

空港滑走路の液状化対策工の孔口防護に関する検討

田代 徹*・池内 章雄**・志茂 香***

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 国土交通省関東地方整備局 東京空港整備事務所 建設管理官

東京国際空港は、大規模地震が発生した場合でも空港機能を維持し緊急物資等の輸送拠点となる役割が求められている。そのためには、滑走路や誘導路等への地震による影響を最小限にとどめ、速やかな運用開始が可能な耐震化がなされていることが条件となる。

東京国際空港では、誘導路などの液状化対策に続き、今後は滑走路の耐震化が計画されている。液状化対策工の施工期間を通じて滑走路舗装面には、孔口防護キャップと呼ばれる鋼製の蓋が設置されることとなるが、滑走路を発着する航空機の運用に対する安全性、滑走路内の施工制約条件を考慮した構造が求められる。

本稿では、東京国際空港の C 滑走路を対象として孔口防護キャップの構造の検討を行うとともに、現地実証実験等により確認した安全性および施工性に関する課題とそれらに対する対応策について報告する。

キーワード: 供用滑走路, 液状化対策工, 孔口防護キャップ, 現地実証実験

1. はじめに

滑走路用の孔口防護キャップは、平成20年度にC滑走路の航空機荷重を対象として検討され、防護キャップ周辺の舗装体や地盤中に発生する変形量、応力、ひずみの発生状況を三次元FEM解析で検討した。その検討結果から、防護キャップ周囲のアスファルト混合物や地盤中には、破壊をきたる変形が発生しないことが確認されている。

今年度は、平成20年度度の検討で課題として挙げられた以下の項目についての検討結果を報告する。

- ① 防護キャップの構造の検討
- ② 防護キャップの強度の確認
- ③ 現地実証実験による施工性等の確認

2. 防護キャップの構造の検討

2.1 構造検討における着目点

これまで誘導路等の液状化対策工で使用されてきた防護キャップ（以下、従来型）の構造及び設置状況を図-1に示す。

従来型誘導路等で使用されており、作用する荷重は航空機通過時の鉛直荷重である。蓋部は円筒形の本体上部にめ込み、3本のボルトで固定する構造となっている。

今回構造を検討する防護キャップに作用する荷重は、滑走路の供用時間内に着陸する航空機のタイヤ接地部が作用する鉛直荷重および水平荷重である。

防護キャップの構造検討を行うに当たり、以下の点に着目した。

(1) 構造検討における着目点

- ① 航空機着陸時の接地荷重に耐える構造であること
- ② 航空機着陸時の衝撃で蓋部が飛散しないこと
- ③ 液状化対策工を円滑に行える形状であること

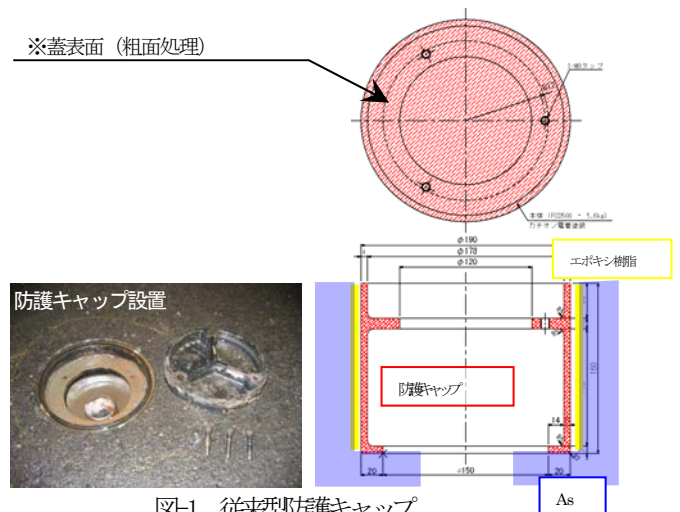


図-1 従来型防護キャップ

2.2 蓋部構造の検討

2.1で示した着目点に対応するため、以下の項目を満足できる防護キャップの構造を検討した。

- ① 蓋部に作用する航空機着陸時の荷重を、本体の円筒部に直接伝達する構造
- ② 防護キャップに水平力が偏って作用し、回転モーメントにより蓋部が回転した場合でも、本体の円筒部から外れて飛散しない構造
- ③ 防護キャップ設置時に、蓋部固定ボルトの締め忘れなどヒューマンエラーをなくす構造

