



# 既存サイホンの耐震性能照査のための優先順位決定 指標の提案

平山, 智章  
鋤田, 泰子  
有野, 治

---

## (Citation)

土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 74(4):I\_351-I\_360

## (Issue Date)

2018

## (Resource Type)

journal article

## (Version)

Version of Record

## (Rights)

© 2018 公益社団法人 土木学会

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007075>



# 既存サイホンの耐震性能照査のための 優先順位決定指標の提案

平山 智章<sup>1</sup>・楢田 泰子<sup>2</sup>・有野 治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)  
E-mail: hirayato@kajima.com

<sup>2</sup>正会員 神戸大学准教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1)  
E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 (独)水資源機構 豊川用水総合事業部 次長 (〒440-0801 愛知県豊橋市今橋町 8)  
E-mail: osamu\_arino@water.go.jp

サイホンは基幹管路の一構造物として重要な構造物であり、縦断方向の水路勾配が急であるために横断方向に合わせて縦断方向の耐震性を確保しておく必要がある。しかし、縦断方向の耐震設計法が確立されないまま建設されており、現在においてもサイホンの耐震性を対象とした研究事例は少ない。本研究では、サイホンの耐震性能照査手法を設定し、パラメータ解析によってサイホンの耐震上問題となる条件を整理した。さらに、耐震性能照査の第一段階として、複数のサイホンの中からより優先順位の高いサイホンを選定するための指標の提案を行った。サイホンの縦断方向の耐震性については、曲げに対する照査が重要であり、水路勾配が耐震性能に最も影響を与えることが示された。

**Key Words :** siphon pipe, dynamic analysis, seismic performance, parametric study

## 1. はじめに

我が国では 1950 年代以降の水需要の増加に合わせて水資源の開発とともに用水供給のための基幹管路の整備が進められた。サイホンは、開水路型式の水路の中で、エネルギー線以下にある低位部を通水する場合に設けられる自然流下の満流管体による水路<sup>1)</sup>のことで、大容量送水においても動力設備を必要としない利点がある。そのため、基幹管路の中で道路や河川、ため池等の横断箇所や谷筋の横断箇所に採用され、現在も用水供給の一翼を担っている。

サイホンは、トンネル等の地中線状構造物と構造的に同等として見なせるが、縦断方向の水路勾配が急であるため、耐震上は横断方向以外に縦断方向の検討が重要となる。しかし、既存サイホンの多くは、地中構造物の耐震計算法である応答変位法が確立される以前の 1950～70 年代に建設され、設計時に十分な耐震検討がなされていない。さらに、現在も具体的な耐震計算法を示した指針類はなく、サイホンの耐震性に関する研究事例も少ない。過去の地震において、サイホンに甚大な被害が出たことは報告されていない<sup>2)</sup>が、一度供用が開始されると直接内部の劣化や損傷の点検することは難しい。過去

に経年劣化によってサイホンの継目部で漏水が起こり、水が吹きあげる事例があったが、目地外部より漏水箇所を鋼板で覆う他に有効な復旧工法もない現状にある。

本研究では、サイホンの耐震性能照査手法を設定し、それに基づいて既存サイホンの耐震性能を簡易的かつ定量的に評価できる指標を提案することを目的とする。複数の既存サイホン全てに詳細な調査や解析による耐震性能照査を実施することは、経済的に非常に難しい。そこで、耐震性能照査の第一段階として、複数のサイホンの中からより簡易的に耐震上問題となりうるサイホンを抽出するために優先順位を決められれば、耐震診断の効率化につながる。

具体的には、サイホンの断面形状や勾配、地盤条件を踏まえて、複数のサイホンのモデルを対象にして地震応答解析を行う。そして、耐震上問題となる条件を整理し、解析結果の統計処理によって、より優先順位の高いサイホンを選定する指標の提案を目指す。

なお、本研究ではサイホンの耐震性についての解析検討を試みるが、検討断面には縦断方向のみを取り扱う。この理由として、地下鉄トンネルのような大断面の地中構造物に比べ、直径 2, 3m のサイホンでは、断面崩壊に至るような大規模な損傷は過去の被災事例で確認され

ていないこと<sup>3)</sup>、地中構造の地震被害例は、上下水道、エネルギー供給施設の縦断方向に多く見られること<sup>3)</sup>が挙げられる。また、既往の地中構造物の縦断方向における解析<sup>4,5,6)</sup>では、地形及び地盤物性の変化の大きいところで地盤のひずみが増加し、構造物の耐震性能に影響を与えていることが指摘されている。しかし、不整形地盤に対して水平な地中構造物を対象とすることが多く、本稿で検討するサイホンのような構造物の形状が短区間で変化するものを扱っているものは少ない。

## 2. サイホンの耐震性能照査法

本論後半のパラメータ解析によって複数のサイホンのモデルに対して耐震性能照査を行うため、はじめにサイホンの耐震性能照査法を設定した。サイホンは、水道用水、農業用水、工業用水と様々な用途に使用されているため、それぞれの設計指針があるが、中でも水道施設耐震工法指針<sup>7)</sup>(以下、水道指針と呼ぶ)は耐震設計について詳しいので、これを参考とした。

2009年の水道指針改訂以降、性能設計が導入され、水道施設の耐震性能は水道施設の重要度と対象地震動の強さとの相互関係によって規定されている。サイホンは、導水施設であり、また基幹水路に用いられている場合には末端事業体への用水供給にも影響することから、重要度の高い水道指針のランク A1 構造物といえる。また、レベル 2 地震動は、同指針において「当該施設の設置地点において発生すると想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するもの」として規定されており、ランク A1 構造物とレベル 2 地震動の関係より耐震性能 2「地震によって生じる損傷が軽微であって、地震後に必要とする修復が軽微なものにとどまり、機能に重大な影響を及ぼさない性能」を満足する必要がある。

