

下水道施設耐震計算例と「MOLEMAN-i」による計算結果の比較

下水道施設耐震計算例-管路施設編-後編(2015 年度版)に掲載されたコンクリート系セグメントのシールド管きよの常時、レベル1地震動、レベル2地震動の計算結果と当社のシールドトンネル断面力解析システム「MOLEMAN-i」による常時、レベル1地震動、レベル2地震動の計算結果との比較を行った。

計算手法として応答変位法を用いた。

1. 解析の基本的な計算条件

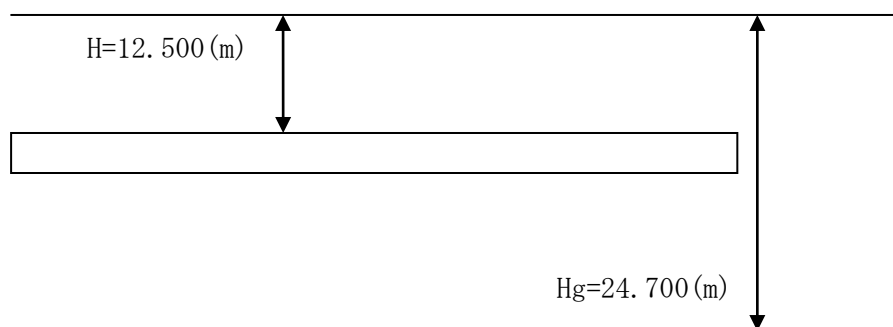
本件で用いた計算条件は以下の通りである。

セグメントの物性値を、表1に示す。

表1 セグメント物性値

・ヤング率(kN/m ²)	3.3×10 ⁷
・セグメント厚さ(m)	0.125
・セグメント幅(m)	1.0
・図心半径(m)	1.7125
・断面積(m ²)	0.125
・断面2次モーメント(m ⁴)	1.6276×10 ⁻⁴
・単位長重量(kN/m)	3.25

埋設条件を図1および表2に示す。



耐震検討上の工学的基盤面

図1 埋設条件

表2 埋設条件

・地表標高 GL(m)	10.0
・土被り H(m)	12.500
・地表面からの地下水位 Hw(m)	3.300
・地盤反力係数 k(kN/m ³)	2500

常時における荷重条件を図2 および表3 に示す。

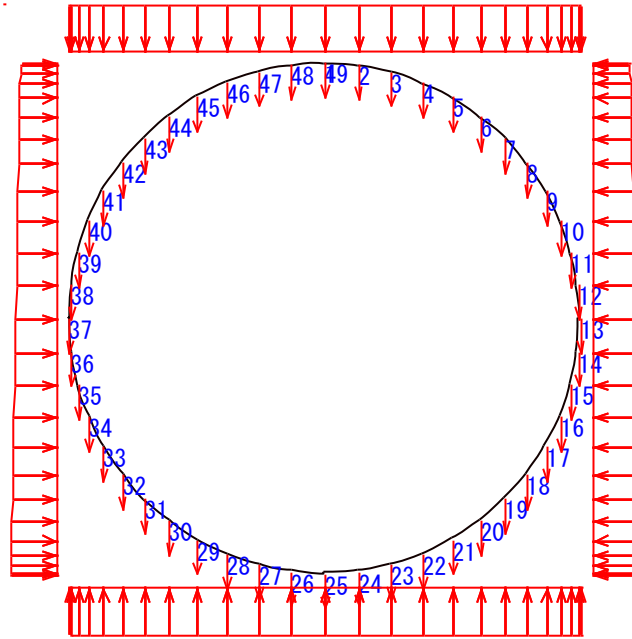


図2 常時荷重図

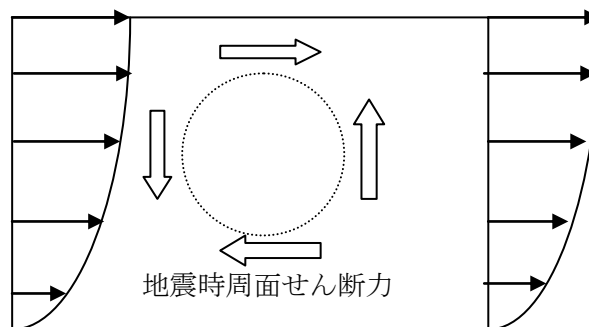
表3 分布荷重設定

荷重名	荷重値(始点) (kN/m ²)	荷重値(終点) (kN/m ²)
鉛直土圧	-207.100	-207.100
地盤反力	217.307	217.307
左側水平土圧	166.474	210.326
右側水平土圧	-166.474	-210.326

2. 応答変位法に関する計算条件

地盤水平変位と周面せん断力の作用方向を模式的に図3に示す。

レベル1、レベル2地震動における具体的な計算式および値は、次節以降に示す。



耐震検討上の工学的基盤面

図3 地震時周面せん断力

2.1 レベル1地震動

(1) 地盤水平変位振幅

応答変位法による耐震計算法では、地表面からの深さ z (m) における地盤の水平変位振幅を次式により求める。

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \sin \frac{\pi \cdot Z}{2 \cdot H_g}$$

ここで、

$U_h(z)$: 地表面から深さ z (m) における地盤の水平変位振幅 (m)

S_v : 表層地盤の設計応答速度 $S_v=0.240$ (m/s) (後編 2-6 頁より)

