

滑走路直下における液状化対策工の孔口防護に関する検討

田代 徹*・三井 道雅**・青島 豊一***

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 前 (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 東京空港整備事務所 前任建設管理官

東京国際空港では設計地震動に対応した施設の耐震強化が進められている。特に今後は、現在供用中のC滑走路 (L=3,000m) において液状化対策工を実施する計画である。

本稿では、液状化対策工を実施する際に必要となる既設舗装面上の防護キャップが設置された状態で航空機が離発着した場合に、防護キャップ及びその周辺地盤がどのような挙動となるかを数値解析(三次元 FEM 解析)等により検討した結果を報告する。

キーワード: 供用滑走路, 液状化対策工, コンパクショングラウチング工法 (CPG 工法)

1. はじめに

これまで東京国際空港では、滑走路等の既設舗装直下液状化対策工として、静的圧入締固め工法 (以下、CPG 工法) および浸透固化処理工法 (溶液型薬液注入工法) が、試験施工区において改良後の既設舗装の健全性、経済性および施工性等の有効性が評価され、既に施工されている。

今後は、現在航空機が頻繁に離発着している C 滑走路の既設舗装直下での液状化対策工が計画されている。C 滑走路では、施工時間の制約を受けるとともに、離発着する航空機の供用に支障をきたさないように施工を行なうことが要求されている。

供用している滑走路の既設舗装直下を CPG 工法や浸透固化処理工法等により液状化対策工を行なうには、既設舗装面を削孔し施工するため、滑走路に孔口の防護キャップが設置される。本論では、この防護キャップが設置された状態で航空機の離発着が安全に行なわれるかどうかを検証するために、三次元 FEM 解析等を用いて検討した結果について報告する。

1.1 供用滑走路への防護キャップの設置

東京国際空港では、制限区域内での施工可能時間は5時間20分(0:40~6:00)であり、準備・片付け等を除く実施工時間は3時間20分(1:40~5:00)である(図-1)。

このため、施工時間外には、航空機の運行に支障が生じないように孔口に防護キャップを設置する必要がある。

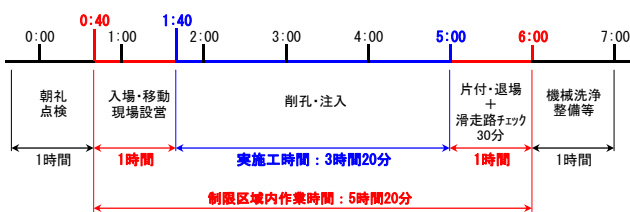


図-1 東京国際空港での施工タイムスケジュール

1.2 防護キャップの特徴

これまで誘導路等で使用されている現行防護キャップ (以下、防護キャップ) の構造及び設置例を図-2 に示す。防護キャップの設置は、既設舗装の施工地点をコア抜きし、エポキシ樹脂で周囲の空隙を充填して固定する。

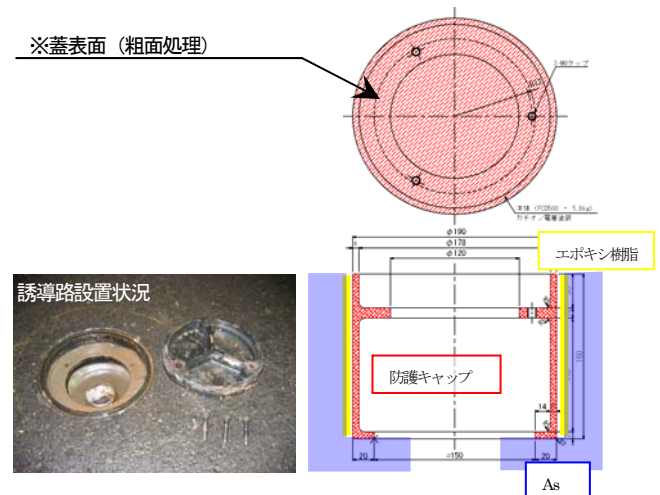


図-2 現行防護キャップの構造及び設置例

防護キャップの設計強度は、航空機の自重による鉛直方向の荷重をもとに算出している。

一方、滑走路においては、航空機の鉛直荷重に加え、ランディング時のブレーキング等により作用する水平方向の荷重を考慮する必要がある。

このため本検討では、鉛直/水平両方向の荷重を設定した解析を行い、舗装体及び防護キャップの挙動や変位特性を検討した。

2. 防護キャップの解析条件

鉛直方向及び水平方向の荷重が作用した際に想定される破壊モード(応力~変形挙動)を検討するため、滑走路舗装体とそこに設置した防護キャップとをモデル化した三次元 FEM 解析を行った。解析条件は以下のとおり。

