

2次元 FEM に基づく高耐圧ポリエチレン管の空港基本施設舗装下への適用性検討 (第 1 報)

タキロンシーアイシビル(株)

丸吉 克典

(株)クレアテック

後藤 有志

関東学院大学

菅野 高弘

(株)日本空港コンサルタンツ

久野 了史

1. はじめに

これまで、空港基本施設舗装下の排水管(埋設管)として、剛性管の遠心力鉄筋コンクリート管(JIS A 5303)や、施工性・耐食性に優れた可とう性管の強化プラスチック複合管(JIS A 5350)が主として用いられてきた。空港基本施設舗装下に埋設される可とう性管に求められる性能としては、軽量を活かした施工性はもちろんのこと、一般用途に比べて大きな地中応力が作用することから、管の耐久性(耐荷重)に加え、管の過度の変形により舗装へ悪影響を及ぼさないことが要求される。

これらの要求性能を満足する新たな管材として、道路下のカルバート工(高盛土)、震災・災害復旧および管更生など、インフラ整備用いられている高耐圧ポリエチレン管(JIS K 6780 以下：ハウエル管と称す)が挙げられる。ハウエル管は、2007年に(独)港湾空港技術研究所により行われた「実物大の空港施設を用いた液状化実験(写真 1-1)」に滑走路下の排水管として参画し、液状化時の埋設管挙動および耐震性が確認されているものの、空港基本施設直下におけるハウエル管の採用実績が無いのが現状である。

このような背景の下、ハウエル管の航空機荷重に対する耐荷性能を明確にするとともに、より経済的な断面を設定することが重要と考えた。

本稿では、2次元 FEM 解析による航空機荷重に対する耐荷性能の検討結果を第 1 報として報告する。



写真 1-1 液状化実験状況(発破後)

2. ハウエル管の概要と特長

ハウエル管は、1958年にドイツで開発され、創始者の Manfred Hawerkamp の名の一部”Hawer”から名付けられた管材であり、1988年からは日本国内でも製造されている。

管の形状は、独自の中空リブ構造の異形壁をもったスパイラルワインディング成形法により製造され、主原料は耐薬品性、耐腐食性、耐摩耗性、耐震性(耐衝撃性)、軽量性などの材料特性を有した高密度ポリエチレン樹脂である。管径は 300~3000mm まで幅と広く、管の種類としては、直管用の R 形(図 2-1)と主に部材用として使用される F 形(図 2-2)に大別される。

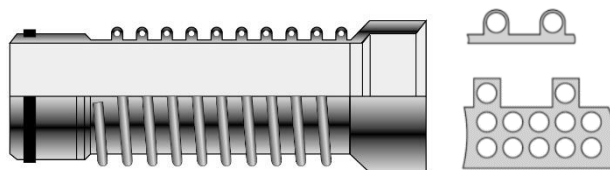


図 2-1 R形の管形状と管壁構造例

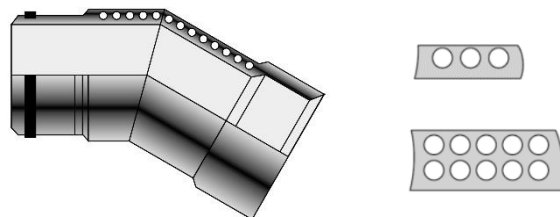


図 2-2 F形の管形状と管壁構造例

3. 空港基本施設舗装下を想定したハウエル管の適用性検討

(1) 検討概要

現行の空港土木施設設計要領において、ハウエル管を含め、たわみ性管の設計は、おもに道路下の自動車荷重下を想定した、道路土工カルバート工指針(日本道路協会 以下：カルバート工指針と称す)を参考にしている。そこで、実際の航空機荷重に相当する鉛直荷重をカルバート工指針と同様、管上のみで載荷させたモデルで2次元 FEM 解析(平面ひずみ弾性解析)を行い、カルバート工指針に準じた算定結果との比較およびハウエル管の航空機荷重に対する耐荷性能の検討を行った。

(2) カルバート工指針の考え方と設計条件

カルバート工指針の考え方としては、鉛直土圧に載荷重を加えた鉛直荷重を図 3-1 に示すスパングレー土圧分布の形状で管に作用させ、発生応力とたわみ率が、設定した許容値以下となるように設計を行う設計手法である。そこで、空港基本施設舗装下を想定した条件として、管径 1000mm、土被り 1.50m のハウエル管の管上に、A380 による鉛直方向地中応力を載荷させた。