T_s : 表層地盤の固有値周期 $T_s=0.883$ (s) (後編 2-6 頁より)

H_g : 表層地盤の厚さ $H_g=24.700$ (m)

z : 地表面からの深さ (m)

表 4 地盤変位

節点 番号	深さ Z (m)	変位振幅 $U_h(Z)$ (m)	相対変位 ΔU (m)	節点 番号	深さ Z (m)	変位振幅 $U_h(Z)$ (m)	相対変位 ΔU (m)
1	12.562	0.029954	0.007359854	25	15.988	0.022594	0
2	12.57665	0.029925	0.007331171	26	15.97335	0.022628	3.40145E-05
3	12.62037	0.029839	0.007245418	27	15.92963	0.022729	0.000135407
4	12.69239	0.029698	0.007103656	28	15.85761	0.022896	0.000302048
5	12.7915	0.029502	0.006907552	29	15.7585	0.023125	0.000530583
6	12.91599	0.029254	0.00665957	30	15.63401	0.02341	0.000816339
7	13.06373	0.028957	0.006362896	31	15.48627	0.023748	0.001153559
8	13.23219	0.028615	0.006021498	32	15.31781	0.024129	0.001535512
9	13.4185	0.028234	0.005640102	33	15.1315	0.024549	0.00195471
10	13.61946	0.027818	0.005224275	34	14.93054	0.024997	0.002403005
11	13.83164	0.027374	0.004780301	35	14.71836	0.025466	0.002871898
12	14.05141	0.026909	0.004315192	36	14.49859	0.025947	0.003352674
13	14.275	0.026431	0.003836605	37	14.275	0.026431	0.003836605
14	14.49859	0.025947	0.003352674	38	14.05141	0.026909	0.004315192
15	14.71836	0.025466	0.002871898	39	13.83164	0.027374	0.004780301
16	14.93054	0.024997	0.002403005	40	13.61946	0.027818	0.005224275
17	15.1315	0.024549	0.00195471	41	13.4185	0.028234	0.005640102
18	15.31781	0.024129	0.001535512	42	13.23219	0.028615	0.006021498
19	15.48627	0.023748	0.001153559	43	13.06373	0.028957	0.006362896
20	15.63401	0.02341	0.000816339	44	12.91599	0.029254	0.00665957
21	15.7585	0.023125	0.000530583	45	12.7915	0.029502	0.006907552
22	15.85761	0.022896	0.000302048	46	12.69239	0.029698	0.007103656
23	15.92963	0.022729	0.000135407	47	12.62037	0.029839	0.007245418
24	15.97335	0.022628	3.40145E-05	48	12.57665	0.029925	0.007331171

(2) 地盤反力係数

1) 部材軸直角方向の地盤反力係数

部材軸直角方向の地盤反力係数は、以下のようになる。

$$k_r = 36044.738(\text{kN/m}^3) \quad (\text{後編 4-10-66 頁より})$$

2) 部材軸方向の地盤反力係数

部材軸方向の地盤反力係数は、以下のようになる。

$$k_s = 12014.913(\text{kN/m}^3) \quad (\text{後編 4-10-67 頁より})$$

(3) 地震時周面せん断力

地震時周面せん断力は、次式によって算出するものとする。

$$\tau_1 = \frac{G_D}{\pi \cdot Hg} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \sin \frac{\pi \cdot Z}{2 \cdot Hg}$$

ここで、

- τ_1 : 地表面から深さ Z (m) の位置における単位面積あたりの地震時周面せん断力 (kN/m^2)
- G_D : 表層地盤の動的せん断弾性係数 $G_D = 21013.758 (\text{kN/m}^2)$
- Hg : 表層地盤の厚さ $Hg = 24.700$ (m)
- S_v : 表層地盤の設計応答速度 $S_v = 0.240$ (m/s)
- T_s : 表層地盤の固有周期 $T_s = 0.883$ (s)
- z : 地表面からの深さ (m)

1) 地盤のせん断強度

地震時周面せん断力が地下構造物に接する地盤のせん断強度を上回る場合には地震時周面せん断力は地下構造物に接する地盤のせん断強度とする。

地盤のせん断強度は、次式によって算出する。

$$\tau_2 = C + \sigma_v \cdot \tan \phi$$

ここで、

- τ_2 : 地盤のせん断強度 (kN/m^2)
- σ_v : 有効上載圧 (kN/m^2)
$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n h_i \gamma_i$$
- C : 各層の粘着力 (kN/m^2)
- ϕ : 各層の内部摩擦角 ($^\circ$)
- γ_i : 各層の単位体積重量 (kN/m^3)
- h_i : 各層の層厚 (m)

2) 部材軸直角方向および部材軸方向の周面せん断力

地震時周面せん断力の部材軸直角方向および部材軸方向成分は次式により求める。

$$\sigma = \begin{cases} -\tau_1 \sin 2\theta & (\tau_1 \leq \tau_2 \text{の時}) \\ -\tau_2 \sin 2\theta & (\tau_1 > \tau_2 \text{の時}) \end{cases}$$

$$\tau = \begin{cases} \tau_1 \cos 2\theta & (\tau_1 \leq \tau_2 \text{の時}) \\ \tau_2 \cos 2\theta & (\tau_1 > \tau_2 \text{の時}) \end{cases}$$

