

耐震設計の考え方の変更点

1. はじめに

昨年7月に改定されたガイドラインの耐震設計の考え方は、「下水道施設の耐震対策指針と解説—2014年版—」（以下、「耐震指針2014年版」）との整合性が図られた。

「耐震指針」では、鉄筋コンクリート管等の剛性管について、主な改定として、次の内容があげられる。

- ①円形管における周面せん断力の考慮
- ②構造物の靱性を考慮した補正係数Csの導入
- ③地盤ばねの見直し
- ④表層地盤の固有周期補正係数 α_D の見直し

複合管は、耐震設計上、剛性管として取り扱うこととしているため、上記との整合性が図られた。

反転形成工法（自立管）の耐震設計では④の α_D の変更は多少影響はあるが、今回の改定で影響の大きい複合管の耐震設計に大きく関わる上記の4点について考え方の推移を解説するものである。

2. 円形管における周面せん断力の考慮

円形管きよの鉛直断面の検討において考慮すべき地震力は、時間の相対変位によるものと、地盤内応力（周面せん断力）である。耐震計算例2001年版で

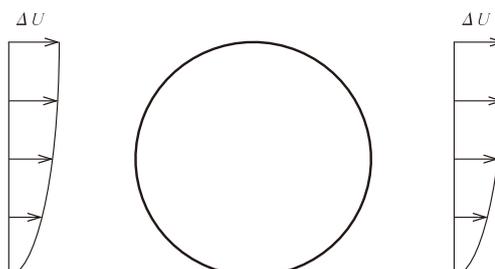
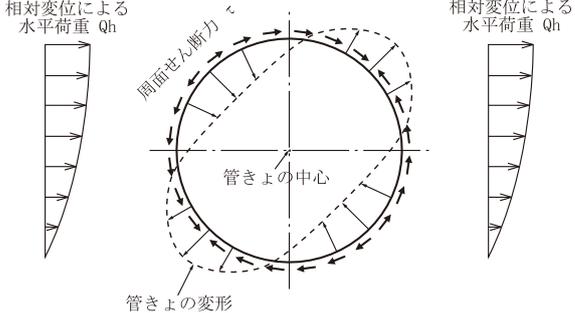
は周面せん断力を考慮すべきであるが、当時、地盤の非線形性や管きよ部材の非線形性を考慮した合理的な計算手法が確立されていなかったため、実用的な解析手法として非線形特性を考慮せず、表1に示すように周面せん断力を無視して地震時水平力のみを考慮していた。その後、高田や森崎、佐藤らの研究（耐震指針2006年版第3章参考資料13・14）により、小口径管では滑りや剥離がおり周面せん断力の影響は小さいが、中大口径では滑りや剥離が抑えられ周面せん断力の影響が大きく無視できないことが明らかになった。

そこで、耐震指針2014年版では、表1に示すように、周面せん断力を考慮することとなった。

3. 補正係数Csの導入

鉄筋コンクリート管などの剛性管きよのレベル2地震動に対する照査は、耐震指針2006年版までは、「 M (発生モーメント) $<$ MB(破壊保証モーメント)」で行ってきた。しかし、発生モーメントの算出が線形計算であるのに対し、破壊保証モーメントは非線形な塑性領域にあり、終局限界状態を照査するのに適したものになっていなかった（照査比較対象の条

表1 周面せん断力の比較

基準	耐震計算例2001年版・耐震指針2006年版	耐震指針2014年版・耐震計算例2015年版 ガイドライン
内容	地震時の外力は、 ΔU の相対変位を地盤バネを介して外力に変換する。 	相対変位による水平荷重に加えて周面せん断力を考慮する。ただし、周面せん断力 τ は内径800mm以上の管きよの場合に考慮する。 

件が合っていない。

このため、耐震指針2014年版では図1に示すように荷重-変位曲線によるひずみエネルギー一定則にしたがって、

「非線形応答時の最大耐荷荷重 (=破壊荷重 P_B) を弾性応答時の最大耐荷荷重 (=等価線形変換時の破壊荷重 P_e) に補正」して照査をしてもよいこととした。