サイホンは、縦断方向に屈曲部があり、暗渠、共同溝及びシールドトンネルと同様に、そのような箇所では大きな断面力が生じやすい。水道指針において縦断方向の耐震設計法は、原則として静的な応答変位法を用いることとされているが、縦断方向に沿って地表面や地層構成が著しく変化する場合には、動的解析法が推奨されている。本研究ではサイホンの構造上の特徴を踏まえて耐震性能照査は動的解析法で検討した。サイホンと類似構造物である暗渠、共同溝及びシールドトンネルの照査基準に基づき、本体構造において動的解析による構造部材の発生曲げモーメント及び発生せん断力に対する耐力照査をサイホンの耐震性能照査項目とした(表-1)。耐震性能照査は、動的解析で発生したせん断力及び曲げモーメントに対してそれぞれ式(1)に基づいて行った。

表-1 本研究で用いるサイホンの本体構造の耐震性能と照査基準 (L2地震動)

限界状態	構造物の耐力力が低下しない
損傷状態	地震によって生じる損傷が軽微であって、地震後に必要とする修復が軽微なものにとどまり、機能に重大な影響を及ぼさない性能
照査基準	発生曲げモーメント ≤ 曲げ耐力 発生せん断力 ≤ せん断耐力

$$\gamma_i \cdot \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、

$\gamma_i$ : 構造物係数で、一般に 1.0~1.2 とされる。本検討では 1.1 とした。

$S_d$ : 照査用応答値。本検討において動的解析により算定された応答値

$R_d$ : 照査用限界値。コンクリート標準示方書<sup>8)</sup>(以下、コン示と呼ぶ)に基づき算定

また、今後の水需要を踏まえると、多くのサイホンが新設されることは考えられず、既存構造物の維持管理が主となる。サイホンは地中に埋設され、常時通水されていることから点検や補修・補強が難しい。そのため、耐震性能照査をする際には、供用期間に応じて劣化の影響が少なからずあると考えられる。そこで、照査用限界値を算定する際に、コン示<sup>8)</sup>で示されている安全係数でこれに対応した。具体的には、限界値の算定に用いる部材係数の値を、コン示で示されている範囲の中で最大(一般に 1.0~1.3, 本検討では 1.3)とすることで、安全側の照査となるように設定した。

## 3. サイホンのパラメータ解析

### (1) 解析ケース

複数あるサイホンの中から効率よくサイホンの構造上の特徴を捉まえて解析ケースを設定するため、水資源機構の香川用水のサイホンを参考にした。香川用水の水資源機構管理区間 47km には、サイホンが 44 箇所、11km ある。それらは全てほぼ同時期に施工されているが、延長が 30m から 2.4km と断面も構造形式も様々である。これらのうち、縦断方向の応答特性を考慮して、解析ケースには表-2 に示す通り、断面形状、勾配、中央部の形状、盛土の 4 つの条件を変化させた全 24 ケース設定した。傾斜部の勾配については、文献<sup>9)</sup>において「傾斜角度は 15°以下を目標とし、25°を限度とする」とされていることから、同表の通り設定した。断面形状については、内径が 3m、壁厚が 300mm の同程度の断面をもつ箱型と

表-2 解析ケース

Case	断面	勾配	中央形状	盛土層	Case	断面	勾配	中央形状	盛土層
1	箱型	25°	曲管	B1-1	13	円形	25°	曲管	B1-1
2	箱型	15°	曲管	B1-1	14	円形	15°	曲管	B1-1
3	箱型	5°	曲管	B1-1	15	円形	5°	曲管	B1-1
4	箱型	25°	平坦	B1-1	16	円形	25°	平坦	B1-1
5	箱型	15°	平坦	B1-1	17	円形	15°	平坦	B1-1
6	箱型	5°	平坦	B1-1	18	円形	5°	平坦	B1-1
7	箱型	25°	曲管	B1-2	19	円形	25°	曲管	B1-2
8	箱型	15°	曲管	B1-2	20	円形	15°	曲管	B1-2
9	箱型	5°	曲管	B1-2	21	円形	5°	曲管	B1-2
10	箱型	25°	平坦	B1-2	22	円形	25°	平坦	B1-2
11	箱型	15°	平坦	B1-2	23	円形	15°	平坦	B1-2
12	箱型	5°	平坦	B1-2	24	円形	5°	平坦	B1-2

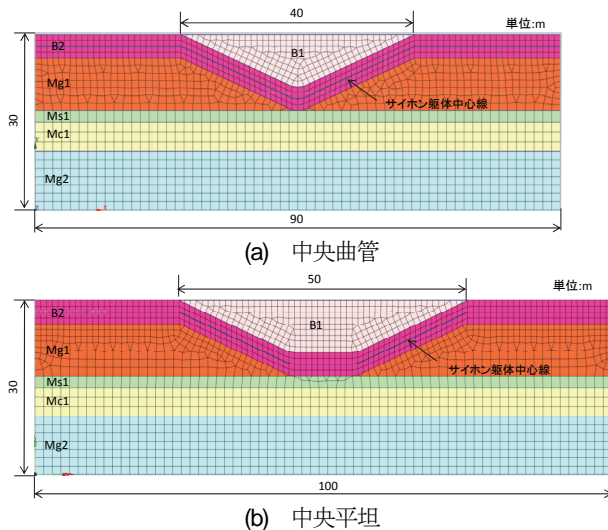


図-1 モデル化領域図

円形の2種類について検討した。また、サイホン中央部は盛土によって埋め立てられていることが多く、傾斜部の構造物の挙動を拘束すると考えられるために、サイホン上部の盛土の影響についても検討を行った。全ケースにおいて、サイホン及び地盤の構造は左右対称とし、中央部の形状が曲管の場合は解析対象のモデル幅が90m、中央部の形状が平坦の場合は100mとした。両ケースとも地盤深さは30mに設定した。モデルのメッシュ分割を図-1に示す。