ここで、

- σ : 部材軸直角方向の周面せん断力 (kN/m²)
- τ : 部材軸方向の周面せん断力 (kN/m²)
- τ_1 : 地震時周面せん断力 (kN/m²)
- τ_2 : 地盤のせん断強度 (kN/m²)
- θ : 管頂から各節点の角度 (°)

表5 周面せん断力

節点 番号	深さ Z (m)	周面せん 断力 τ_1 (KN/m ²)	地盤のせ ん断強度 τ_2 (KN/m ²)	周面せん断 力 軸直角方向 σ (KN/m ²)	周面せん 断力 軸方向 τ (KN/m ²)	節点 番号	深さ Z (m)	周面せん 断力 τ_1 (KN/m ²)	地盤のせ ん断強度 τ_2 (KN/m ²)	周面せん断 力 軸直角方向 σ (KN/m ²)	周面せん 断力 軸方向 τ (KN/m ²)
1	12.562	41.124	12.000	0.000	12.000	25	15.988	48.804	12.000	0.000	12.000
2	12.57665	41.161	12.000	-3.106	11.591	26	15.97335	48.776	12.000	-3.106	11.591
3	12.62037	41.272	12.000	-6.000	10.392	27	15.92963	48.692	12.000	-6.000	10.392
4	12.69239	41.454	12.000	-8.485	8.485	28	15.85761	48.552	12.000	-8.485	8.485
5	12.7915	41.703	12.000	-10.392	6.000	29	15.7585	48.358	12.000	-10.392	6.000
6	12.91599	42.014	12.000	-11.591	3.106	30	15.63401	48.112	12.000	-11.591	3.106
7	13.06373	42.380	12.000	-12.000	0.000	31	15.48627	47.816	12.000	-12.000	0.000
8	13.23219	42.792	12.000	-11.591	-3.106	32	15.31781	47.473	12.000	-11.591	-3.106
9	13.4185	43.242	12.000	-10.392	-6.000	33	15.1315	47.088	12.000	-10.392	-6.000
10	13.61946	43.721	12.000	-8.485	-8.485	34	14.93054	46.665	12.000	-8.485	-8.485
11	13.83164	44.218	12.000	-6.000	-10.392	35	14.71836	46.210	12.000	-6.000	-10.392
12	14.05141	44.725	12.000	-3.106	-11.591	36	14.49859	45.730	12.000	-3.106	-11.591
13	14.275	45.232	12.000	0.000	-12.000	37	14.275	45.232	12.000	0.000	-12.000
14	14.49859	45.730	12.000	3.106	-11.591	38	14.05141	44.725	12.000	3.106	-11.591
15	14.71836	46.210	12.000	6.000	-10.392	39	13.83164	44.218	12.000	6.000	-10.392
16	14.93054	46.665	12.000	8.485	-8.485	40	13.61946	43.721	12.000	8.485	-8.485
17	15.1315	47.088	12.000	10.392	-6.000	41	13.4185	43.242	12.000	10.392	-6.000
18	15.31781	47.473	12.000	11.591	-3.106	42	13.23219	42.792	12.000	11.591	-3.106
19	15.48627	47.816	12.000	12.000	0.000	43	13.06373	42.380	12.000	12.000	0.000
20	15.63401	48.112	12.000	11.591	3.106	44	12.91599	42.014	12.000	11.591	3.106
21	15.7585	48.358	12.000	10.392	6.000	45	12.7915	41.703	12.000	10.392	6.000
22	15.85761	48.552	12.000	8.485	8.485	46	12.69239	41.454	12.000	8.485	8.485
23	15.92963	48.692	12.000	6.000	10.392	47	12.62037	41.272	12.000	6.000	10.392
24	15.97335	48.776	12.000	3.106	11.591	48	12.57665	41.161	12.000	3.106	11.591

2.2 レベル2地震動

(1) 地盤水平変位振幅

レベル1地振動と同様の式を用いる。

表層地盤の設計応答速度は、 $S_v=0.800$ (m/s)とする。(後編 2-10頁より)

表6 地盤変位

節点 番号	深さ Z (m)	変位振 幅 U _h (Z) (m)	相対変位 ΔU (m)	節点 番号	深さ Z (m)	変位振 幅 U _h (Z) (m)	相対変位 ΔU (m)
1	12.562	0.099846	0.024532845	25	15.988	0.075313	0
2	12.57665	0.09975	0.024437236	26	15.97335	0.075427	0.000113382
3	12.62037	0.099465	0.024151395	27	15.92963	0.075765	0.000451357
4	12.69239	0.098992	0.023678852	28	15.85761	0.07632	0.001006825
5	12.7915	0.098338	0.023025172	29	15.7585	0.077082	0.001768611
6	12.91599	0.097512	0.022198566	30	15.63401	0.078034	0.002721131
7	13.06373	0.096523	0.021209655	31	15.48627	0.079158	0.003845195
8	13.23219	0.095385	0.020071661	32	15.31781	0.080432	0.005118373
9	13.4185	0.094114	0.018800341	33	15.1315	0.081829	0.0065157
10	13.61946	0.092727	0.017414249	34	14.93054	0.083323	0.008010018
11	13.83164	0.091248	0.015934337	35	14.71836	0.084886	0.009572993
12	14.05141	0.089697	0.014383973	36	14.49859	0.086489	0.011175579
13	14.275	0.088102	0.012788682	37	14.275	0.088102	0.012788682
14	14.49859	0.086489	0.011175579	38	14.05141	0.089697	0.014383973
15	14.71836	0.084886	0.009572993	39	13.83164	0.091248	0.015934337
16	14.93054	0.083323	0.008010018	40	13.61946	0.092727	0.017414249
17	15.1315	0.081829	0.0065157	41	13.4185	0.094114	0.018800341
18	15.31781	0.080432	0.005118373	42	13.23219	0.095385	0.020071661
19	15.48627	0.079158	0.003845195	43	13.06373	0.096523	0.021209655
20	15.63401	0.078034	0.002721131	44	12.91599	0.097512	0.022198566
21	15.7585	0.077082	0.001768611	45	12.7915	0.098338	0.023025172
22	15.85761	0.07632	0.001006825	46	12.69239	0.098992	0.023678852
23	15.92963	0.075765	0.000451357	47	12.62037	0.099465	0.024151395
24	15.97335	0.075427	0.000113382	48	12.57665	0.09975	0.024437236

