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2報)

タキロンシーアイシビル㈱ 丸吉 克典

渡邊 若臣

㈱クレアテック 後藤 有志

1. はじめに

本稿では、空港基本施設舗装下にスリム化溝型断面で埋設されたハウエル管の挙動、および、第22 回空港技術報告会で課題となった偏心荷重の影響を調べ、呼び径・載荷範囲・偏心量をパラメータとし 網羅的な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2報として報告する。

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(JISA 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(JISA 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、インフラ整備に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」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 確認されているが、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。

ハウエル管の更なる適用拡大を目的に昨年開催された第22回空港技術報告会では、空港基本施設舗 装下に埋設されたハウエル管の挙動を以下の2ステップで検証・適用性に対する考察を行った。

ステップ1 ⇒ 埋設断面モデルに航空機荷重に相当する鉛直荷重を載荷させ、2 次元 FEM 解析と道 路土工カルバート工指針との結果比較およびハウエル管の適用性を検証。

ステップ2 ⇒ 既往のハウエル管の埋設挙動調査結果と埋設挙動調査を復元した2次元 FEM 解析の 結果を比較することで、ステップ1の結果が妥当であることを検証。

考察の結果、2 次元 FEM 解析は道路土工カルバート工指針に比べ、管に生じる引張応力とたわみ率 が小さいことから、要求性能を満足するという視点で設計時のコスト縮減が可能な解析手法であること が得られた。そこで、更なるコスト縮減方法の一つとして、従来の施工標準溝型断面に対して管の標準 的な溝型の掘削幅をスリム化したスリム化溝型断面を提案するため、2 次元 FEM 解析を行った。

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、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。呼び径は300~3000mmまでと幅広い ラインナップがあり、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。



3. スリム化溝型断面で埋設されたハウエル管の2次元 FEM 解析

(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)に準拠している。そこで、スリム化溝型断面で のハウエル管の挙動検証においても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、管上のみに載荷させ 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に示すスパングラー土圧分布の形状 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、呼び径 600mm および 1000mm、2000mm のハウエル管(土被り 0.3m)の管上に、土 圧と航空機荷重を想定した鉛直方向地中応力 275kN/m²を載 荷させた。設計条件の一覧を表3-1に示す。鉛直方向地中応 力 275kN/m²は表3-2を参考に codeF 航空機荷重・土被り 1m を想定して設定した。

表 3-1 設計条件

| 項目 | 単位 | 設計値 |
|------------------|-------------------|--------|
| | | 600 |
| 呼び径 d | mm | 1,000 |
| | | 2,000 |
| 土被り H | m | 0.3 |
| 鉛直土圧 Wv | kN/m² | 20 |
| 航空機荷重 Ww | kN/m ² | 255 |
| 鉛直荷重合計 W (Wv+Ww) | kN/m ² | 275 |
| 管周裏込材の変形係数 E | kN/m ² | 14,700 |

| 土被り | 土圧 | | 土圧 + 船 | 抗空機荷重 | | 土圧 + | トーイング | トラクター荷 | 苛重荷重 | 土圧+大 | 型消防車 | 土圧+自動車荷重 |
|------|-----|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|----------|
| h(m) | γ·h | codeF | codeE | codeD | codeC | LTK-0 | LTK-1 | LTK-12 | LTK-2 | LF-1 | LF-2 | T-25 |
| 1.0 | 20 | 275 | 275 | 242 | 242 | 96 | 90 | 59 | 63 | 49 | 47 | 70 |
| 1.5 | 30 | 205 | 205 | 176 | 158 | 90 | 85 | 60 | 50 | 51 | 49 | 64 |
| 2.0 | 40 | 184 | 184 | 148 | 120 | 83 | 74 | 58 | 52 | 56 | 54 | 65 |
| 2.5 | 50 | 166 | 166 | 130 | 104 | 79 | 73 | 62 | 60 | 62 | 61 | 70 |
| 3.0 | 60 | 154 | 154 | 121 | 98 | 81 | 76 | 70 | 70 | 70 | 70 | 76 |
| 3.5 | 70 | 150 | 147 | 118 | 99 | 86 | 82 | 80 | 80 | 80 | 80 | 83 |
| 4.0 | 80 | 135 | 129 | 109 | 97 | 93 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 91 |
| 4.5 | 90 | 139 | 131 | 114 | 104 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 5.0 | 100 | 144 | 135 | 120 | 112 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 |
| 5.5 | 110 | 150 | 142 | 127 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| 6.0 | 120 | 157 | 149 | 135 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 |
| 6.5 | 130 | 164 | 156 | 143 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 |
| 7.0 | 140 | 172 | 164 | 151 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| 8.0 | 160 | 188 | 181 | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 |
| 9.0 | 180 | 204 | 198 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 10.0 | 200 | 221 | 215 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |

表 3-2 鉛直方向地中応力(kN/m²)