## (2) 解析手法

サイホンの縦断方向の応答に着目し、平面ひずみ状態を仮定し、解析次元を2次元として扱った。2次元動的有限要素解析には汎用ソフトである解析プログラム Soil Plus Dynamic<sup>10)</sup>を使用し、地盤のせん断ひずみが $10^2$ 程度であることに留意して、自重解析結果を初期状態とした等価線形解析による検討を行った。モデル化領域は図-1に示すようにサイホンの全区間を対象とした。地盤は平面ひずみ要素、構造物は躯体中心線においてははり要素にてモデル化した。地盤要素の奥行き方向の分担幅は1mとした。解析モデルにおいて、地盤と構造物の間の付着

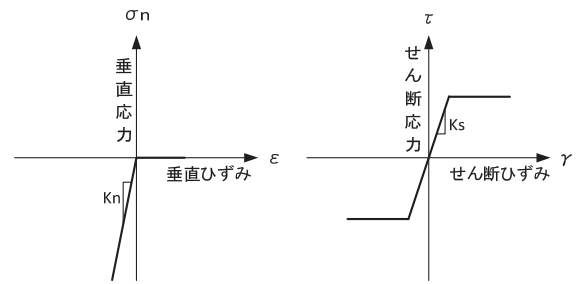
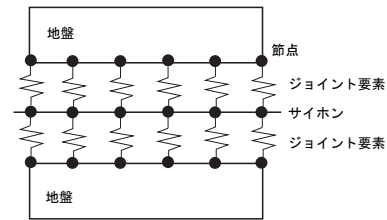

図-2 ジョイント要素の構成関係<sup>11)</sup>


図-3 ジョイント要素概念図

力は十分に高くないため、地盤とサイホンの間に滑りや剥離現象が生じる可能性がある。そこで、サイホンと地盤間に2重節点を設け、図-2及び図-3に示すようなジョイント要素(剛性: $1.0 \times 10^{12}$  kN/m<sup>2</sup>, せん断強度: $1.0 \times 10^{12}$  kN/m)で節点間を結合させることで不連続性を考慮した。また、側方境界は、エネルギー伝達境界、底面境界は水平粘性境界・鉛直固定境界を設定した。

## (3) 地盤及び構造物のモデル化

地盤および構造物のモデル化にあたって、表-3に示す地盤の物理定数を設定した。これらは現地のPS検層と標準貫入試験の結果より得られたものである。

地盤は水平成層構造の地盤モデルとし、Mg2, Mc1, Ms1層の地盤の層厚は一定で、盛土層B1, B2および、Mg1層の地盤の層厚はサイホンの傾斜部の勾配に応じて変更させた。盛土層B1に関してはB1-1とB1-2の2ケースの物性値を設定した。等価線形解析に用いる $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$ 関係は、文献<sup>12)</sup>に示されている砂・砂礫・粘土の中央値より図-4に示すように設定した。

サイホンの材料は鉄筋コンクリートとし、解析に用いる物理定数は道路橋示方書<sup>13)</sup>より設定した。また、箱型、円形それぞれのサイホンの断面形状は図-5に示す通りである。構造諸元は表-4に示す通りである。構造物の部材の力学モデルにおいて、骨格曲線は、原点と部材ひび割れ発生点、部材降伏点、最大耐荷力点を直線で結んだトリリニアモデルとし、履歴特性は修正武田モデルを用いた。

## (4) 入力地震動

本研究では、内閣府<sup>14)</sup>が公表している工学的基盤

表-3 パラメータ解析に用いた地盤物性値

地質・岩盤区分	採用したひずみ依存特性	層厚 (m)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	初期せん断剛性係数 $G_0$ (MN/m <sup>2</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	ポアソン比 $\nu$	初期減衰定数 $h_0$ (%)
B1-1	砂	1.8~9	19.6	28.4	119.1	0.451	3
B1-2	砂	1.8~9	19.6	115.2	240.0	0.451	3
B2	砂	4	15.7	20.4	112.8	0.458	3
Mg1	礫	1.8~9	19.6	319.7	400.0	0.455	3
Ms1	砂	2~9.2	20.1	597.5	540.0	0.449	3
Mc1	粘土	5	20.1	597.5	540.0	0.449	3
Mg2	礫	10	21.1	662.5	555.0	0.453	3

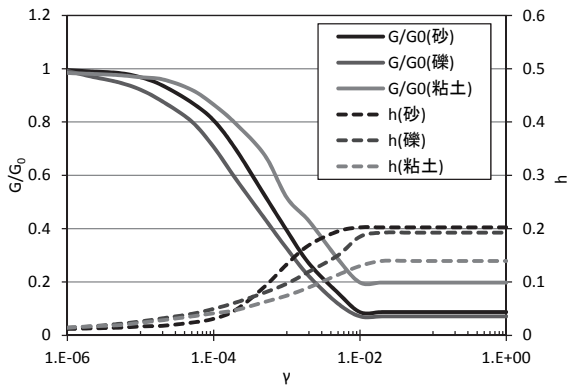
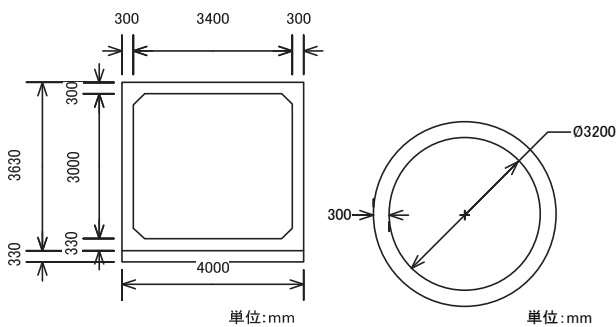