2.1 解析モデル

防護キャップ、エポキシ樹脂及びアスファルト混合物をそれぞれ線形弾性体としてモデル化し(図-3)、これらをメッシュ分割して三次元 FEM 解析メッシュモデルを作成した(図-4)。

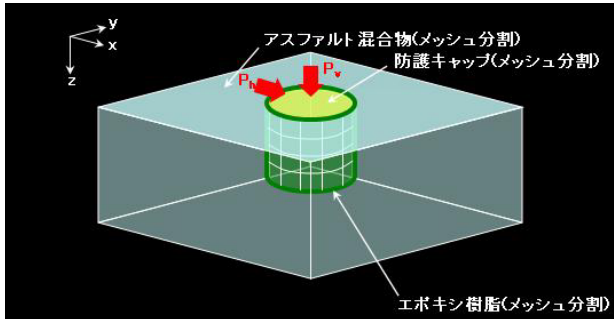


図-3 解析モデルの概要

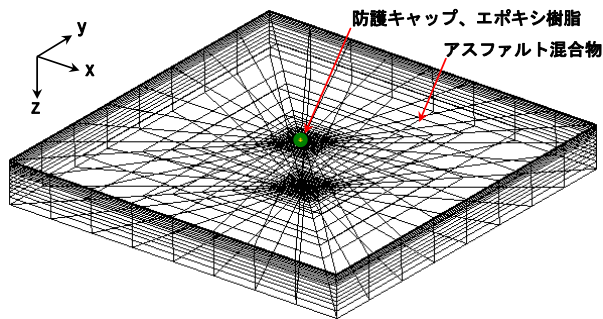


図-4 三次元 FEM 解析メッシュ図

2.2 航空機荷重の設定

防護キャップに作用する航空機荷重は、東京国際空港に就航または就航の可能性がある代表的な航空機について、「Airplane Characteristics」(設計要領¹⁾)をもとに、鉛直方向及び水平方向の接地圧から検討した。

この中で、両方向接地圧が最大となるエアバス A380-800F を、解析対象の航空機荷重とした(表-1)。

表-1 航空機荷重一覧表(代表機種)

航空機の種類		A380-800	A380-800F	B747-400	B777-300ER
総質量(満載時)	t	562	602	396	352.4
脚荷重(満載時)	W	1,049	1,144	910	1,598
	B	1,573	1,716		
	C	-	-		
車輪の配置形式	W	1脚4輪	1脚4輪	1脚4輪	1脚6輪
	B	1脚6輪	1脚6輪		
	C	-	-		
車輪の配置形式	W	複々車輪	複々車輪	複々車輪	1脚6輪
	B	1脚6輪	1脚6輪		
	C	-	-		
タイヤ内圧	W	1.50	1.61	1.38	1.52
	B	1.50	1.61		
	C	-	-		
タイヤ接地圧	W	1.50	1.61	1.38	1.52
	B	1.50	1.61		
	C	-	-		
タイヤ接地面積A(満載時)	W	1,748	1,776	1,649	1,752
	B	1,748	1,776		
	C	-	-		
満載時の車輪接地幅	W	34.7	35.0	33.7	34.8
	B	34.7	35.0		
	C	-	-		
水平方向荷重(1脚あたり)	W	839	915	742	1,279
	B	1,259	1,373		
	C	-	-		
水平方向圧力	W	1.20	1.29	1.12	1.22
	B	1.20	1.29		
	C	-	-		

2.3 解析定数(弾性係数等)及び解析ケースの設定

防護キャップ、エポキシ樹脂、アスファルト混合物の各要素の解析定数は、設計要領¹⁾、C滑走路におけるFWD試験結果²⁾(図-5)、及びC滑走路におけるレジリエントモジュラス試験結果³⁾(図-6)をもとに設定した(表-2)。