(2) 地盤反力係数

1) 部材軸直角方向の地盤反力係数

部材軸直角方向の地盤反力係数は、以下のようになる。

$$k_r = 36044.738(\text{kN/m}^3) \quad (\text{後編 4-10-123 頁より})$$

2) 部材軸方向の地盤反力係数

部材軸方向の地盤反力係数は、以下のようになる。

$$k_s = 12014.913(\text{kN/m}^3) \quad (\text{後編 4-10-124 頁より})$$

(3)地震時周面せん断力

レベル1 地振動と同様の式を用いる。

表層地盤の設計応答速度 $S_v=0.080(m/s)$ とする。(後編 2-10 頁より)

表 7 周面せん断力

節点 番号	深さ Z (m)	周面せん 断力 T_1 (KN/m ²)	地盤のせん断強度 T_2 (KN/m ²)	周面せん断 力 軸直角方向 σ (KN/m ²)	周面せん 断力 軸方向 T (KN/m ²)	節点 番号	深さ Z (m)	周面せん 断力 T_1 (KN/m ²)	地盤のせん断強度 T_2 (KN/m ²)	周面せん断 力 軸直角方向 σ (KN/m ²)	周面せん 断力 軸方向 T (KN/m ²)
1	12.562	137.079	12.000	0.000	12.000	25	15.988	162.680	12.000	0.000	12.000
2	12.57665	137.203	12.000	-3.106	11.591	26	15.97335	162.586	12.000	-3.106	11.591
3	12.62037	137.573	12.000	-6.000	10.392	27	15.92963	162.305	12.000	-6.000	10.392
4	12.69239	138.180	12.000	-8.485	8.485	28	15.85761	161.840	12.000	-8.485	8.485
5	12.7915	139.011	12.000	-10.392	6.000	29	15.7585	161.194	12.000	-10.392	6.000
6	12.91599	140.047	12.000	-11.591	3.106	30	15.63401	160.373	12.000	-11.591	3.106
7	13.06373	141.266	12.000	-12.000	0.000	31	15.48627	159.386	12.000	-12.000	0.000
8	13.23219	142.639	12.000	-11.591	-3.106	32	15.31781	158.244	12.000	-11.591	-3.106
9	13.4185	144.140	12.000	-10.392	-6.000	33	15.1315	156.959	12.000	-10.392	-6.000
10	13.61946	145.735	12.000	-8.485	-8.485	34	14.93054	155.549	12.000	-8.485	-8.485
11	13.83164	147.394	12.000	-6.000	-10.392	35	14.71836	154.032	12.000	-6.000	-10.392
12	14.05141	149.084	12.000	-3.106	-11.591	36	14.49859	152.432	12.000	-3.106	-11.591
13	14.275	150.773	12.000	0.000	-12.000	37	14.275	150.773	12.000	0.000	-12.000
14	14.49859	152.432	12.000	3.106	-11.591	38	14.05141	149.084	12.000	3.106	-11.591
15	14.71836	154.032	12.000	6.000	-10.392	39	13.83164	147.394	12.000	6.000	-10.392
16	14.93054	155.549	12.000	8.485	-8.485	40	13.61946	145.735	12.000	8.485	-8.485
17	15.1315	156.959	12.000	10.392	-6.000	41	13.4185	144.140	12.000	10.392	-6.000
18	15.31781	158.244	12.000	11.591	-3.106	42	13.23219	142.639	12.000	11.591	-3.106
19	15.48627	159.386	12.000	12.000	0.000	43	13.06373	141.266	12.000	12.000	0.000
20	15.63401	160.373	12.000	11.591	3.106	44	12.91599	140.047	12.000	11.591	3.106
21	15.7585	161.194	12.000	10.392	6.000	45	12.7915	139.011	12.000	10.392	6.000
22	15.85761	161.840	12.000	8.485	8.485	46	12.69239	138.180	12.000	8.485	8.485
23	15.92963	162.305	12.000	6.000	10.392	47	12.62037	137.573	12.000	6.000	10.392
24	15.97335	162.586	12.000	3.106	11.591	48	12.57665	137.203	12.000	3.106	11.591