図-4 地盤各層に採用したひずみ依存性

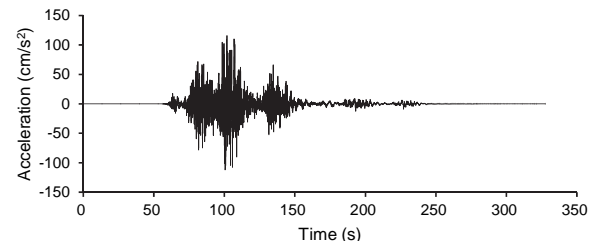


(a) 箱型 (b) 円形

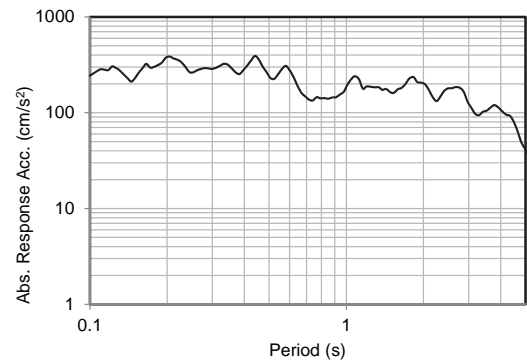
図-5 サイホンの断面形状

表-4 サイホンの物理定数

断面形状	断面積 (m <sup>2</sup> )	断面二次モーメント	
		強軸回り(m <sup>4</sup> )	弱軸回り(m <sup>4</sup> )
箱型	5.64	11.3	12.1
円形	3.29	5.09	5.09
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ヤング率 (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	
24.5	$2.35 \times 10^7$	0.167	



(a) 時刻歴加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル

図-6 入力地震動

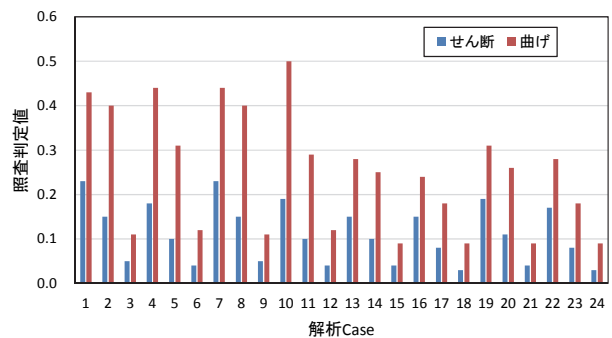


図-7 各 Case の照査判定値

## (5) 解析結果

### a) 応答の概要

( $V_s=350\sim700\text{m/s}$ ) における南海トラフ巨大地震の想定地震動 (基本ケース) のうち、表-3 で引用した場所の近傍の地震動を、入力地震動として用いた。図-6 に入力地震動の時刻歴加速度波形及び、加速度応答スペクトルを示す。最大加速度は  $115.7\text{Gal}$  である。地震動の入力は、図-1 の地盤モデルの下端から上昇波として与えた。

本解析では、構造物と地盤との間に滑りや剥離を表現したジョイント要素を入れていたが、24 ケース全てにおいて滑りや剥離に至ることはなかった。入力地震動のレベルが小さいこともあるが、構造物が硬質な基盤に頑着されていることも全体的な応答が小さくなったと考えられる。図-7 に式(1)より算定した各 Case のせん断力お

よび曲げモーメントの照査判定値 ( $\gamma S_d/R_d$ ) を示す。照査判定値がせん断力の場合には 0.22 以下、曲げモーメントの場合には 0.5 以下となり、全てのケースにおいて、躯体に生じるせん断力及び曲げモーメントは耐力を下回る結果となった。以下に、断面力毎に応答特性を分析する。また、耐震照査はせん断力と曲げモーメントで行うが、縦断方向の応答として継目の伸縮が考えられる。そこで、軸ひずみについても検討したので後述する。

#### b) せん断力

せん断力の照査判定値をみると、解析 case の 3 ケースごとに値が段階的に小さくなっており、水路勾配の影響が顕著であることがわかる。最大せん断力分布の一例を図-8 に示す。全ケースにおいて、最大せん断力の分布形状はサイホン中央の谷部もしくは左右の屈曲部で大きくなる類似した応答を示した。図-8(a)の中央曲管のケースでは、せん断力は曲管部で最大となった。一方、図-8(b)の中央部が平坦のケースでは、平坦部のせん断力も大きい、最大は左右の屈曲部で生じた。また、傾斜部の勾配が大きくなるほど、せん断力も大きくなった。一方で、断面形状では箱型の方が円形よりも大きな応答を示した。これは、箱型の方が断面 2 次モーメントが大きいためと考えられる。サイホン上部の盛土の硬軟を比較をしたが、サイホン自体の応答にはそれほど影響をしていなかった。

以上より、傾斜部の勾配及び中央部の形状が、躯体に生じるせん断力に影響を与えると考えられる。

#### c) 曲げモーメント

照査判定値は、せん断力に比べて曲げモーメントの方が倍程度大きな値となった。サイホン縦断方向においては、耐震上曲げに対して不利となることが考えられる。また、せん断力と同様に、解析 case の 3 ケースごとに値が段階的に小さくなり、サイホンの応答が水路勾配に強く影響され、水路勾配が大きいほど、曲げモーメントの照査判定値も大きくなった。

最大曲げモーメント分布の一例を図-9 に示す。全ケースで、せん断力の場合と異なり、曲げモーメントは中央部の形状に依らず、傾斜部で最大となり、屈曲部、中央部では小さくなった。地盤のせん断振動の 1 次モードが躯体に作用すると考えると、躯体の勾配が大きくなるほど、躯体の軸直角方向に作用する地盤のせん断変形は大きくなるので、曲げモーメントは大きくなると考えられる。一方、管軸方向が水平の箇所については曲げモーメントは作用しないため、屈曲部、中央部では小さくなったと考えられる。断面形状については、円形よりも箱型の方が生じる曲げモーメントは大きくなった。これは、せん断の場合と同様で、箱型の方が断面 2 次モーメントが大きいためと考えられる。サイホン上部の盛土の条件は他のパラメータほど影響をしていなかった。