以上①～③の課題を検討した結果、滑走路に設置する防護キャップは以下の1)～4)の項目を満足する構造を検討した(図-2 提案型防護キャップ構造案)。

- 1) 蓋部に作用する外力を、直接本体の円筒部に伝達するため、蓋部と本体部の接合部にねじを設け、締め込むことで一体化する(図-2 ①部)。

- 2) 水平力が偏って作用した場合に生じる回転モーメント力に耐えるため、蓋部の中心に締め込み用ボルトを設置 (図2 ④)。
- 3) 蓋部と本体部のねじが外れた場合でも、中心部のボルト先端部のロックバーが本体から外れない構造 (図2 ③)。
- 4) 蓋と本体のねじ込みおよび中央のボルトは、いずれも確実に締め込まないと、本体から飛び出したままとなり、施工中に容易に視認できる構造 (ヒューマンエラーの防止)。

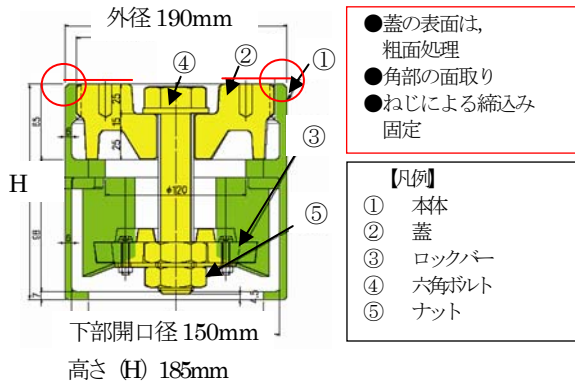


図2 滑走路用防護キャップの構造案

2.2 蓋部中央ボルトの検討

東京国際空港のC滑走路で最大の水平力が作用する航空機は、エアバスA-380Fが着陸する際に作用する水平荷重である。防護キャップの中央に設置するボルトの検討には、「Airplane Characteristics」から同機の水平荷重を確認し、検討の対象荷重として設定した。

(1) 中央ボルトの構造検討

中央ボルトの検討では、防護キャップ蓋部の半円上に着陸時の航空機のタイヤが接地し (図-3)、回転モーメント力により作用するせん断力に対する検討を行った。検討の結果、M42または同等以上の強度を持つボルトで蓋部を締めこむ必要があることが判明した。

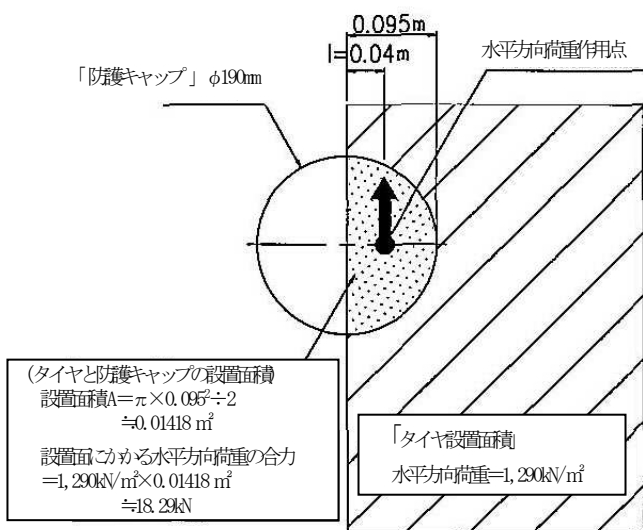


図-3 着陸時に作用する水平荷重 (回転モーメント最大時)

2.3 提案型防護キャップの形状の設定

滑走路部の液状化対策工に使用する防護キャップの諸元は、液状化対策工を施工する際の施工性や製造時の制約を踏まえ、以下の条件を満たす構造とした。

- ① 内外径の設定
 - ・外径：削孔時のコアカッターの標準径 (カッター外径200mm) 以内、かつ設置時の接着層は5mm程度を考慮して、外径を190mmと設定
 - ・内径：注入孔径100mm+作業上のクリアランス (20mm) を加えた120mmを最小内径とした。蓋受け部のリップ幅30mmを考慮し内径180mmと設定
 - ② 高さの設定
 - ・高さ：平成20年度検閲結果、F型標識灯の埋設深さ、舗装版の厚さ及び中央ボルトの長さを考慮し185mmと設定
 - ③ 本体部分の肉厚について
 - ・肉厚：経済的な観点から、材質を鋳鉄物と設定し肉厚は、一般的な鋳鉄物の最低限の薄さである6mmと設定
 - ④ 蓋部固定用ボルト
 - ・ボルト設定：2.2 ①での検閲結果と、滑走路設置時に水や砂がたまると思われる蓋部中央の凹みを小さくするため、高力ボルトM30 (F10T) を設定
- 以上により設定した提案型防護キャップの形状を写真-1に示す。