また、解析ケースはアスファルト混合物の弾性係数を変化させた3ケースとした(表-3)。

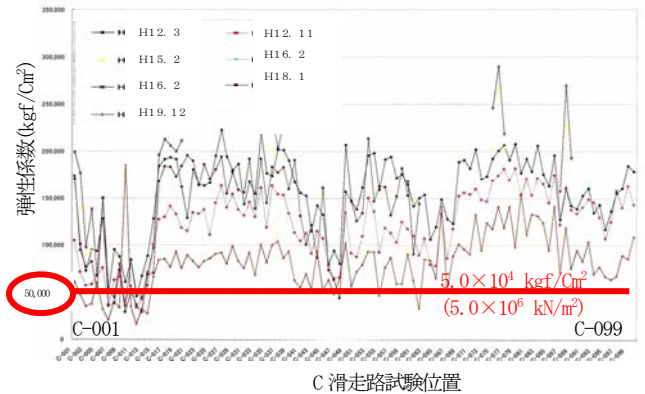


図-5 C滑走路におけるFWD試験結果
(C滑走路の逆解析アスコン弾性係数の推移)

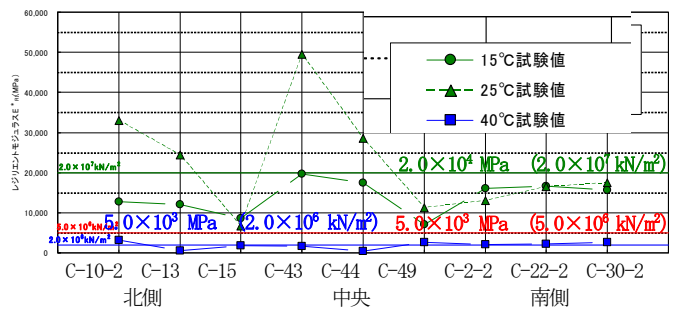


図-6 C滑走路におけるレジリエントモジュラス試験結果

表-2 各材料の解析定数一覧

材料名	単位体積重量 γ (kN/m ³)	弾性係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν
防護キャップ	77.0	2.0×10^8	0.30
エポキシ樹脂	10.0	9.0×10^3	0.30
アスファルト混合物	23.5	5.0×10^6 (設計要領及び FWD試験結果からの設定値)	0.35
		2.0×10^6 (試験温度15°C及び 25°C試験値の平均的な値)	
		2.0×10^5 (試験温度40°C試験値の平均的な値)	

表-3 解析ケース一覧

No	タイヤ接地圧		アスファルト混合物の 弾性係数 (kN/m ²)
	鉛直方向 (kN/m ²)	水平方向 (kN/m ²)	
CASE1	1,610	1,290	$2.0E+06$
CASE2	1,610	1,290	$5.0E+06$
CASE3	1,610	1,290	$2.0E+07$

2.4 アスファルト混合物に発生する引張りひずみ

み・圧縮ひずみの照査

(1) 引張り破壊ひずみ

アスファルト混合物の解析結果における引張りひずみの照査は、舗装標準示方書⁴⁾が示す応力、ひずみを基準とした。

ここで、破壊回数 N_f について、防護キャップの残置期間を2週間と仮定し、D滑走路供用後10年間のC滑走路のカバレッジ算出結果⁵⁾より、2週間あたりの離発着回数を230回に設定したうえで、 $N_f=230$ 回の疲労破壊包絡線を設定した(図-10中の赤太線)。

$$N_f = 60,000 \text{ (回/10年間)} \div 10 \text{ (年間)} \div 365 \text{ (日)} \times 14 \text{ (日間)} = 230 \text{ 回}$$

また、設定した破壊回数 N_f と破壊ひずみ ϵ_f の関係と、試験条件 15°C のときの係数を使用して破壊ひずみ ϵ_f を設定した。

$$\log \epsilon_f = -2.43 + (-0.138) \log N_f$$

$$N_f = 230 \text{ (回)} \text{ のとき, } \epsilon_f = 1.75 \times 10^{-3}$$

(2) 圧縮破壊ひずみの照査方法

アスファルト混合物の圧縮ひずみ照査は、設計要領¹⁾が示す破壊ひずみ $\epsilon_f = 0.0018$ を基準とした。

3. 防護キャップの解析結果

3.1 解析手法の妥当性の検証

三次元 FEM 解析による解析結果の妥当性を検証するため、多層弾性構造解析プログラム (GAMES) による解析結果との比較を行った。

両解析から求めた応力の深度分布図を図-7に、変位の深度分布図を図-8に示す。図に示すとおり、三次元 FEM 解析の結果は「GAMES」の解析結果と良い一致を示している。