以上のことより、躯体に生じる曲げモーメントについては、傾斜部の勾配及び断面形状に強く影響を受けるといえる。

#### d) 軸ひずみ

本研究での解析モデルでは、躯体間にある継目のモデル化は行っていない。そこで、躯体の軸方向伸縮を検討するにあたり全ケースの躯体の軸ひずみを比較した。最大の軸ひずみは case22 で、 $6.94 \times 10^{-6}$  が生じた。図-10 に case22 の軸力分布を示す。サイホンの谷部で拘束されるために、軸ひずみは水平部、とくに傾斜部との接続よりの水平部に大きな軸ひずみが生じることがわかった。他の解析ケースにおいても類似した軸ひずみ分布になっていた。曲げモーメントやせん断力の応答と同じく、傾斜部の勾配が大きくなるほど、軸ひずみも大きくなり、傾斜部の勾配に対して敏感に応答することが確認できた。ただし、軸ひずみの値は小さいために、サイホンの挙動は曲げモーメントが支配的であると考えられる。

### 4. 優先順位決定指標の提案

#### (1) 検討方法

パラメータ解析によってサイホン縦断方向については、せん断力よりも曲げモーメントの方が耐震上不利となることがわかった。したがって、曲げモーメントの照査判定値を優先順位を決定する指標とし、パラメータ解析で検討した項目を用いて、式(2)に示す実験式を作成した。

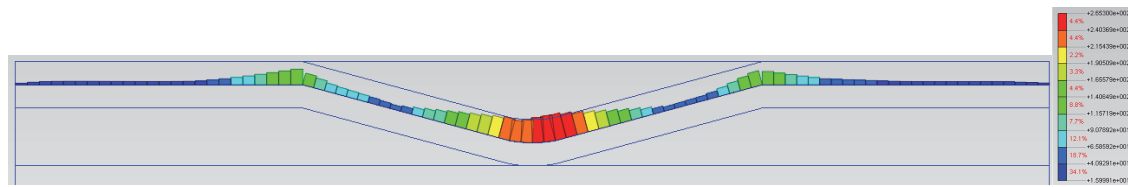
$$Y = k \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \quad (2)$$

ここに、 $Y$ : 照査判定値、 $k$ : 基準となる照査判定値、 $C_1, C_2, C_3, C_4$ : 断面、勾配、中央の形状、盛土剛性に関する係数

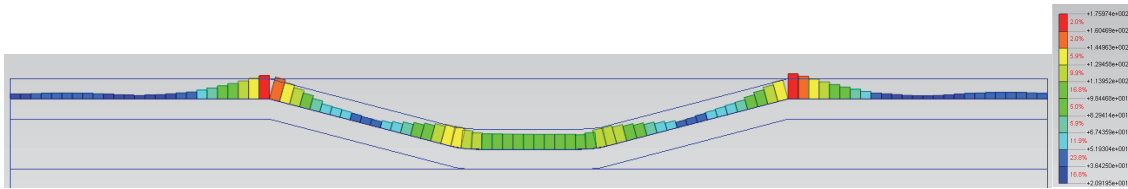
本検討において、断面、勾配、中央の形状、盛土剛性はそれぞれ独立の変数であるので、円形・勾配 5°・中央平坦・盛土剛性高を基準属性とし、回帰分析ではダミー変数として与えた。対象属性の組み合わせによる曲げモーメントの照査判定値を目的変数として、対数場での数量化理論第 I 類による解析を行った。解析には、全 24 ケースの曲げモーメントの照査判定値を用いた。

#### (2) 回帰分析結果

表-5 に回帰分析によって得られた各係数を、表-6 にパラメータ解析による曲げの照査判定値と表-5 の係数より求めた照査判定値  $Y$  の推定値の比較を示す。なお、本回帰分析における決定係数  $R^2$  は 0.966 であった。表-5 の各係数のレンジ幅をみると、傾斜部の勾配が最も大きく、次に断面と中央部の形状となる。表-6 より、判定