(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 275kN/m²をハウエル管の直上に載荷し た。(図 3-2、表 3-3、図 3-3)。2 次元 FEM 解析の仕様を表 3-4、物性値を表 3-5、表 3-6 に示す。



表 3-3 解析モデル寸法(mm)

| | | 1 124 (111111) |
|-------|--------|----------------|
| 呼び径 | А | В |
| 600 | 12,000 | 4,174 |
| 1,000 | 20,000 | 6,734 |
| 2,000 | 40,000 | 12,852 |

表 3-42次元 FEM 解析仕様

| 項目 | 仕様 | | | |
|------|-----------------|--|--|--|
| 名称 | GTS NX(Ver.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 | | | |

| 呼び径 | 西志 | 板厚 (換算肉厚) | 単位体積重量 | 弾性係数 | 断面二次モーメント | 断面積 |
|-------|----|-----------|---------|------------------------|-----------|-----------------------|
| (mm) | 安糸 | t (m) | (kN/m²) | E (kN/m ²) | I (m4/m) | A (m ² /m) |
| 600 | 梁 | 0.02228 | _ | 980,000 | 9.216E-07 | 0.02228 |
| 1,000 | 梁 | 0.03714 | - | 980,000 | 4.269E-06 | 0.03714 |
| 2,000 | 梁 | 0.07428 | _ | 980,000 | 3.415E-05 | 0.07428 |

表3-5 ハウエル管解析物性値

表 3-6 地盤解析物性值

| | 西志 | 単位体積重量 | 弾性係数 | ポアソン比 |
|------|-------|---------|-----------|-------|
| | 女术 | (kN/m²) | E (kN/m²) | V |
| 現地盤 | 平面ひずみ | - | 100,000 | 0.35 |
| 裏込め材 | 平面ひずみ | - | 14,700 | 0.30 |

φ600(R30) 解析断面図





φ2000(R30) 解析断面図



図 3-3 スリム化溝型断面 2 次元 FEM 解析モデル図(裏込め材)と従来溝型断

図 3-3 に示す裏込め材の施工断面は締固め 機械寸法を考慮し、スリム化溝型断面で解析 を行った。ハウエル管をモデル化している梁 要素の厚さは、メッシュ上では0になる。し たがって、メッシュの見た目では、空洞と裏 込め範囲だけとなる。この空洞の径は、「管の 内径+換算管厚」としている。表 3-7 に荷重 解析の組合せを示す。解析は、解析モデル全 体に等分布荷重を載荷する全面載荷および載 荷範囲と偏心量をパラメータとして変化させ た部分載荷を行い、各呼び径で載荷範囲と偏 し量の影響を検討する。載荷範囲と偏心量は 「管の内径+換算管厚」に対する比率で表す。

(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 2 次 元 FEM 解析により得られた値を図4-1 およ び表 4-1、図 4-2 にそれぞれ示す。全面載荷 の場合、引張応力は解析したすべての呼び径 について発生していない。最大引張応力が発 生する条件は偏心量 0D の場合である。最大 引張応力は φ 600 の場合載荷範囲 1D、 偏 心量 0D で 2.65MPa、 φ 1000 の場合載荷範 囲 0.75D、 偏心量 0D で 3.32MPa、 φ 2000 の場合載荷範囲 0.5D、 偏心量 0D で 4.74MPa となった。全て許容応力である 16.2MPa 以下であった。

| 表 4-1 | 解析結果まとめ | 5 引張応力(MPa) |
|-------|---------|-------------|
|-------|---------|-------------|

| | | 呼び径・載荷範囲 | | | |
|-----|-------|------------|------------------|-----------------|--|
| | | ϕ 600 | ϕ 1000 | $\phi \ 2000$ | |
| | | 1D | $0.75\mathrm{D}$ | $0.5\mathrm{D}$ | |
| | 0.000 | 2.65 | 3.32 | 4.74 | |
| | 0.125 | 2.56 | 3.27 | 4.65 | |
| 偏心量 | 0.250 | 2.54 | 3.11 | 4.28 | |
| (四) | 0.375 | 2.48 | 2.97 | 3.68 | |
| (D) | 0.500 | 2.26 | 2.71 | 2.92 | |
| | 0.625 | 2.13 | _ | _ | |
| | 0.750 | 1.89 | 1.94 | 1.65 | |
| 全面 | 面載荷 | -0.63(圧縮) | -0.65(圧縮) | -0.42(圧縮) | |

表 3-7 荷重解析の組合せ

| 呼び径 | 等分布荷重 | 載荷範囲 | 偏心量 |
|-------|-----------|------------------|---------------|
| (mm) | p (kN/m²) | (D) | (D) |
| 600 | 275 | $0.25\sim1.75$ | $0 \sim 1$ |
| 1,000 | 275 | $0.25 \sim 1.75$ | $0 \sim 0.75$ |
| 2,000 | 275 | $0.25 \sim 1.75$ | $0~\sim~0.75$ |



図 4-2 解析結果まとめ(引張応力)