この非線形応答時の最大耐荷荷重 P_B を弾性応答時の最大耐荷荷重 P_e に補正する係数 C_s は、ひずみエネルギー一定則より、弾性応答と非線形応答の両者の入力エネルギーがほぼ同量になるという考え方に基づき、図1の $\triangle OAE = \square OCB D$ と考えた場合の最大耐荷力の上限 B に到達する際の弾性応答時の荷重 P_e と非線形応答時の荷重 P_B / P_e で算出することとしている。

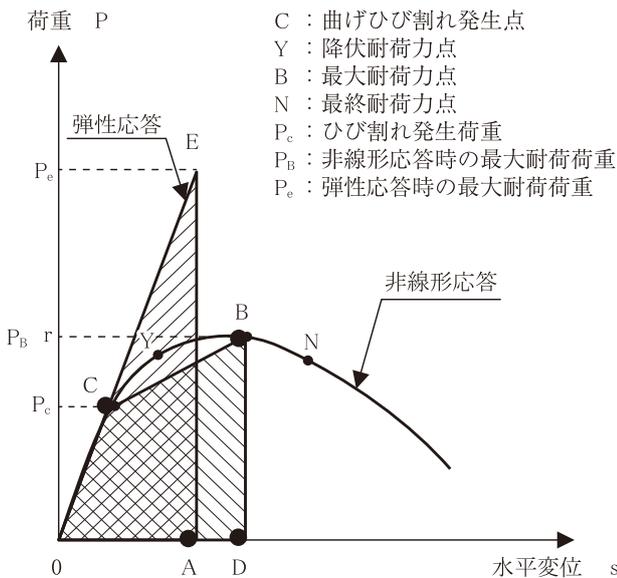


図1 補正係数 C_s の考え方

4. 地盤ばねの見直し

耐震指針2014年版では、鉛直断面の計算に用いる地盤ばね定数 (部材鉛直方向、部材軸方向ばね定数) は、道路橋示方書の杭基礎に用いられていた式から地中構造物の式 (トンネル耐震性研究小委員会報告) に変更になったことに伴い、地震力の算出方法を変更した。

対象とする管きよは、鉄筋コンクリート管 (開削用・推進用)、シールド管きよ、ミニシールド管きよ、ボックスカルバート、マンホールである。図2にフレーム計算モデルの一例を示す。また、表3には参考に円形管のばね定数の推移を記載する。

5. 表層地盤の固有周期補正係数 α_D の見直し

地盤の変形係数は、地震時に生じる地盤のひずみの大きさに応じて低下する。地盤の変形係数が低下すれば表層地盤の固有周期は大きくなる (柔らかい

- Q_h : 地震時に作用する相対変位による水平荷重
- τ : 地震時周面せん断力
- K_S : せん断ばね定数
- K_r : 部材鉛直方向の地盤反力係数

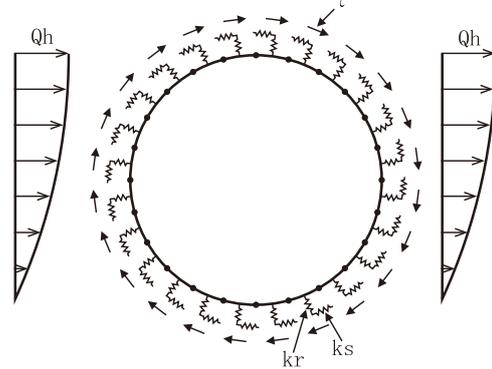


図2 円形管きよ本体の骨組み計算モデルの例 (地震時、節点数24分割の場合)