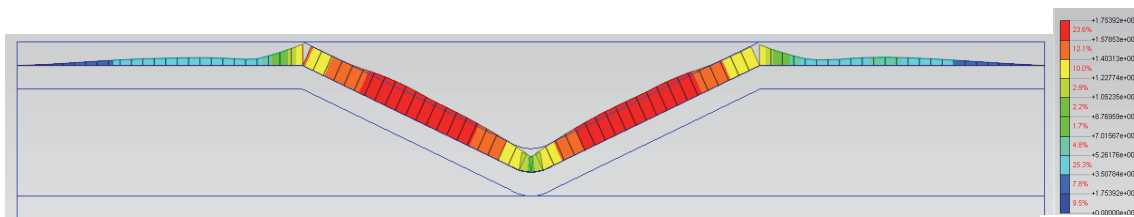


(a) case2

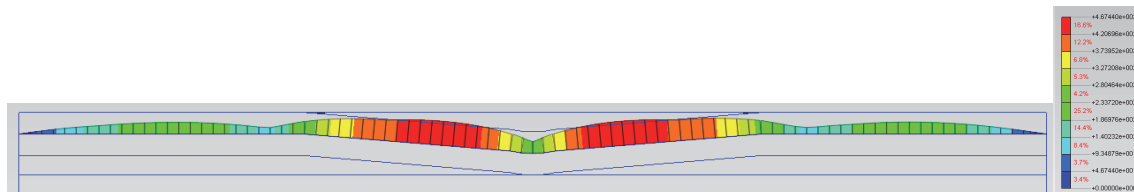


(b) case5

図-8 最大せん断力



(a) case1



(b) case3

図-9 最大曲げモーメント

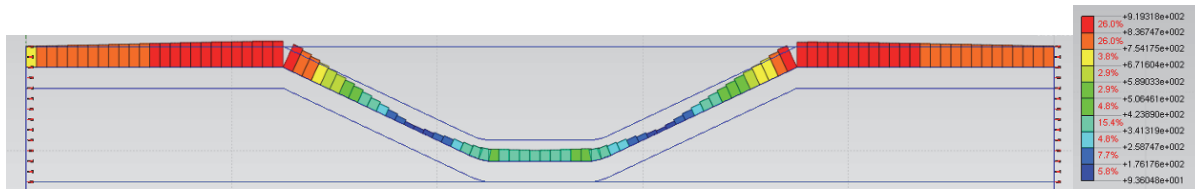


図-10 最大軸力 (case22)

値と推定値はほぼ一致しており、回帰式の当てはまりが良かった。各係数について見ると、断面形状は箱型の方が、また、傾斜部の勾配は大きい方が照査判定値の推定値を大きくする傾向にある。

### (3) 提案する優先順位決定指標

回帰分析結果をもとに、曲げモーメントの照査判定値を既存サイホンの耐震性能照査の優先順位を決定する指標（以下、決定指標）として提案する。ここで、各係数の値は小数第一位までとし、盛土剛性については、係数の差異がないので省略した。勾配については、勾配が大きくなるにつれ、係数も大きくなったことを考慮して、0°～10°未満については5°の場合の係数、10°～20°未満に

表-5 回帰分析結果

k	断面	C <sub>1</sub>	勾配	C <sub>2</sub>
0.08	箱型	1.50	5°	1.00
	円形	1.00	15°	2.68
			25°	3.47
	形状	C <sub>3</sub>	盛土剛性	C <sub>4</sub>
	中央曲管	1.11	低	0.97
	中央平坦	1.00	高	1.00

については15°の場合の係数、20°以上については、25°の場合の係数を用いることとした。以上より、決定指標の算出式は以下の通りとなる。

$$\beta = k \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \quad (3)$$



表-6 照査判定値と推定値の比較

Case	判定値	推定値	Case	判定値	推定値
1	0.43	0.45	13	0.28	0.30
2	0.40	0.35	14	0.25	0.23
3	0.11	0.13	15	0.09	0.09
4	0.44	0.40	16	0.24	0.27
5	0.31	0.31	17	0.18	0.21
6	0.12	0.12	18	0.09	0.08
7	0.44	0.46	19	0.31	0.31
8	0.40	0.36	20	0.26	0.24
9	0.11	0.13	21	0.09	0.09
10	0.50	0.42	22	0.28	0.28
11	0.29	0.32	23	0.18	0.21
12	0.12	0.12	24	0.09	0.08

表-7 決定指標と優先順位

判定	A	B	C
決定指標 $\beta$	0.35以上	0.15~0.35	0.15未満

ここに、 $\beta$ : 決定指標、 $k$ : 0.08 (暫定値)、 $C_1$ : 断面に基づく係数で、箱型: 1.5、円形: 1.0 (構造物が口径3~4m・壁厚 300mm 程度で共通の場合)、 $C_2$ : 勾配に基づく係数で、 $0^\circ \sim 10^\circ$ 未満: 1.0、 $10^\circ \sim 20^\circ$ 未満: 2.7、 $20^\circ$ 以上: 3.5、 $C_3$ : 中央部の形状に基づく係数で、中央部が曲管: 1.1、中央部が平坦: 1.0

なお、 $k$ の値については、入力する地震動の大きさや周期特性、地盤条件や構造物の剛性によって異なると思われるため、ここでは暫定値とした。

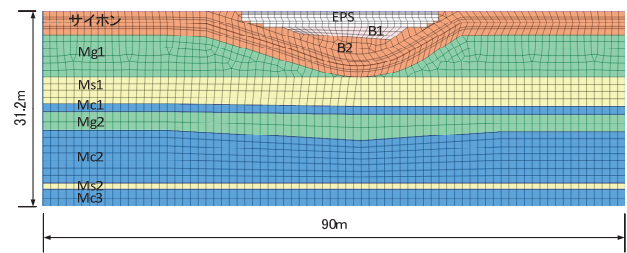
式(3)より、決定指標は 0.08~0.46 の間の数値となり、全係数の組み合わせの結果を考慮して、表-7 に示す通り、A、B、C の 3 段階に分けて判定する。ここで、同表の判定について、A: 優先順位の高い構造物、B: 検討が必要であると思われるが、A に比べると優先順位は低い構造物、C: 優先順位の低い構造物、とした。

以上、サイホンの構造形式により、決定指標を算出し、表-7 に基づく判定を実施することにより、耐震性能照査の優先順位を決定した。

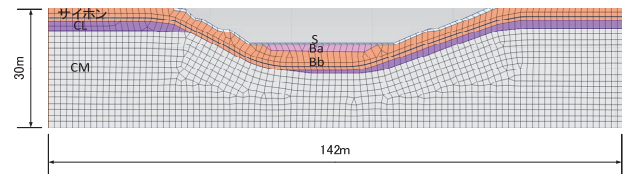
## 5. 優先順位決定指標の適用

### (1) 実在サイホン解析結果と決定指標の比較

著者らは、本研究で示したパラメータ解析とは別に2つの実在サイホン (以下、Aサイホン、Bサイホンと呼ぶ) を対象に詳細にモデル化を行い、応答計算および耐震性能照査を実施した<sup>15)</sup>。Aサイホンは、水平長39.0m、実管長41.6mの箱型断面で、勾配は $17.1^\circ$ と $28.1^\circ$ で非対称の谷形状である。中央部の形状は曲管で、表層まで盛土がある。もう一方のBサイホンは、水平長80.0m、実管長84.0mで、円形断面、勾配は $19.3^\circ$ と $27.3^\circ$ で中央部の形