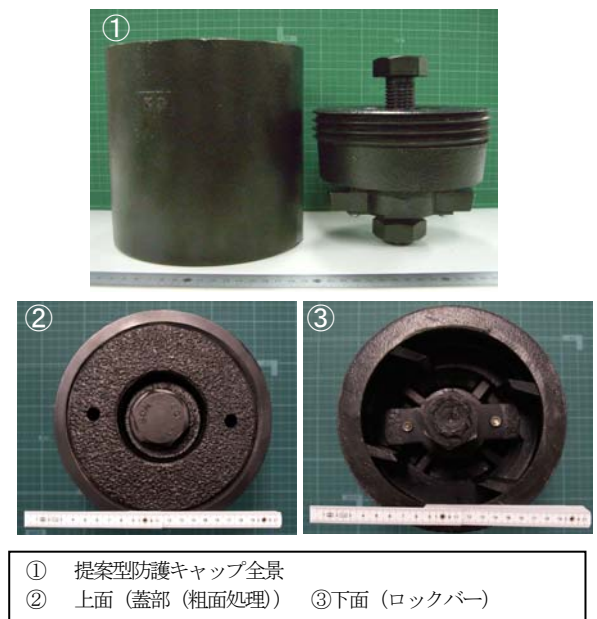


写真-1 提案型防護キャップ (供試本)

3. 提案型防護キャップの性能評価

3.1 構造計算による性能評価

(1) 構造検討荷重条件の設定

供用中の滑走路内での外力 (航空機荷重) に対する提案型防護キャップの性能を構造計算と載荷試験から確認した。設置荷重は、鉛直方向及び水平方向のタイヤ接地圧に衝撃を考慮し、(タイヤ接地圧×1.3) 荷重条件とした (表-1)。

表-1 荷重条件の設定 (「Airplane Characteristics」より)

荷重条件	荷重方向	設計接地圧 (kN/m ²)
A380-800F 型	鉛直	2,093
〃	水平	1,290

(2) 構造計算による性能評価

防護キャップの強度的な性能を評価するにあたり、蓋部は本体部に完全に締め込み、中央ボルトで固定することから1つの円筒型の構造体とみなし、躯体全体で航空機荷重を支持するものと考えた。

また、構造計算では以下の点に留意した。

- ① 曲げ: 本体蓋受け部のリブを考慮した断面係数を用いて、周辺固定円板の曲げ応力から確認
- ② せん断: 鉛直荷重に対してせん断応力を受けるキャップ底面部材の断面積を求め、せん断応力を確認
- ③ 座屈: 防護キャップ (筒体) は細長比が小さく、オイラーの座屈公式による評価が出来ない。そのため、短柱の座屈の実験公式であるランキンの式を用いて座屈荷重を確認

(ランキンの座屈応力の実験式)

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_0}{1 + a (\ell / k)^2}$$

- σ_{cr} : 座屈応力 (Mpa)
- σ_0 : 材料の圧縮強さ (549Mpa (鋳鉄))
- a : ランキンの式の定数 (1/a=1,600 (鋳鉄))
- ℓ / k : 細長比 (<80)

構造計算による計算結果を表-2 に示す。提案型防護キャップは設定した外力に対して十分な強度を有することを確認した。

表-2 強度・変形計算結果一覧

確認項目	荷重条件	外力	許容値
鉛直荷重に対する ・曲げ ・せん断 ・座屈	航空機: A380-800F 接地圧: 衝撃あり (接地圧×1.3)	曲げ応力 =3,367N/cm ²	許容曲げ応力 =12,250N/cm ²
	鉛直接地圧 =2,093kN/m ²	せん断応力 =1,521 N/cm ²	許容せん断応力 =12,250 N/cm ²
	キャップ全体にかかる 荷重=59,312N	座屈力 =59,312N	許容座屈強度 =1,919,070N