②ハウエル管の鉛直たわみ率の比較

ハウエル管に発生する応力について2次 元 FEM 解析により得られた値を図4-3およ び表4-2、図4-4 にそれぞれ示す。

解析を行ったすべての呼び径・載荷範囲に おいて最大たわみ率が発生する条件は偏心 量 0D の場合であり、偏心量が増加するとた わみ率は減少する。

最大たわみ率は φ 600 の場合載荷範囲 2.25D 偏心量 0D で 1.93%、 φ 1000 の場合 載荷範囲 1.75D 偏心量 0D で 1.90%、 φ 2000 の場合載荷範囲 1.25D 偏心量 0D で 1.95% となった。全て許容たわみ率である 5%以下 であった。

解析結果をまとめると、スリム化溝型断面 で2次元 FEM 解析を行ったすべてのケース で codeF 航空機荷重・土被り 1m を想定し て設定した等分布荷重 275kN/m²に対して、 引張応力とたわみ率が許容値以下となった。



図 4-3 解析結果一覧(たわみ率)



| 表 | 4-2 | 解析結果ま | とめ | たわみ率(%) |
|-----|------------|-------|------------|---------|
| -13 | - - | | $C \sim 2$ | |

| | | 呼て | バ径・載荷筆 | 範囲 |
|------------|-------|------------------|------------------|------------------|
| | | ϕ 600 | ϕ 1000 | $\phi 2000$ |
| | | $2.25\mathrm{D}$ | $1.75\mathrm{D}$ | $1.25\mathrm{D}$ |
| | 0.000 | 1.93 | 1.90 | 1.95 |
| | 0.125 | 1.93 | 1.88 | _ |
| 偏心量 (D) | 0.250 | 1.91 | 1.88 | 1,90 |
| | 0.375 | 1.91 | _ | _ |
| | 0.500 | 1.89 | 1.81 | 1.71 |
| | 0.625 | 1.84 | 1.75 | 1.56 |
| | 0.750 | 1.80 | 1.65 | 1.36 |
| 全面 | 載荷 | 1 72 | 1 64 | 1 65 |

③カルバート工指針による計算値と2次元 FEM 解析の比較

2 次元 FEM 解析で最大引張応力が発生した、φ2000 載荷範囲 0.5D 偏心量 0D の条件において カルバート工指針による設計値と 2 次元 FEM 解析の比較を行う。

表 4-3、図 4-5 にカルバート工指針(全面載荷)の設計値と 2 次元 FEM 解析(スリム化溝型断面)の比較を示す。カルバート工指針による計算値と 2 次元 FEM 解析結果は、引張応力およびたわみ率が許容値以下である。また、2 次元 FEM 解析結果は引張応力およびたわみ率がカルバート工指針による計算値よりも小さい。したがって、ハウエル管をスリム化溝型断面に適用可能と考える。

| X V V U U U U U U U U U U | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------|----------|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|--|--|
| 11171公 | 带重多研 | 引張応ス | 力(MPa) | たわみ率(%) | | | |
| FTU IE | 何里木什 | カルバート工指針 | 2 次元 FEM 解析 | カルバート工指針 | 2 次元 FEM 解析 | | |
| ϕ 600 | 部分載荷 偏心量 0D | - | <mark>2.65</mark> (載荷範囲 1D) | - | <mark>1.93</mark> (載荷範囲 2.25D) | | |
| | 全面載荷 | 11.99 | -0.63(圧縮) | 3.02 | 1.72 | | |
| $\phi \ 1000$ | 部分載荷 偏心量 0D | - | <mark>3.32</mark> (載荷範囲 0.75D) | - | <u>1.90</u> (載荷範囲 1.75D) | | |
| | 全面載荷 | 11.98 | -0.65(圧縮) | 3.02 | 1.64 | | |
| φ 2000 | 部分載荷 偏心量 0D | _ | <mark>4.74</mark> (載荷範囲 0.5D) | _ | <u>1.95</u> (載荷範囲 1.25D) | | |
| | 全面載荷 | 11.98 | -0.42(圧縮) | 3.02 | 1.65 | | |
| 許容値 | | 16 | 3.2 | 5.00 | | | |

表 4-3 カルバート工指針による計算値と2次元 FEM 解析の比較

5. さいごに

空港基本施設舗装下に埋設されたハウエル管の 挙動について検討した結果を以下に示す。

- ①codeF 航空機荷重・土被り 1m を想定した等分 布荷重 275kN/m²に対して、カルバート工指針 による計算値およびスリム化溝型断面での 2次 元 FEM 解析結果は、引張応力およびたわみ率 が許容値以下である。
- ②最大引張応力が発生する条件は偏心量 0D の場 合である。
- ③全面載荷の場合はハウエル管に引張応力が発 生しない。



これらの結果より、ハウエル管にスリム化溝型断面を適用可能と考える。また、2次元 FEM 解 析結果を活用することでさらに合理的な設計を行うことも可能と考えられる。

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) 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)(2021年)、国土交通省航空局