(a) A サイホン



(b) B サイホン

図-11 実在サイホンの有限要素モデル

状は平坦である。土被りは浅く、地表は谷地形をしている。解析で用いた有限要素モデルを図-11に示す。

Aサイホン及びBサイホンの検討に用いた地盤条件を表-8に示す。ひずみ依存特性は図-4と同様とした。Aサイホンの入力地震動はパラメータ解析で用いた図-6に示す波形と同じである。Bサイホンの入力地震動は図-12に示す波形 (最大加速度: 184.8Gal) を用いた。また、サイホンの形状はAサイホンが箱型、Bサイホンが円形で、物理定数は表-4と同じ値を用いた。さらに、Aサイホン及びBサイホンの地震応答解析結果を用いて式(1)により、曲げモーメントの照査判定値を算定した。

一方、前章にて提案した式(3)より両サイホンの決定指標 $\beta$ を算定し、照査判定値との比較を行った。Aサイホンの決定指標には、変数は箱型・勾配 $25^\circ$ ・中央曲管、Bサイホンの決定指標には、円形・勾配 $25^\circ$ ・中央平坦とし、 $k$ の値はいずれも0.08を適用して算出した。

表-9にこれらと比較した結果を示す。同表より、Aサイホンは決定指標が0.45となり、A判定、Bサイホンは決定指標が0.27となり、B判定となった。これより、2つのサイホンについては、Aサイホンの方が耐震性能照査を行う優先順位が高いと判断できる。一方、決定指標と地震応答解析の照査判定値を比較すると、Aサイホンの決定指標は照査判定値を0.24ポイント下回り、Bサイホンの決定指標は照査判定値を0.10ポイント上回る結果となった。ただし、AサイホンとBサイホンのそれぞれの決定指標の大小が変わることはなかった。

両者が異なる値となった要因を考察する。Aサイホンについては、パラメータ解析の条件と異なる点は、地盤モデルとサイホンの傾斜部の勾配である。地盤モデルの最下層での増幅による入力地震動の影響は大きくないと



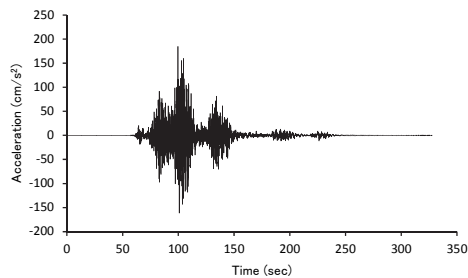
表-8 地盤物性値

(a) Aサイホン

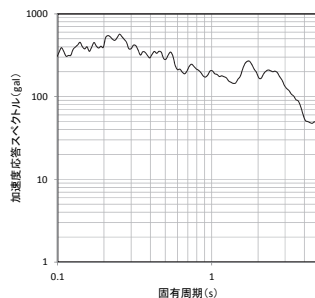
地質・岩盤区分	採用したひずみ依存特性	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	初期せん断剛性係数 $G_0$ (MN/m <sup>2</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	ポアソン比 $\nu$	初期減衰定数 $h_0$ (%)
第1盛土層(B1)	砂	19.6	28.4	119	0.451	3
軽量盛土(EPS)	—	0.2	2.6	360	0.422	3
第2盛土層(B2)	砂	15.7	20.4	113	0.458	3
三豊第1礫質土層(Mg1)	礫	19.6	319.7	400	0.455	3
三豊第1砂質土層(Ms1)	砂	20.1	597.5	540	0.449	3
三豊第1粘性土層(Mc1)	粘土	20.1	597.5	540	0.449	3
三豊第2礫質土層(Mg2)	礫	21.1	662.5	555	0.453	3
三豊第2粘性土層(Mc2)	粘土	20.1	713.2	590	0.463	3
三豊第2砂質土層(Ms2)	砂	19.6	179.8	300	0.484	3
三豊第3粘性土層(Mc3)	粘土	19.6	179.8	300	0.484	3

(b) Bサイホン

地質・岩盤区分	採用したひずみ依存特性	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	初期せん断剛性係数 $G_0$ (MN/m <sup>2</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	ポアソン比 $\nu$	初期減衰定数 $h_0$ (%)
表土(S)	砂	20.6	10.3	70	0.440	3
造成盛土(Ba)	砂	20.6	10.3	70	0.440	3
埋土(Bb)	砂	22.6	180.6	280	0.464	3
CL級岩盤(CL)	礫	24.1	855.2	590	0.426	3
CM級岩盤(CM)	礫	26.5	4565.2	1300	0.446	3



(a) 時刻歴加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル

図-12 Bサイホン入力地震動

表-9 照査判定値と決定指標の比較

	地震応答解析より求めた照査判定値(曲げ)	決定指標	判定
Aサイホン	0.69	0.45	A
Bサイホン	0.17	0.27	B

考えられる。一方、傾斜部の最大勾配は 28°程度で、パラメータ解析で検討した 25°の勾配よりも大きいため、

勾配によって曲げモーメントが大きくなったと考えられる。次に、B サイホンについては、地盤モデル、入力地震動、傾斜部の勾配がパラメータ解析の条件と異なる。傾斜部の勾配は 27.3°なので、A サイホンと同じく照査判定値を大きくする方向の要因と考えられる。その一方で、盛土層の下に CM 級の岩盤が広く分布しており、サイホンに入力される地震動の増幅が低減されたために、傾斜部で大きくなったとしても全体として B サイホンの応答が小さくなったと考えられる。入力地震動はパラメータ解析と異なっているが、構造物の応答に影響を与えるような差異はないと考えられる。