3.2 荷重試験による性能評価

提案型防護キャップの鉛直/水平方向の強度とひずみ特性を把握するため荷重試験を行った (於 (財) 建材試験センター)。

(1) 荷重試験荷重の設定

荷重試験の荷重は、「A380-800F」(衝撃荷重考慮)と、既存のF型標識灯の設計荷重を比較し、鉛直および水平方向のそれぞれで大きい値を採用し、以下の荷重試験荷重を設定した。

- (鉛直方向) 3,200 (kN/m²): F型標識灯の設計値を採用
- (水平方向) 1,290 (kN/m²): A380-800Fの水平方向のタイヤ接地圧

また荷重の最大値は、鋳鉄製のマンホール蓋の荷重試験基準を参考とし、安全率4 (設計荷重の4倍) とした (表-3)。

表-3 荷重試験における荷重荷重

	設計接地圧 (kN/m ²)	実荷重 ^{※2} (kN)	荷重荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
鉛直	3,200	89.60	100	400
水平	1,290	36.12	40	160

※2) 防護キャップの面積=0.028m²

(2) 荷重試験の実施

荷重試験では、防護キャップの挙動特性を確認するため、弾性領域から塑性領域、破壊に至る「応力-ひずみ曲線」を想定し、以下の2項目で行った。

試験1: 構造弱点を把握し、破壊モードを確認する。荷重荷重→最大荷重まで荷重

試験2: 弾性領域での挙動特性を把握する。

設計荷重までの荷重と除荷を繰り返し、挙動を計測した後、最大実荷重まで荷重

(3) 荷重試験結果

- ① 試験1結果: 鉛直方向の荷重により発生したひずみ分布は、提案型防護キャップ内部のリブを境として圧縮ひずみと引張りひずみが生じることを確認した (図-6)。

また、ひずみの特性から荷重の増加とひずみ変位が概ね比例しており、弾性領域であることを確認した (図-7)。荷重試験後に、全体の変形やふた部の開閉の不具合などの異常が無いことを確認した。

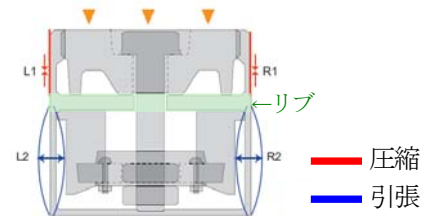


図-6 鉛直方向のひずみの概念図 (▼荷重方向)

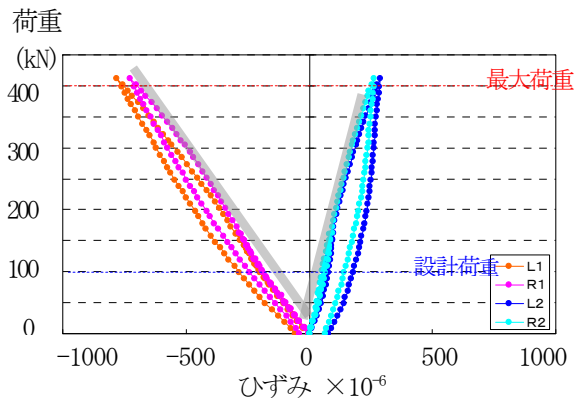


図-7 鉛直方向のひずみ特性

- ② 試験2結果: 水平方向の荷重により発生したひずみ分布は、荷重方向に対して最頂部が引張り、上半部が圧縮、下半部が引張りになることを確認した (図-8)。

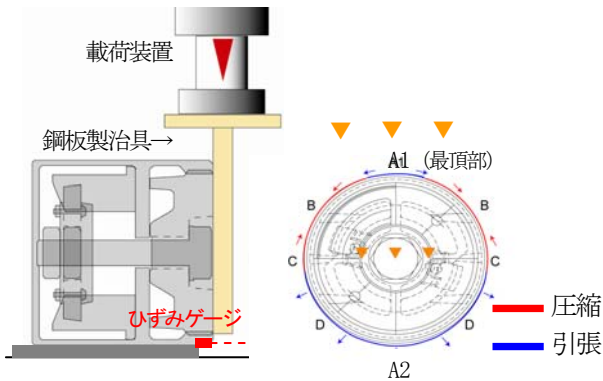


図-8 水平方向のひずみの概念図 (▼载荷方向)