設計条件の一覧を表 3-1 に示す。

(3) 2次元 FEM 解析の解析条件

2次元 FEM 解析の検討モデルは、前項のカルバート工指針と同じ埋設条件および鉛直荷重とした。すなわち、鉛直荷重として、土圧と航空機荷重を考慮した 200kN/m² をハウエル管の直上に載荷し、ハウエル管の管底面以深の下層地盤(仮想基礎)は、沈下による応力緩和が生じないような大きな変形係数を設定した。(図 3-2)。2次元 FEM 解析の仕様を表 3-2、物性値を表 3-3 に示す。

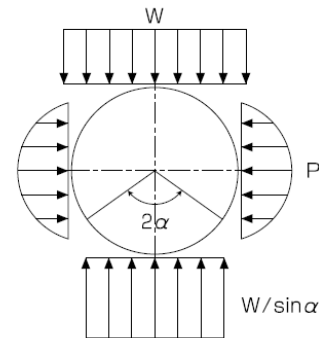


図 3-1 スパングレー土圧分布

表 3-1 設計条件

項目	単位	設計値
管径 d	mm	1,000
土被り H	m	1.50
埋戻材の単位体積重量 γ_t	kN/m ³	18
鉛直土圧 W_v	kN/m	27
航空機荷重 W_w	kN/m ²	173
鉛直荷重合計 $W (W_v+W_w)$	kN/m ²	200
管周裏込材の変形係数 E	kN/m ²	10,500

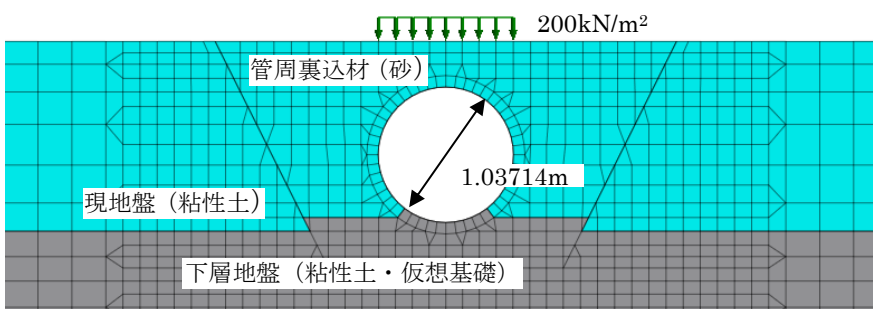


図 3-2 2次元 FEM 解析モデル図(空港基本施設舗装下)

表 3-2 2次元 FEM 解析

項目	仕様
名称	GTS NX(Yer.320) マイダス社製
構成式	弾性
境界条件	底面 XY 方向固定 側面 X 方向固定

表 3-3 2次元 FEM 解析 物性値(空港基本施設舗装下)

	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	弾性係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν
地盤	現地盤(粘性土)	18	0.35
	管周裏込材(砂)	18	0.35
	下層地盤(粘性土・仮想基礎)	18	14,700,000
ハウエル管	ϕ 1000 R30(換算肉厚 0.03714m)	9.6	0.40

(4) 検討結果比較および適用性の検証

①ハウエル管に生じる応力の比較

ハウエル管に発生する応力について、カルバート工指針と2次元FEM解析により得られた値を図3-3にそれぞれ示す。管頂部の発生応力(絶対値)は、カルバート工指針で7.03MPa、2次元FEM解析で3.44MPa、管底部ではカルバート工指針で11.05MPa、2次元FEM解析で0.01MPaとなった。また、管側部の発生応力はカルバート工指針で1.82MPa、2次元FEM解析で3.46MPaで、全て許容値である16.2MPa以下であった。この応力の乖離の原因は、2次元FEM解析の土圧分布とスパングレー土圧分布の違いであることが考えられる。