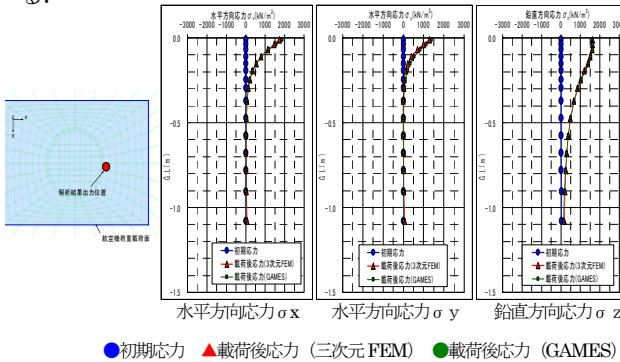


図-7 応力の深度分布図

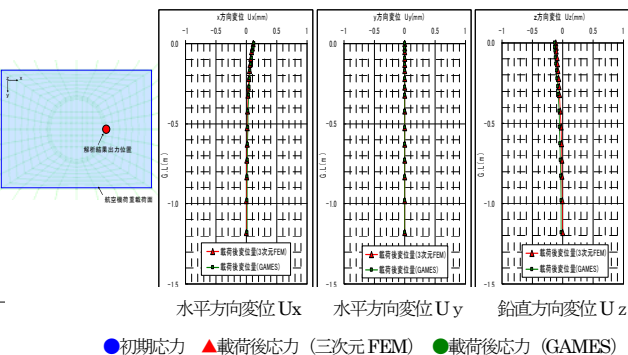


図-8 変位の深度分布図

3.2 解析結果

(1) 変位量の解析結果

CASE 1 ~ 3 における変位量の解析結果を図-9に示す。防護キャップ周辺の地表面の変位量は、鉛直変位量、水平変位量ともに最大で 0.4mm 程度となった (CASE1)。ここでは、アスファルトの温度が高くなるほど (弾性係数が小さい) 変位量が大きくなる傾向が認められた。

なお、防護キャップ周辺では、CASE 1 で最大 0.3mm 程度の鉛直方向の段差が生じているが、これは、防護キャップ周辺のエポキシ樹脂の変形係数 ($E=9.0 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$) がアスファルト混合物の変形係数よりも小さいために生じたと考えられる。

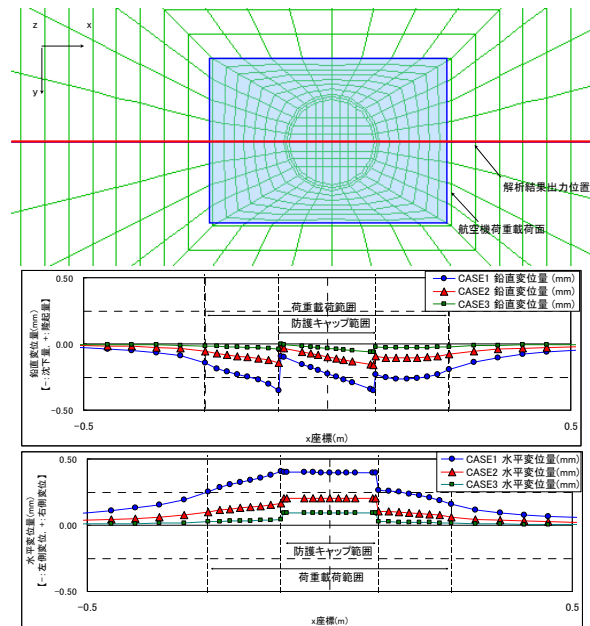


図-9 地表面の変位量分布図

(2) 応力~ひずみの照査

引張りひずみの照査結果を図-10に示す。ここで、図中の赤丸はアスファルトのみをモデル化した解析結果である。防護キャップ、エポキシ樹脂を含めてモデル化した解析結果が青三角である。

解析の結果、防護キャップを設置した場合、アスファルトのみの場合と比べて、引張り応力、引張りひずみともに大きくなる。しかし、疲労破壊包絡線を超える応力~ひずみや、破壊に至る引張りひずみは発生しないことを確認した。