3. 計算結果および考察

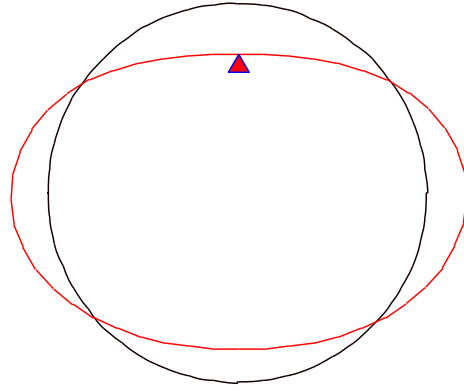
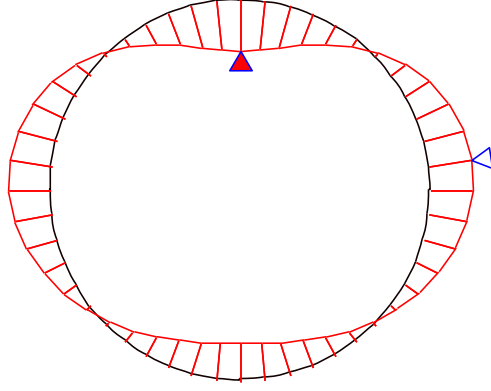
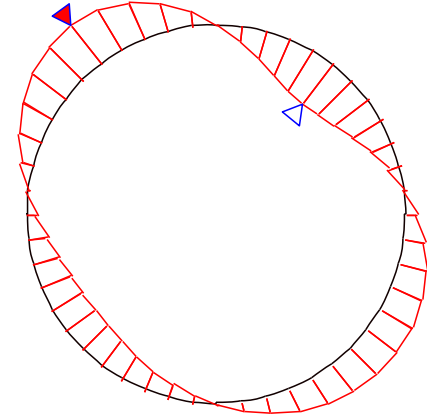
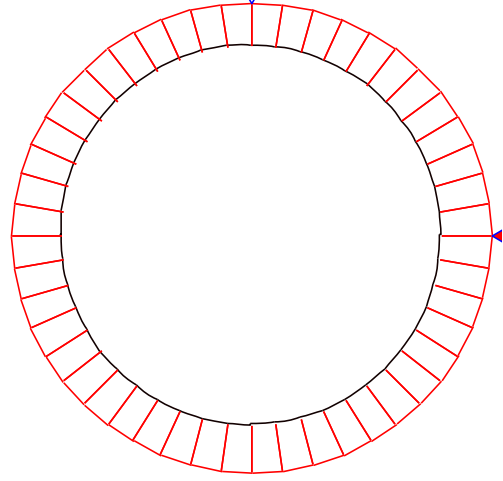
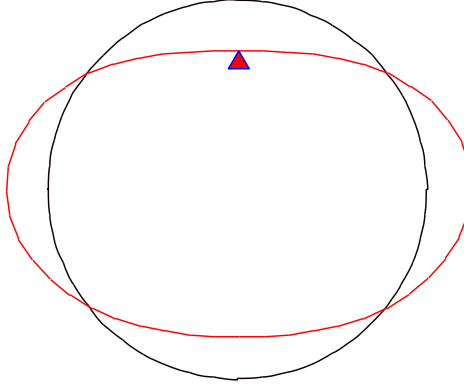
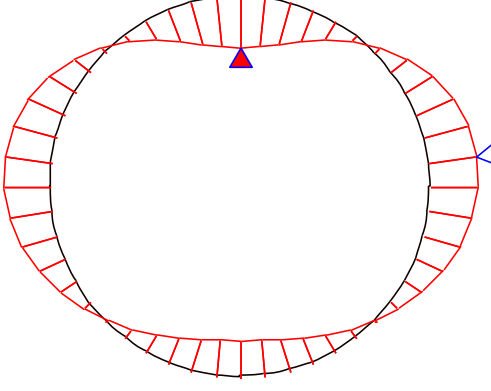
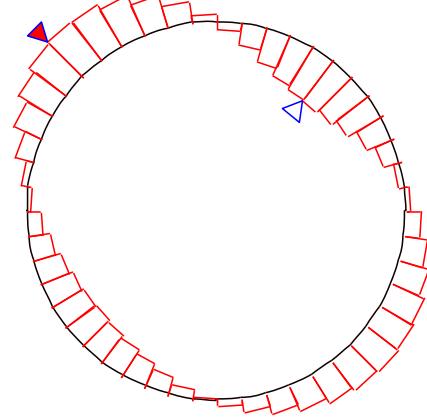
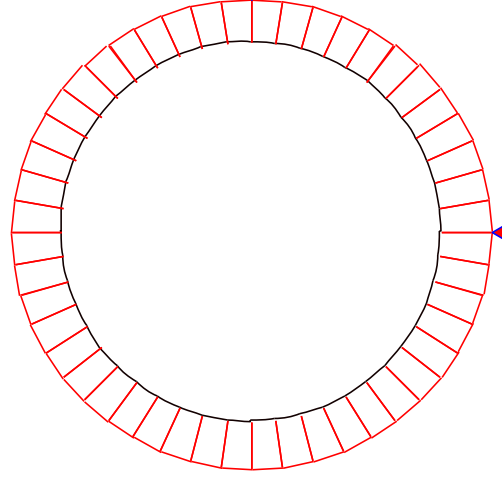
常時、レベル1地震動、レベル2地震動において変位および断面力の比較を行った結果、いずれも非常によく一致していることがわかった。