また、载荷荷重の増加とひずみの関係は概ね比例しており、弾性領域にあると判断した(図-9)。

また、計測点A2のひずみが複雑な変化を示すが、これは、供試体の試験機への設置の制約上、この点に局所的に応力が集中する状態にあったことによると考えられる。

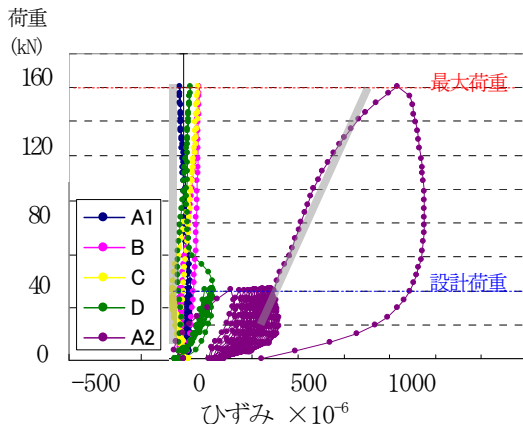


図-9 水平方向のひずみ特性

(4) 防護キャップの性能評価

提案型防護キャップの強度は、鉛直方向および水平方向ともに安全率4以上の強度を有していた。

提案型防護キャップのひずみ特性は、水平方向において試験方法の制約から局所的に応力が集中し、一部大きなひずみが生じたが(供試体の最下端部)、キャップ全体でみた場合、問題となるような変形やゆがみは認められなかった。

4. 現地実証実験による施工性等の確認

4.1 現地実証実験

提案型防護キャップを地盤改良工事(CPG工法)において、実際に誘導路上の航空機が頻繁に通過する位置に設置した(図-10, 写真-2)。

約3ヶ月間の残置期間中、防護キャップの破損や変形、舗装面からの浮き出しや沈み込み等は発生しなかった。

4.2 施工者からのヒアリング

試験施工完了後、施工者及びCPG施工の関係者を交え、ヒアリングを行った。

ヒアリングで確認された提案型防護キャップの安全性や施工性に関する課題及び対応策を以下に示す。

① 現地実証実験で判明した課題

- 1) 中央ボルト：ボルト長が長く、孔底モルタルへの接触がある。締付工具が小さく、締付けに手間がかかる。
- 2) 蓋部：開閉用工具を差し込む孔や蓋部のねじの目詰まりがある。
- 3) 蓋の開閉：開閉用工具が細く、折損することがある。

② 判明した課題に対して実施した対策

- 1) 中央ボルト：長さを10mm短く製作。締付け時には「トルクレンチ」を使用。
- 2) 蓋部：開閉工具用孔の径を4mm拡大。
- 3) 蓋の開閉：2)と同様の対応。

ヒアリングで得られた課題に対する対応策は、直ちに提案型防護キャップの製作及び施工に反映し、滑走路での液状化対策工を施工する上で、有効な構造であることが確認できた。

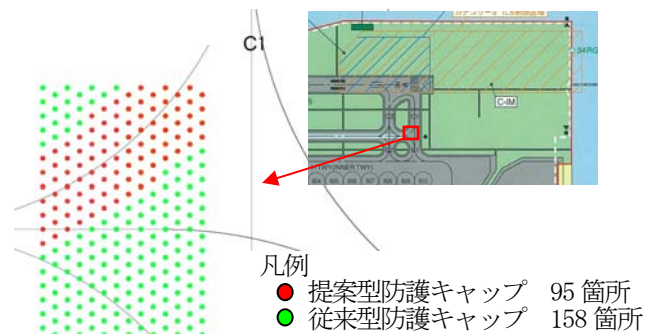


図-10 現地実証実験位置図 (C1 誘導路)



写真-2 提案型防護キャップ設置状況 (C1 誘導路)

5. 今後の課題

提案型防護キャップを転用して使用する場合には、疲労による強度低下を载荷試験等により確認する必要がある。また、設置・施工状況の確認および日常点検の徹底、ヒューマンエラーを防止するための教育の強化など、運用面での確認事項を順次だてて整理し、徹底する必要がある。

6. 謝辞

本稿は、国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所発注による「東京国際空港既設舗装直下改良検討調査」業務の一部を取りまとめたものである。

また、本検討で得られた「防護キャップ」の意匠は現在、特許登録申請中であることをあわせて報告する。

最後に、本検討の調査にあたっては、「東京国際空港既設舗装直下改良施工検討委員会」(委員長:福手 勤 東洋大学教授)及び関係者各位より貴重なご意見やご指導を頂いた。ここに記して心より御礼を申し上げます。