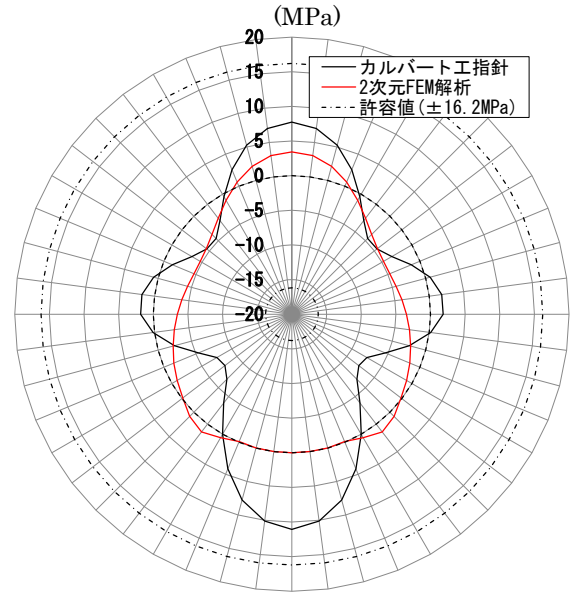


図3-3 ハウエル管応力の比較

②ハウエル管の鉛直たわみ率の比較

鉛直たわみ率を比較した表を表3-4に示す。カルバート工指針は4.99%、2次元FEM解析は1.68%と、ともに許容値である5%以下であるが、その差は約2.5倍と大きな乖離となった。この鉛直たわみ率の乖離についても、2次元FEM解析の土圧分布とスパングレー土圧分布の違いであることが原因であると考えられる。

表3-4 発生応力鉛直たわみ率の比較(絶対値)

	発生応力(MPa)			鉛直たわみ率 (%)
	管頂	管底	管側	
カルバート工指針	7.03	11.05	1.82	4.99
2次元FEM解析	3.44	0.01	3.46	1.68
許容値	16.2			5

③ハウエル管の空港基本施設の舗装下における適用性

カルバート工指針に基づく算定結果、2次元FEM解析結果とも発生応力と鉛直たわみ率が許容値を満足する結果である。2次元FEM解析は荷重載荷位置の変位量が20mm程度と非常に小さな値であるため、空港基本施設の舗装への影響も小さいと考えられる。

カルバート工指針あるいは2次元FEM解析を用いることでハウエル管を空港基本施設舗装下の用途に適用可能であることを示す一つの結果得られたが、両者に差があるため、2次元FEM解析の精度、解析手法の妥当性に対する検証も必要あると考え、次節に示す既往のハウエル管の埋設挙動調査結果と2次元FEM解析の解析結果について比較検討を行った。

4. 2次元FEM解析の妥当性検証

(1) 妥当性検証の方法

空港基本施設に埋設された管渠は、損傷時に空港運用へ与える影響が大きい施設であることから、2次元FEM解析の妥当性検証に用いる埋設挙動調査事例は、航空機荷重を考慮して鉛直荷重が大きく厳しい環境を選定することが重要となる。

そこで、2013年より(株)高速道路総合技術研究所と共同で行った新名神高速道路・切畑トンネル近傍で行った、土被り53mのハウエル管の埋設挙動調査(以下: 挙動調査と称す)を用いて、2次元FEM解析と比較し妥当性を検証する。なお、挙動調査の設計方法は、カルバート工指針とほぼ整合している。

(2) 挙動調査の概要

挙動調査は、新名神高速道路・切畑トンネル工事に使用されるハウエル管について、大深度下に埋設されたハウエル管の性能・健全性を評価することを目的とし、(株)高速道路総合技術研究所との共同研究で、2013年4月の盛土開始から2021年4月の8年間にわたり、埋設管に発生する応力およびたわみ率の測定を行った。

管を埋設する試験場所の地盤状況は、表層は53mの土重に耐えうる十分な支持力を有した良質地盤であり、下層地盤は岩盤層で構成されている。図4-1に挙動調査に用いる試験用埋設管の形状を示す。試験用埋設管はハウエル管φ800(R120)を用い、応力およびたわみを測定するための長さ4mの試験用埋設管と、両端に長さ1mのダミー管により構成した。なお、応力およびたわみ測定は2断面で行い、ダミー管端部には高密度ポリエチレン樹脂製の板にて蓋加工を行い、管内への土砂、地下水の侵入を抑制した。埋設管に生じる応力は、ひずみゲージにより円周方向の管内面ひずみ上部30°、下部15°ピッチの計18点計測し、測定したひずみにハウエル管の弾性係数を乗じることで応力変換した。さらに、埋設管に発生する鉛直たわみ量を、変位計を用いて計測した。また、管のたわみの抑制効果となる管周裏込材の変形係数及び密度を測定した。