常時、レベル1地震動のせん断力図で多少、最大値および最小値の節点番号が異なっているが、大きな違いはない。

「MOLEMAN-i」の解析において、セグメントの作成には円弧梁を使用したため、精度の良い結果が得られていると考えられる。

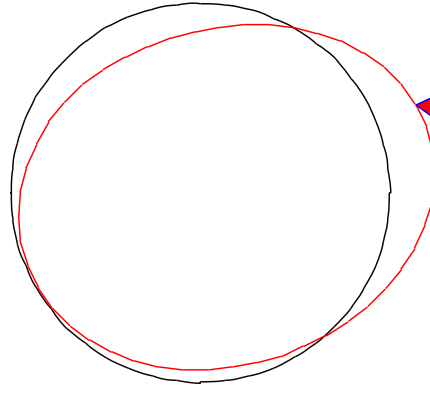
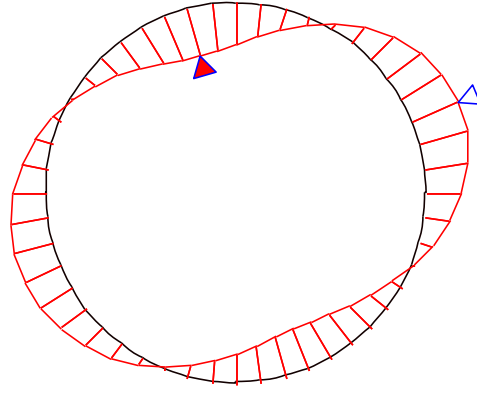
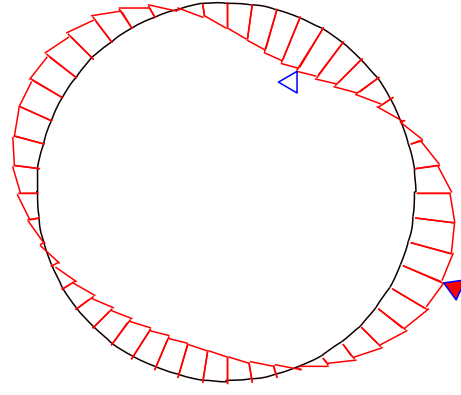
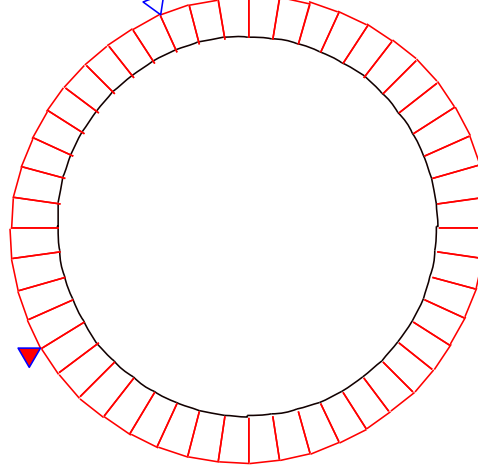
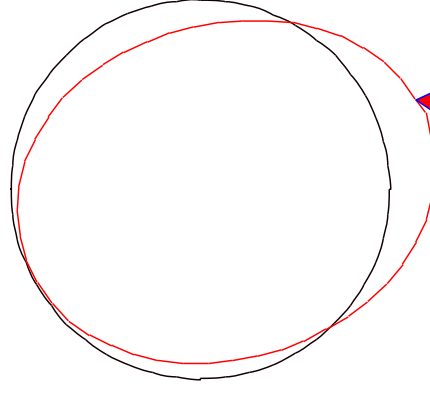
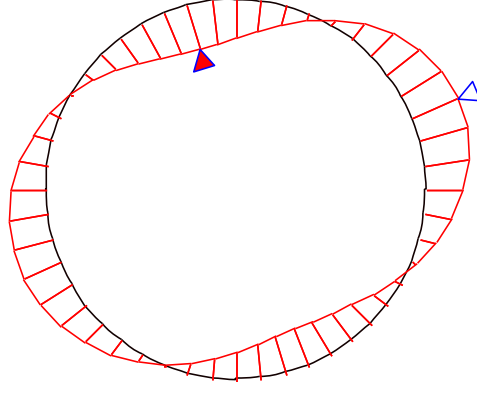
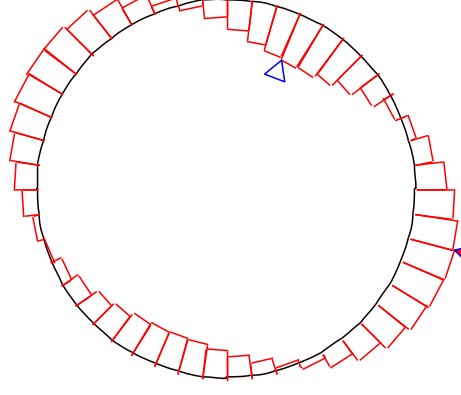
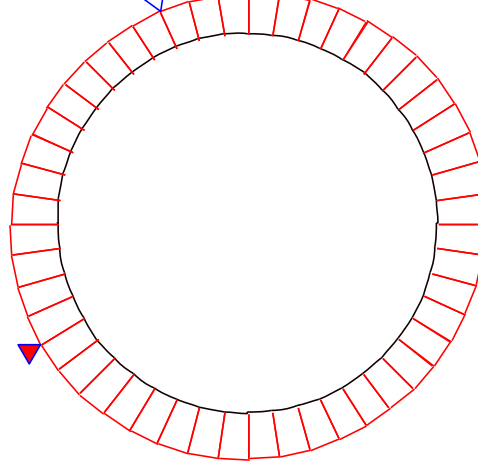
尚、本ソフト「MOLEMAN-i」は、継手や非線形を考慮した解析が可能である。

