lv2地震動の算定

新千歳空港地点において耐震性を照査する際に、影響が大きいと考えられる地震断層による強振動波形を経験的サイト特性・位相特性・因果性を考慮した強振動計算手法⁴⁾⁵⁾を用い、以下の3ケースについて算定した。

- ①石狩低地東縁断層帯・主部及び南部
（当該地点に隣接する地震断層）
- ②1968年十勝沖地震の震源
（海溝型大地震として同地震の再来を想定）
- ③当該地点直下でM6.5の地震
（レベル2地震動による最小限担保の地震動）

各種の比較検討をおこなった結果、当該地点における設計入力地震動は、石狩低地東縁断層帯・南部による地震動を基本とすることとした。図-2に石狩低地東縁断層帯・主部及び南部における想定地震断層・アスペリティを、図-3に南部による地震動の加速度波形を示す。

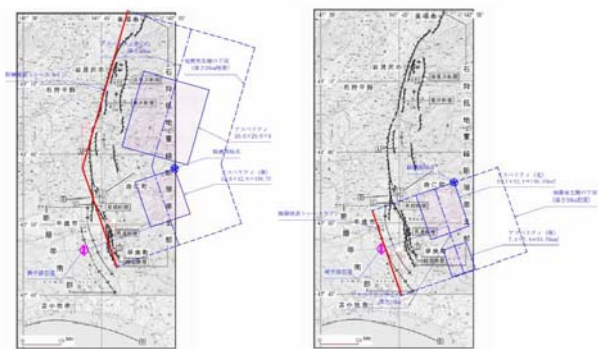


図2 石狩低地東縁断層帯・主部及び南部のアスペリティ

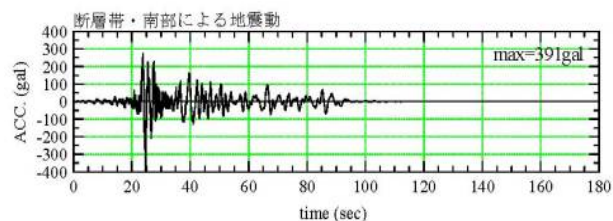


図3 石狩低地東縁断層帯・南部の加速度波形

また、図4には上記各レベル2地震動の速度応答スペクトルを示した。新千歳空港地点の地盤の特性値 T_G (=地震時における地盤の基本固有周期)は1秒程度であり、図4において固有周期 $T=0.7\sim 3$ 秒の範囲(地盤振動周期の内、施設などの地震被害に影響が大きいと考えられる振動周期範囲)に主眼を置くと、南部地震動による応答が卓越していることが理解できる。

さらに、図5には南部工学的基盤地震動の速度オービットを示した。その軌跡は概ね断層地表トレース線に対して直角方向を主軸とする楕円形を示すが、大きな振幅は断層直角方向と一致しない。一方、地下構造物についても横断方向の損傷モードを検討する場合は、断層方向との関係が重要となる。本検討においては、地下構造物の方向と地震動軌跡の関係を整理し、それぞれの構造物における耐震照査の際には、設計地震動の角度補正をおこなっている。

(5) 構造物照査手法

地震動による地盤振動や埋設構造物への影響を適切に評価するためには、地盤の動的変形特性の非線形性だけでなく構造物の非線形特性も含めたモデルを構築し、それらの相互作用を考慮する必要がある。新千歳空港の空港土木施設等の耐震性照査及び耐震補強計画における性能照査手法と評価の特徴は以下の通りである。

a) 解析モデル

工学的基盤から上位の地盤及び路面、埋設構造物を一体とした次元有限要素法でモデル化し、一体モデルでの動的解析をおこなった。具体的な解析コードとしては、2次元FLIPを使用している。