試験用埋設管の設置断面を図4-2に示す。管周裏込材は砕石C-40を用い、管周裏込材の施工は設計要領第二集 擁壁保全編・擁壁建設編 カルバート保全編・カルバート建設編 平成16年8月(株)高速道路総合技術研究所)のモデル施工を参考に、表4-1の仕様に基づいて行った。

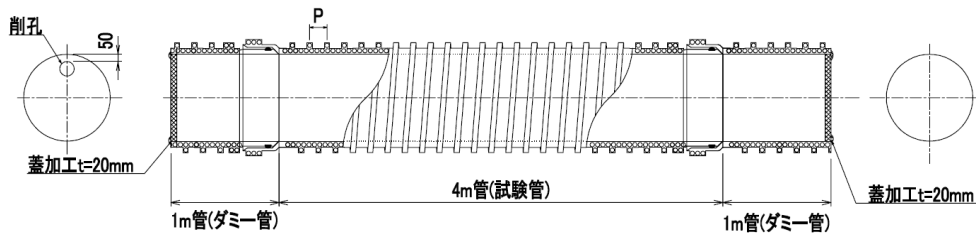


図 4-1 試験用埋設管

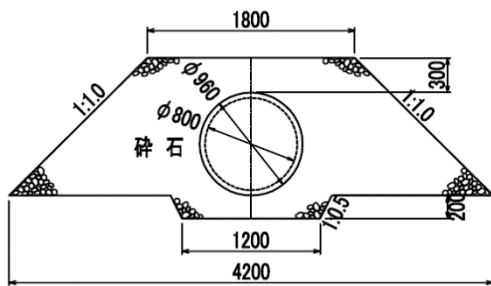


図 4-2 ハウエル管埋設断面 (参考図)

表 4-1 管周裏込材 施工仕様

工種	裏込材 B(砕石 C-40)
仕上がり層	200mm 以内
撒出し層	200mm 以内
転圧重機	300kg 級バイプロコンパクト(MVH-306DSC) 2.5t コンバインドローラ(TW350-1)
転圧回数	6回(バイプロコンパクト) 8回(コンバインドローラ)
管理基準	締固め度 $D_c > 92\%$

(3) 挙動調査を再現した2次元FEM解析

挙動調査を再現した2次元FEM解析の手法は、上載盛土高が高く一部材料定数が異なるが、前節の空港基本施設舗装下を想定した2次元FEM解析と同等の解析手法を用いた。図4-3、図4-4に解析モデル、表4-3に、2次元FEM解析に用いた物性値を示す。なお、管周裏込材の変形係数は、前項の施工方法で得られた平板載荷試験による実測値(平板載荷試験)を用いた。下層地盤の変形係数は、 $N=50$ と仮定して $E=2800N$ より求め、下層地盤の単位体積重量は解析結果に影響しないため設定していない。また、荷重条件について自動車荷重は考慮せず、埋設管周辺に等分布の鉛直土圧のみとした。

2次元 FEM 解析は STEP1(盛土 10m)と STEP2(盛土 53m)の 2 ステップに分けて行った。STEP1 は盛土高 10m まで地盤要素を設置し、STEP2 は STEP1 の状態に盛土高 43m に相当する等分布荷重 817kN/m を載荷して解析を行った。

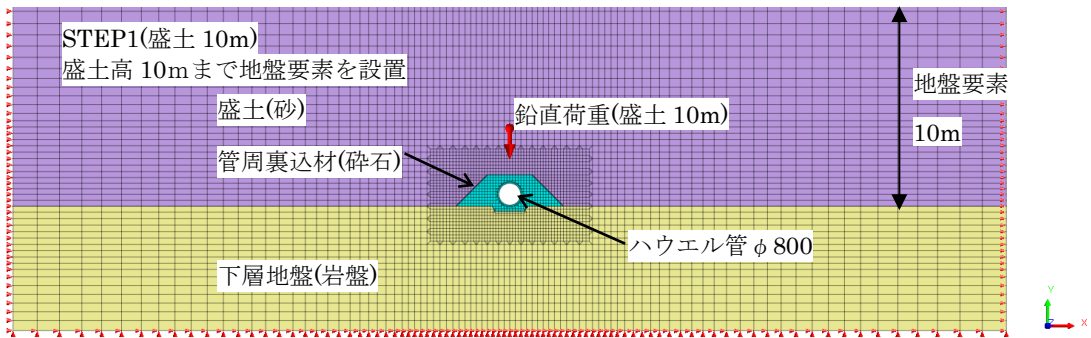


図 4-3 2次元 FEM 解析モデル(高盛土下 STEP1 盛土 10m)