常時

	変形図 [mm]	曲げモーメント図 [kNm]	せん断力図 [kN]	軸力図 [kN]
MOLEMAN-i	<p>節点番号 : 1 最大値 : 3.2787E+00 スケール : 3.279 [mm]</p> 	<p>モーメント 軸力 節点番号 : 1 最大値 : 1.6833E+01 3.1142E+0 節点番号 : 12 最小値 : -1.4463E+01 3.6265E+0 スケール : 16.833 [kN·m]</p> 	<p>節点番号 : 44 最大値 : 2.0263E+01 節点番号 : 6 最小値 : -2.0269E+01 スケール : 20.269 [kN]</p> 	<p>軸力 モーメント 節点番号 : 13 最大値 : 3.6347E+02 -1.4101E+0 節点番号 : 1 最小値 : 3.1142E+02 1.6833E+0 スケール : 363.470 [kN]</p> 
下水道施設 耐震計算例 (※)	<p>節点番号 : 1 最大値 : 3.1413E+00 スケール : 3.141 [mm]</p> 	<p>モーメント 軸力 節点番号 : 1 最大値 : 1.7018E+01 3.1025E+0 節点番号 : 12 最小値 : -1.6311E+01 3.6193E+0 スケール : 17.018 [kN·m]</p> 	<p>節点番号 : 43 最大値 : 2.1259E+01 節点番号 : 6 最小値 : -2.1259E+01 スケール : 21.259 [kN]</p> 	<p>軸力 モーメント 節点番号 : 13 最大値 : 3.6297E+02 -1.5959E+0 節点番号 : 1 最小値 : 3.1025E+02 1.7018E+0 スケール : 362.970 [kN]</p> 

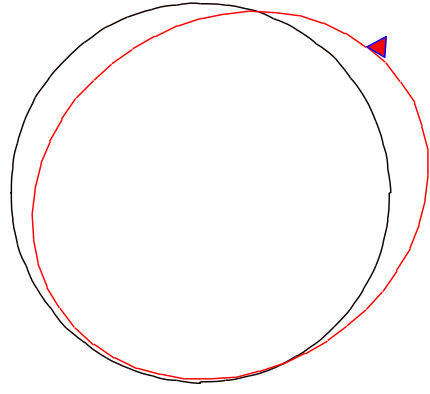
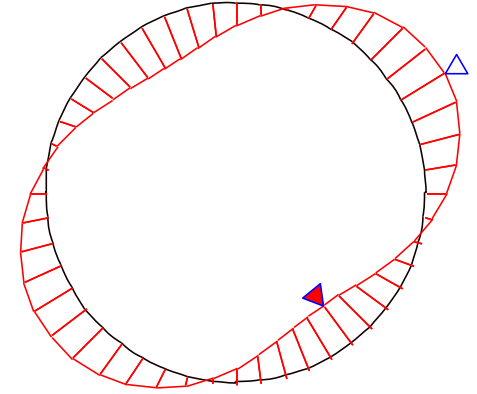
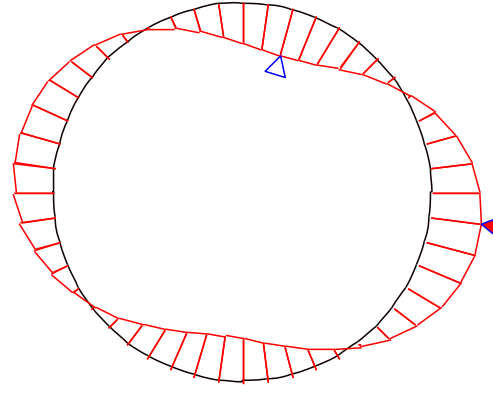
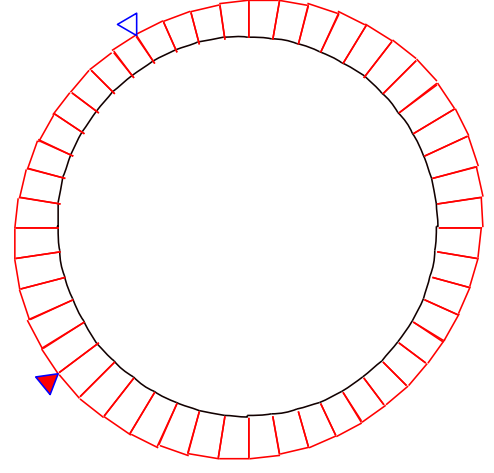
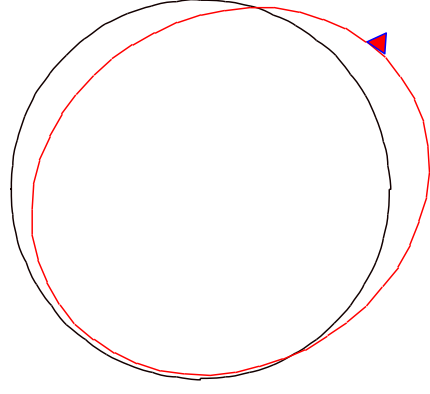
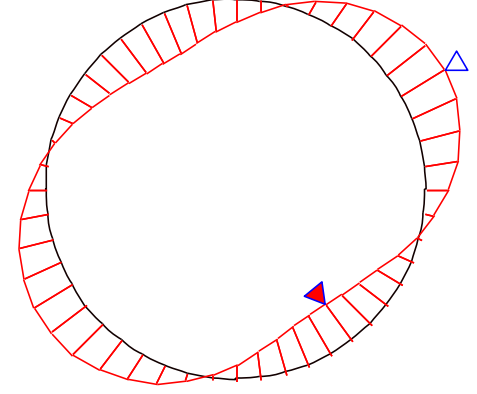
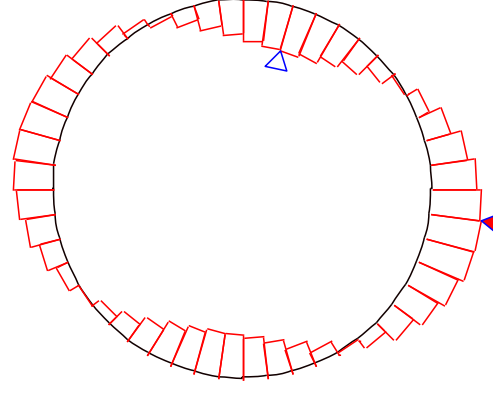
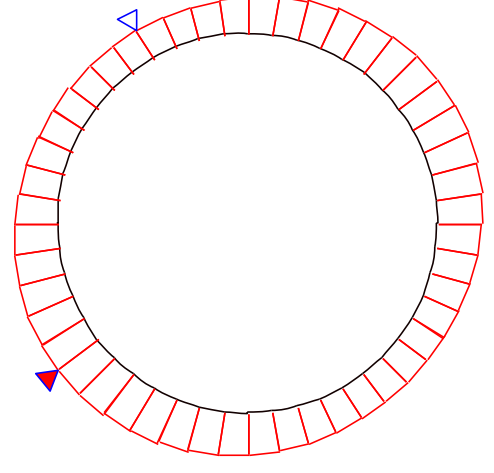
※下水道施設耐震計算例 一管路施設編 後編 (2015年度版)に記載されている計算結果を「MOLEMAN-i」にて可視化したもの