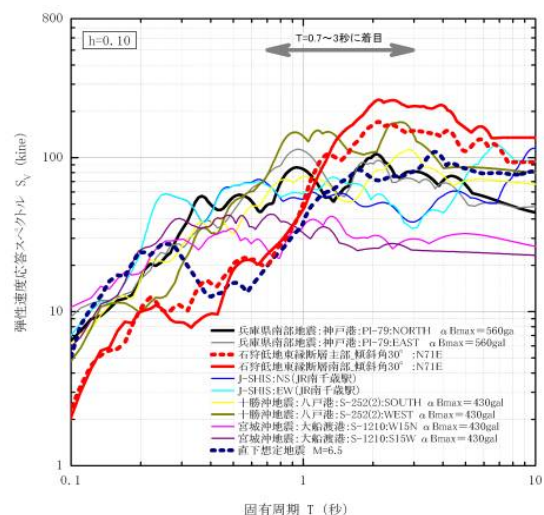


図4 各レベル2地震動の速度応答スペクトル

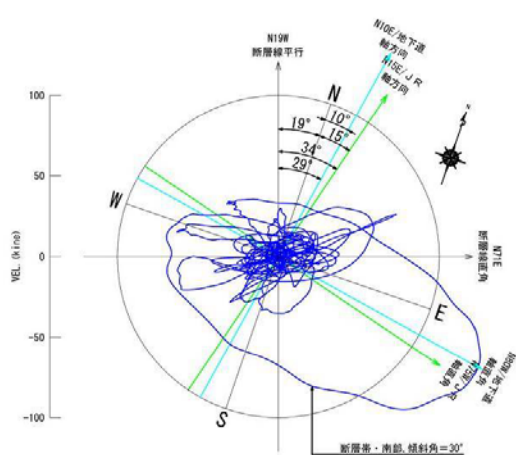


図5 南部地震動の速度オービットと断層線・構造物の関係

b) 地盤・構造物のモデル化

地盤は間隙水圧による影響(液状化)を評価可能な有効応力法を用いる。構造物(RC構造)は、その損傷程度が直接考慮できる履歴モデルとする。具体的には、修正武田モデルによる履歴則を採用した。

c) 評価基準

空港土木施設において耐震性照査・設計に係わる基準類に準拠し(旧設計指針や現設計要領等)、その評価をおこなった。地盤の液状化対策については、現在においても検討中であるので本報告での詳述は避ける。地下構造物については、主にその横断方向についてせん断力及び曲げモーメントの照査をおこなっており、具体的には式(1)及び図-6で示される。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} > \text{部材応答値(せん断力)} \quad (1)$$

V_{yd} : 設計せん断耐力

V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力

V_{sd} : せん断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力

※コンクリート標準示方書より

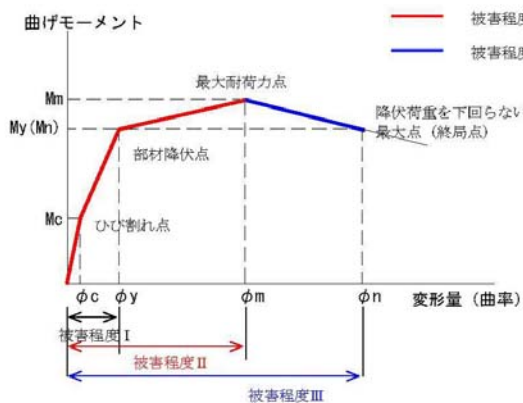


図-6 M-φと被害程度の関係

ここで図-6における被害想定Ⅱの範囲は、曲げの最大耐力荷重点以下としており、剛性低下がなく強度が残存していると判断できる。これらをレベル2地震動において要求される耐震性能と設定した。

(6) 照査結果と耐震対策設計；地下道を例として

空港全域にわたる地質調査・土質試験をおこない各種定数を設定した後、地下道断面におけるFLIPによる解析をおこなった結果を図-7及び図-8に示す。地下道函体周辺において液状化が発生し、側壁と中壁のせん断耐力が不足していることが判明した。