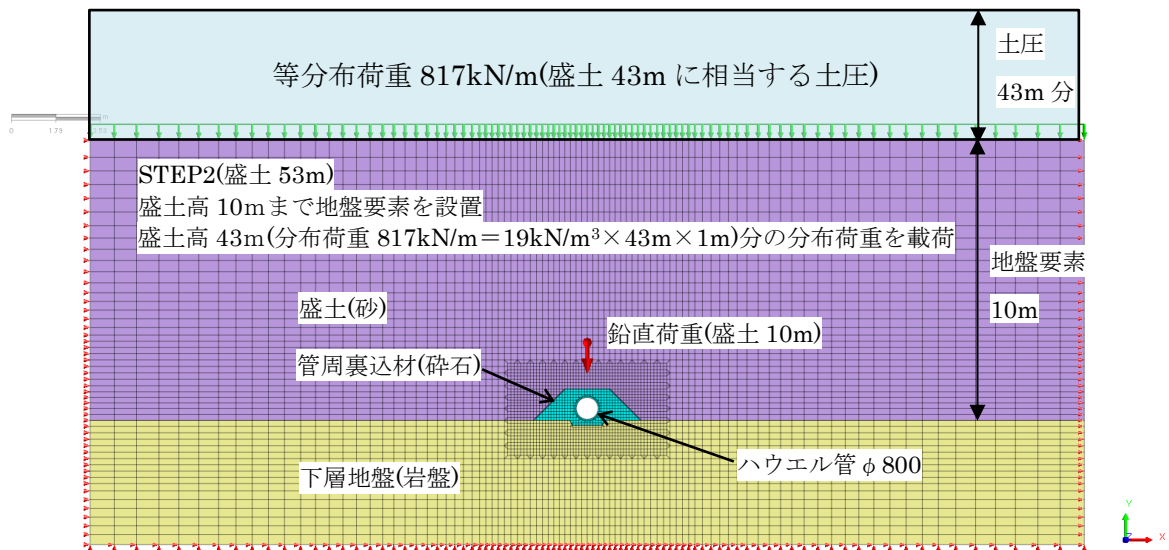


図 4-4 2次元 FEM 解析モデル(高盛土下 STEP2 盛土 53m)

表 4-3 2次元 FEM 解析 物性値(高盛土下)

		単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	弾性係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 v
地盤	盛土(砂)	19	10,500	0.35
	管周裏込材(碎石)	20	41,700	0.35
	下層地盤(岩盤)	—	140,000	0.35
ハウエル管	φ 800 R120(換算肉厚 0.04822m)	9.6	980,000	0.4

(4) 解析結果の比較と評価

①ハウエル管に生じる応力の比較

図 4-5 に STEP1(盛土 10m)における挙動調査と 2次元 FEM で得られた円周方向応力を示す。盛土高 10m において、挙動調査と 2次元 FEM 解析の発生応力に大きな違いは見られないことから、碎石による管周の巻立材が機能しているといえる。

次に、図 4-6 に STEP2(盛土 53m)における挙動調査と 2次元 2次元 FEM 解析で得られた円周方向応

力を示す。左右非対称の挙動を示しているが、応力分布、応力値の傾向は概ね近似していると言え、2次元 FEM 解析の妥当性が確認できた。なお、応力分布が左右非対称については、管周の裏込材および盛土の転圧の不均一が原因の一つとして考えられる。また、カルバート工指針に基づく算定値と 2次元 FEM 解析結果を比較すると、管頂部、管側部および管底部全てにおいて、小さな値となった。