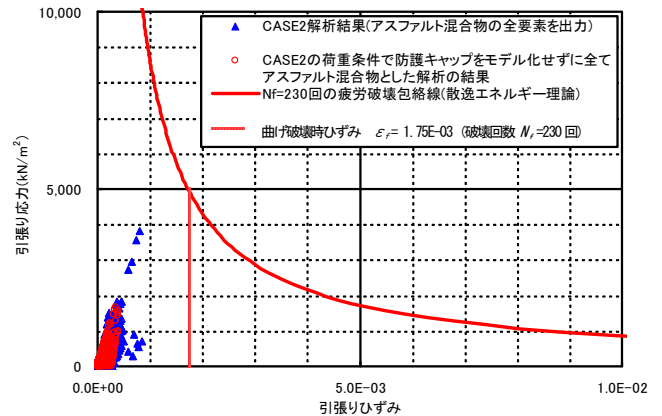


図-10 引張りひずみの照査結果

圧縮ひずみの照査結果を図-11 に示す。設計要領¹⁾が示す基準を超える応力～ひずみや、破壊に至る圧縮ひずみは発生しないことを確認した。

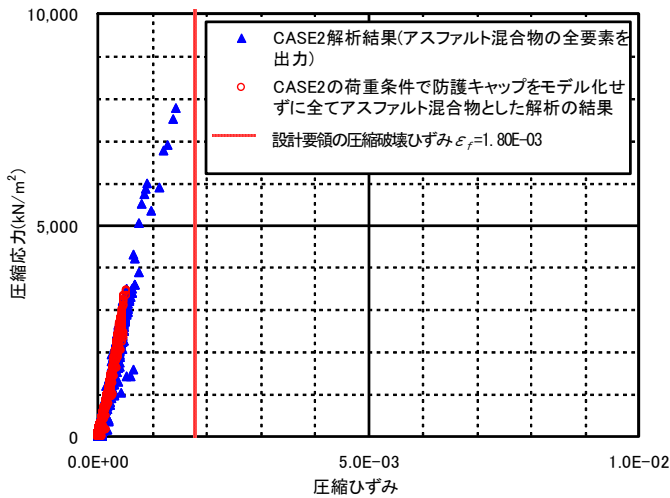


図-11 圧縮ひずみの照査結果

また、図-12 に防護キャップ周辺の応力分布図を示す。防護キャップ底面の端部では、応力集中(端部圧)が発生し、圧縮応力～ひずみが大きくなっている。このことから鉛直及び水平方向のタイヤ接地圧が働いた際の防護キャップの変形モードは、防護キャップの端部を支点として転倒するモードが卓越すると考えられる。

しかし、防護キャップの変形量が 0.4mm 程度であるため、防護キャップが転倒することは無いと考えられる。

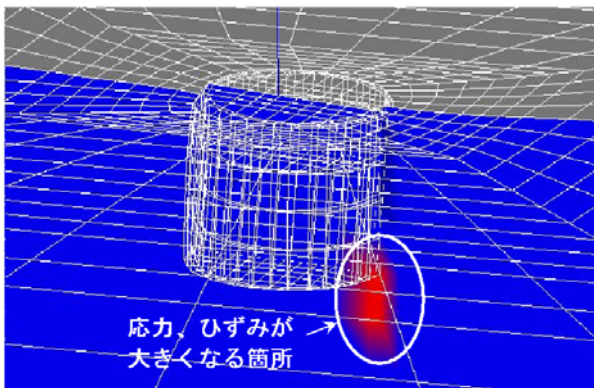


図-12 応力、ひずみが大きくなる箇所 (防護キャップ)

4. まとめ

防護キャップ及び舗装体で発生する変形量について、アスファルト混合物の温度変化を考慮した変形係数を検討する等、さまざまなケースによる三次元 FEM 解析を行った。結果として、地盤の変形量は最大でも 0.4mm 程度となり、問題が生じない程度の値であることが明らかになった。また、アスファルト混合物の応力～ひずみ関係の解析結果は、全ケースで引張り側及び圧縮側ともに設計要領¹⁾が示す基準値以内であり、破壊に至るひずみは発生しないことを確認した。

5. 今後の課題

C 滑走路の液状化対策工施工の際に使用する防護キャップは、現行型とは異なる形状となるため設計・構造計算から強度確認試験、また予め試験施工等による設置から撤去、舗装復旧までの手順等を確認する必要がある。

さらに、航空機の運行を妨げずに液状化対策工を実施するために、構造上の強度や優れた施工性のみならず防護キャップの蓋の不十分な固定やボルトの締め忘れといったヒューマンエラーを防止できる構造を検討することも必要である。

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きました。ここに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省航空局, (財) 港湾空港建設技術サービスセンター発行: 空港舗装設計要領及び設計例(平成 20 年 7 月)
- 2) 国土技術政策総合研究所空港施設研究室: 多頻度交通荷重後の空港基本施設健全度の検討調査(平成 19 年度報告書)
- 3) 国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所: 平成 20 年度東京国際空港 C 滑走路中央土質調査報告書(平成 20 年 8 月)
- 4) 土木学会: 2007 年度制定 舗装標準示方書(2007)
- 5) 国土交通省関東地方整備局 東京空港整備事務所: 東京国際空港大規模改修基礎調査報告書(平成 19 年 3 月)