前述したとおり、液状化対策については現時点においても検討中であるため、本報告での詳述はおこなわない。

地下構造物のせん断耐力増強を目的とした耐震対策設計・対策工法案としては、空港制限区域内における施工の実現可能性等も考慮して、以下の3ケースについて検討した。

①地盤改良による対策方法（薬液注入）

周辺地盤の強度を高めて地盤の変形による部材への影響を小さくすることで、部材応答値が小さくなることを期待した対策方法。

②部材厚を厚くする方法（中壁・側壁 増厚補強）

中壁・側壁がせん断破壊している原因の一つに部材が曲げ変形することによってせん断力が発生することが、照査の結果確認されている。

よって、中壁・側壁部材の剛性を高めるのと同時にせん断耐力を向上させること期待した方法。

③部材のせん断耐力を高める方法

地下道は施工年次が古いため、当時の設計基準に基づき中壁・側壁にスターラップ筋が入っていない。これが、せん断耐力が不足しせん断破壊をおこす直接の原因となっている。

よって、スターラップ筋を新たに配置することによりせん断耐力を向上させる方法。

これらを検討した結果、①については当然部材応答値は小さくなるが構造物自体のせん断耐力が確保できない

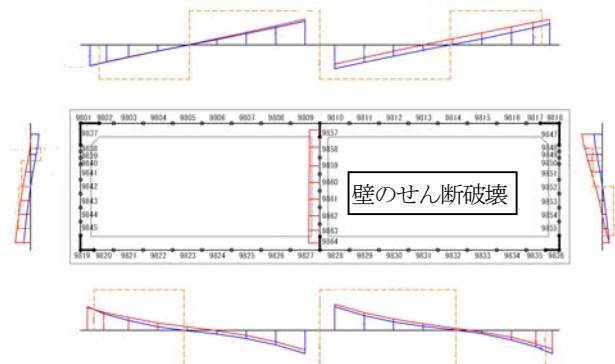


図-7 Q図 【凡例】—初期応力 —応答値 —許容値

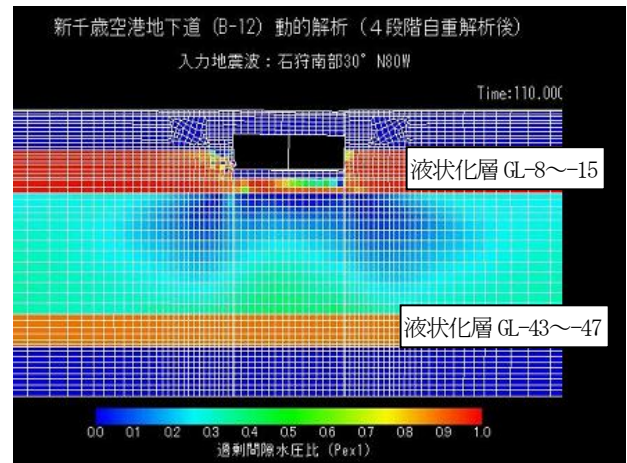


図-8 過剰間隙水圧比コンター図

結果となった。また同様に②についても現在の道路車線数確保を前提として検討した場合でも、せん断耐力を確保できない結果となった。したがって、せん断耐力を確保できる③を採用せざるを得ない結果となった。

③は、既設の壁を直接削孔し、削孔箇所スターラップ筋（ヘッドバー）を配置する方法である。この方法には例えばTヘッドバー工法⁷⁾、ポストヘッドバー工法⁸⁾が工法として既に確立されている。それらの内、事後対策としての施工性に優れており、実績・経済性等も含めて優位性のあるポストヘッドバー（PHb）工法を採用した。工法の詳細については、前述のポストヘッドバー研究会HP⁹⁾を参照されたい。

(7) 今後に向けて；照査・設計の面から

平成19年度時点の構造物照査・設計では、いくつかの技術的課題が残った。平成20年度において引続き検討中の事項について概要を以下に述べる。

a) 液状化対策範囲・規模の設定

照査の結果、地下構造物直上の基本施設舗装等に段差が発生することが判明した。函体自体の耐力は上述の対策をおこなうことによって向上するが、舗装段差解消のための液状化対策範囲の設定に関しては、性能設計の考え方の変更もあり現在も引続き検討中である。

石狩湾新港実物大液状化実験⁹⁾の取りまとめ結果、及び

東京国際空港・仙台空港等の先行事例を参考にしながら決定することとなる。

b) 地下構造物縦断方向の耐震照査検討

構造物直下に液状化層が残る場合、バネ質点モデルによる縦断方向照査検討を試みると、函体と液状下層を結ぶバネ定数の設定に課題が残る。

別の照査手法等を模索する等、縦断方向検討を継続している。

4. 地下道耐震対策工事の報告

(1) 工事概要【図-9参照】

施工延長；L=326m

(2連ボックス函体の中壁・両側壁部)

PHb工法の概要及び概略手順については前出のHP⁹⁾を参照されたい。また、現地の施工状況については写真一例を図-10に示すが、詳細については空港技術報告会でのパワーポイント資料での説明に譲る。

なお、現時点で工事は順調に進捗している。

(2) 今後に向けて；施工の面から

現在施工している工事において、現時点で判明している課題について、概要を以下に述べる。

a) 鉄筋探査の限界

本対策工事においては、既設の鉄筋を避けて削孔をおこないソーを挿入する必要がある。しかしながら、現状の鉄筋探査機器では壁面奥側の鉄筋や偶各部等鉄筋が密に入っている箇所における鉄筋位置の詳細把握が難しい。

そのため、施工効率化のためには現場における鉄筋探査機器及び手法の高度化が求められる。



図-9 地下道耐震対策工事イメージパース

5. おわりに

これまでの検討の結果、新千歳空港における災害時の空港のあり方や構造物の照査手法、耐震対策等の方向性について一定の整理できたと考える。

今後、残された技術的課題に取り組みつつ、他空港の先行事例も参考としながら、早急に新千歳空港の耐震化を進める必要があり、引続き取り組んでいく。

参考文献

- 1) 野津厚,長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性、港湾空港技術研究所資料,NO1112,2005.
- 2) 長尾毅,山田雅之,野津厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析、土木学会論文集,NO801/ I - 73,2005.
- 3) 国土技術政策総合研究所 港湾研究部港湾施設研究室 HP：
<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>
- 4) 野津厚,菅野高広：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強振動評価手法ー内陸活断層地震及び海溝型地震への適用性の検討ー、港湾空港技術研究所資料,NO1120,2006.
- 5) 野津厚,盛川仁：表層地盤の多重非線形降下を考慮した経験的グリーン関数法、地震第2輯,第55巻,pp.361-374,2003.
- 6) 野津厚,菅野高広：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強振動評価手法ー因果性と多重非線形効果に着目した改良ー、港湾空港技術研究所資料,NO1173,2008.
- 7) 鉄道 ACT 研究会 HP：http://www.rail-act.org/t_head.html
- 8) Post-Head-bar (PHb) 研究会 HP：<http://phb-koho.jp/index.html>
- 9) 国土交通省航空局,国土交通省国土技術政策総合研究所,独立行政法人港湾空港技術研究所：実物大の空港施設を用いた液状化実験に関するシンポジウム～空港施設の液状化対策について考える～、資料集,2008.



図-10 施工状況一例