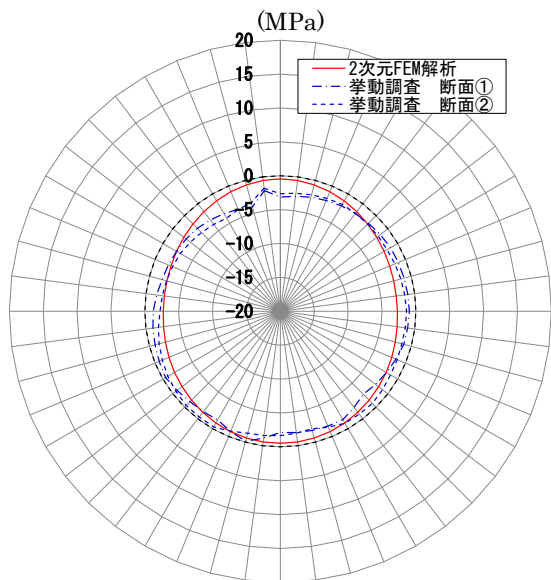


図 4-5 ハウエル管応力の比較（盛土 10m）

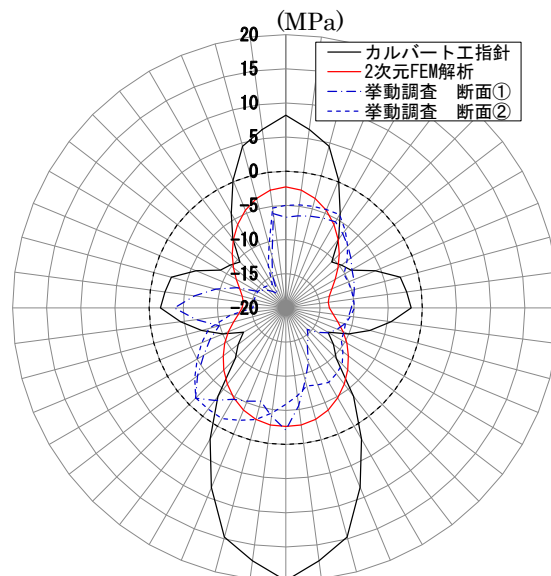


図 4-6 ハウエル管応力の比較（盛土 53m）

②ハウエル管に生じる鉛直たわみ率の比較

図 4-7 に盛土高 10m 時、53m 時におけるハウエル管の鉛直たわみ率を示す。盛土高によらず、挙動調査と 2次元 FEM 解析の発生たわみ率はほぼ一致しており、前述の応力と同様に 2次元 FEM 解析の妥当性が確認できた。また、カルバート工指針と比較すると、空港基本施設舗装下の検討結果と同様に、鉛直たわみ率は半以下の値であった。

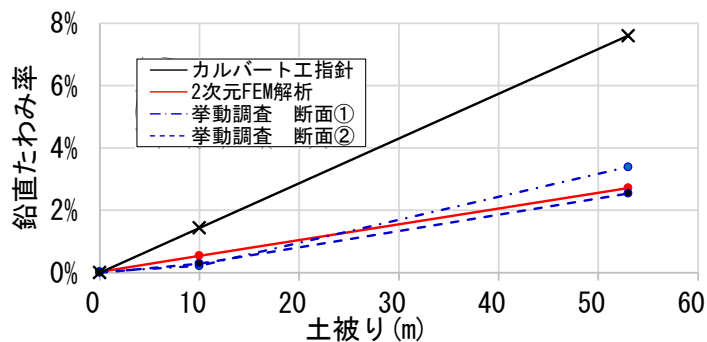


図 4-7 鉛直たわみ率比較

したがって、応力、鉛直たわみ率の比較より、2次元 FEM 解析が妥当であることを示す一つの結果となり、前節よりハウエル管は航空機荷重に対し、高い耐荷重性能を有しているといえる。

5. さいごに(今後の課題)

挙動調査の実測値、2次元 FEM 解析およびカルバート工指針の比較からハウエル管の十分な安全性が確認され、空港施設への適用性が確認された。2次元 FEM 解析は挙動調査の実測値とよく一致しているため、2次元 FEM 解析は妥当であり、今後有用な設計方法となりうる。2次元 FEM 解析結果はカルバート工指針に比べ小さいことから、要求性能を満足するという視点でコスト削減が可能と考えられ、実務への適用を目指した検討を進めて次回報告したい。

参考文献 1) 空港土木施設設計要領(構造設計編、2019)、国土交通省航空局

2) 道路土工カルバート工指針(2010)、(公社)日本道路協会

3) 高盛土下の埋設管に関する共同研究(2012年～2021年)、高耐圧ポリエチレン管協会—(株)高速道路総合技術研究所