レベル 1 地震動

	変形図 [mm]	曲げモーメント図 [kNm]	せん断力図 [kN]	軸力図 [kN]
MOLEMAN-i	節点番号 : 9 最大値 : 7.8008E+00 スケール : 7.801 [mm] 	モーメント 節点番号 : 47 最大値 : 1.9755E+01 節点番号 : 10 最小値 : -2.0527E+01 スケール : 20.527 [kN・m] 軸力 3.0283E+0 3.7456E+0 	節点番号 : 16 最大値 : 2.3546E+01 節点番号 : 5 最小値 : -2.6946E+01 スケール : 26.946 [kN] 	軸力 節点番号 : 33 最大値 : 3.7952E+02 節点番号 : 46 最小値 : 3.0278E+02 スケール : 379.517 [kN] モーメント -1.5226E+0 1.8975E+0 
下水道施設耐震計算例 (※)	節点番号 : 9 最大値 : 7.8672E+00 スケール : 7.867 [mm] 	モーメント 節点番号 : 47 最大値 : 1.9857E+01 節点番号 : 10 最小値 : -2.2189E+01 スケール : 22.189 [kN・m] 軸力 3.0279E+0 3.7285E+0 	節点番号 : 15 最大値 : 2.3616E+01 節点番号 : 4 最小値 : -2.6241E+01 スケール : 26.241 [kN] 	軸力 節点番号 : 33 最大値 : 3.7923E+02 節点番号 : 46 最小値 : 3.0216E+02 スケール : 379.231 [kN] モーメント -1.6684E+0 1.8948E+0 

※下水道施設耐震計算例 一管路施設編 後編 (2015年度版) に記載されている計算結果を「MOLEMAN-i」にて可視化したもの

レベル 2 地震動

	変形図 [mm]	曲げモーメント図 [kNm]	せん断力図 [kN]	軸力図 [kN]
MOLEMAN-i	<p>節点番号 : 6 最大値 : 2.2325E+01 スケール : 22.325 [mm]</p> 	<p>モーメント 節点番号 : 20 最大値 : 3.8011E+01 軸力 節点番号 : 9 最小値 : -3.8891E+01 4.0390E+0 スケール : 38.891 [kN・m]</p> 	<p>節点番号 : 14 最大値 : 4.6708E+01 節点番号 : 3 最小値 : -4.4975E+01 スケール : 46.708 [kN]</p> 	<p>軸力 節点番号 : 32 最大値 : 4.1706E+02 モーメント 節点番号 : 45 最小値 : 2.7489E+02 -3.5044E+0 スケール : 417.055 [kN]</p> 
下水道施設 耐震計算例 (※)	<p>節点番号 : 6 最大値 : 2.2283E+01 スケール : 22.283 [mm]</p> 	<p>モーメント 節点番号 : 20 最大値 : 3.7468E+01 軸力 節点番号 : 9 最小値 : -4.0270E+01 4.0026E+0 スケール : 40.270 [kN・m]</p> 	<p>節点番号 : 14 最大値 : 4.6897E+01 節点番号 : 3 最小値 : -4.3140E+01 スケール : 46.897 [kN]</p> 	<p>軸力 節点番号 : 32 最大値 : 4.1618E+02 モーメント 節点番号 : 45 最小値 : 2.7671E+02 -3.6175E+0 スケール : 416.177 [kN]</p> 

※下水道施設耐震計算例 一管路施設編 後編 (2015年度版) に記載されている計算結果を「MOLEMAN-i」にて可視化したもの