以上のことから、サイホンの勾配の設定や他の入力地震動への適用には今後さらに検討が必要である。その一方で、入力地震動に差異が無いような限られた地域にある複数のサイホンを相対的に評価をして、三段階程度の優先順位をつけるには本決定指標は利用できると考えられる。

## (2) 既存サイホンへの適用例

香川用水の全 44 箇所の既存サイホンに耐震性能照査のための優先順位決定指標を適用した。なお、決定指標算出の際において、各サイホンの断面形状を資料から確認できなかったため、安全側となるように中央部の形状に基づく係数は  $C_s=1.1$  とした。香川用水全 44 サイホンのうち、A 判定が 14 箇所、B 判定が 27 箇所、C 判定が 3 箇所に選別できた。A 判定となったサイホンの特徴として、水路勾配が 20°を超えるサイホンが多かった。このうち、A 判定となったサイホンから優先して、詳細な

耐震性能照査を実施することが、本研究で提案する既存サイホンの性能照査の手順となる。

## 6. まとめ

本研究では、耐震検討が十分にされていないサイホンに着目し、既存サイホンの耐震性能照査の第一段階として、性能照査の優先順位が高い構造物から順に動的解析による詳細な検討を実施することができるための指標を提案した。本研究による主要な結論は以下の通りである。

- (1) サイホン縦断方向の耐震性は、せん断力よりも曲げモーメントに対して厳しい条件となっており、また、躯体に生じる曲げモーメントは、サイホン傾斜部で大きくなった。
- (2) サイホンの傾斜部の勾配が大きくなるほど躯体に生じるせん断力及び曲げモーメントの耐震性照査値は、大きくなった。
- (3) 本研究で提案した決定指標を既存サイホンに適用したところ、詳細解析によって算出された照査判定値よりも最大 0.24 ポイントの誤差で評価することができた。入力地震動に大きな差異が無いような限られた地域にある複数のサイホンを対象に、相対的に評価をして、三段階程度の優先順位をつけるには本決定指標は利用できると考えられる。

今後の課題として、サイホンには構造目地が存在し、より詳細地震時挙動を再現するためにも、その影響を考慮する必要がある。また、優先順位決定指標の算出においては、レベル 2 地震動の一つとして入力地震動を用いて検討を行ったが、今回解析に用いた入力地震動の加速度が小さく、地盤のひずみも非線形化領域に達していない。地盤が非線形挙動を示すような規模の地震動を用いて検討を行うと、回帰分析の結果にも影響を与えると考えられ、決定指標の適用には注意が必要である。今後は異なる規模の地震動や地盤条件について検討し、決定指標の汎用性の確認や精度の向上を図る必要がある。

**謝辞：**本研究の遂行にあたり、(独)水資源機構香川用水管理所には貴重なデータを提供して頂いた。ここに記して謝礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) (社)農業村工学会：農業村工学ハンドブック改訂七版，2010.
- 2) 豊島弘三，阿久津弘，野呂敏文，石堂隆憲：日本海中部地震によるパイプラインの被災とその復旧，農業土木学会誌，Vol.52，No.6，pp.23-28，1984.
- 3) (社)土木学会：続・実務に役立つ耐震設計入門（実務編），2014.
- 4) 渡辺和明，小池真史，立石章，高久雅喜，本宮栄二，道廣英司：既設沈埋トンネルの耐震性能に関する検討，地震工学研究発表会報告集，Vol.28，pp193-200，2005.
- 5) 竹内幹雄，高橋忠，元山宏，渡辺啓行：地盤剛性急変部の線状地中構造物の地震時応力評価法，土木学会論文集，No.422/1-14，pp.323-332，1990.
- 6) 橘義規，大塚久哲，宮森保紀，矢野恵美子：応答変位法を用いた沈埋トンネル縦断方向の耐震設計における地盤変位の評価法および杭・継手・地盤剛性の影響に関する考察，構造工学論文集，Vol.51A，pp.549-559，2005.
- 7) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版，2009.
- 8) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕2012 年制定，2013.
- 9) (独)水資源機構：サイホン設計図面，内部資料，2016.
- 10) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社：Soil Plus Dynamic.
- 11) (社)土木学会：動的解析と耐震設計 第 2 巻 動的解析の方法，1989.
- 12) (社)土質工学会：わかりやすい土質力学原論〔第 1 回改訂版〕，1992.
- 13) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
- 14) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会，[http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data\\_teikyoku.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data_teikyoku.html) (2016 年 11 月 1 日閲覧)
- 15) 平山智章，鎌田泰子，有野治：動的解析に基づく既存サイホン縦断方向の耐震性能照査，平成 29 年度土木学会全国大会，2017.

(2017.11.2 受付，2018.1.15 修正，2018.2.17 受理)

## A PROPOSAL FOR PRIORITY INDEX OF EVALUATION FOR SEISMIC PERFORMANCE OF EXISTING SIPHON PIPES

Tomoaki HIRAYAMA, Yasuko KUWATA and Osamu ARINO

Siphon pipe is a crucial structure as a part of trunk line for water supply. Since the channel slope is high, the seismic evaluation for the direction of crossing as well as for the direction of running is necessary. However, most of the existing siphon pipes were constructed before establishing of calculation method of seismic design. The studies on seismic performance of siphon pipe have been done few. In this study, the check method of seismic performance for siphon pipe was set and the problems on seismic performance was made clear based on this check method throughout the parametric studies of dynamic analysis. In addition, the priority index on selecting the siphon among several ones was proposed as the first stage of the seismic performance check. As the results, the check to the bending moment is considered as an indicator of determining the priority on seismic evaluation. It was shown that the channel slopes strongly affected seismic performance in the direction of running.