表2 エネルギー一定則による比較

基準	耐震計算例2001年版・耐震指針2006年版	耐震指針2014年版・耐震計算例2015年版 ガイドライン
内容	<p>管本体は破壊保障モーメント M_B により照査する。</p> $M_B = 0.25 \cdot P_B \cdot r + 0.165 \cdot W \cdot r$ <p> M_B : 破壊保障モーメント P_B : 非線形応答時の最大耐荷荷重 r : 中立軸半径 W : 荷重 P_e : 弾性応答時の最大耐荷荷重 C_s : 補正係数 </p>	<p>管本体は破壊保障モーメント M_B により照査するが、地震時の断面力を線形解析で算出する場合は、等価線形計算により換算した破壊保障モーメント M_d とすることができる。</p> $M_B = 0.25 \cdot P_B \cdot r + 0.165 \cdot W \cdot r$ $M_d = 0.318 \cdot P_e \cdot r + 0.239 \cdot W \cdot r$ $P_e = \frac{P_B}{C_s}$

表 3 円形管の計算に用いる地盤ばね定数の推移

種別	耐震計算例2001年版・耐震指針2006年版	耐震指針2014年版・耐震計算例2015年版 ガイドライン
内容 (円形管)	$K_h = K_{h0} \cdot \left(\frac{B_h}{0.3}\right)^3$ $K_s = 0.3 \cdot K_h$ $K_{h0} = \frac{1}{0.3} \cdot \alpha \cdot E_0$ $B_h = \sqrt{2 \cdot R_c \cdot l}$ $\alpha = 1$ <p> K_h : 水平方向地盤反力係数 K_{h0} : 直径3.3mの剛体円板による平板載荷試験の値に相当する水平方式地盤反力係数 B_h : 荷重作用方向に直行する基礎の換算載荷幅 K_s : せん断ばね定数 α : 地盤反力係数に用いる補正係数 E_0 : 表層地盤の変形係数 R_c : 管きよの圆心半径 l : 管きよの有効長 </p>	$K_r = \frac{3 \cdot E_D}{(1 - \gamma_D) \cdot (5 - 6 \cdot \gamma_D) \cdot R_c} \quad K_s = \frac{K_r}{3}$ $E_D = 2 \cdot (1 + \gamma_D) \cdot G_D$ $G_D = \frac{\gamma_{teq} \cdot V_{SD}^2}{g}$ <p> K_r : 部材鉛直方向の地盤反力係数 E_D : 表層地盤の動的変形係数 γ_D : 表層地盤の動的ポアソン比 R_c : 管きよの圆心半径 G_D : 表層地盤の動的せん断弾性係数 γ_{teq} : 表層地盤の単位体積重量 g : 重力加速度 V_{SD} : 表層地盤の動的せん断弾性波速度 </p>

地盤ほど固有周期が大きくなる)。

表層地盤のせん断ひずみはレベル1地震動では0.1%、レベル2地震動では0.2%以上といわれているため、耐震指針2014年版では表層地盤の固有周期 T_s は地震時に生じるせん断ひずみの大きさを考慮した係数 α_D を用いて算出することにした。

そこで、耐震計算例2015年版では、

- レベル1地震動の $\alpha_D = 1.25$
- レベル2地震動の $\alpha_D = 1.25 \sim 2.0$

の値を適切に評価して算出することにした。

6. おわりに

上記の通り、ガイドラインでは、特に剛性管（複合管）に対する耐震設計の考え方が大幅に改定された。特に「①円形管における周面せん断力の考慮」と「④地盤ばねの見直し」は荷重が増加する方向に変わり、設計条件として厳しくなったことになる。

したがって、特に複合管の耐震設計を実施する場合には、既設管劣化の状態を十分に把握し、新旧の耐震基準との違いを十分に理解した上で更生管を設計することが極めて重要である。

表 4 表層地盤の固有周期補正係数 α_D の推移

基準	耐震計算例2001年版 耐震指針2006年版	耐震指針2104年版	耐震計算例2015年版 ガイドライン
内容	$T_s = 1.25 \cdot T_G$ レベル1地震動、レベル2地震動とも同じ値を用いる。	$T_s = \alpha_D \cdot T_G$	$T_s = \alpha_D \cdot T_G$ レベル1地震動： $\alpha_D = 1.25$ レベル2地震動： $\alpha_D = 1.25 \sim 2.0$

【参考図書】

- 1) 「管きよ更生工法における設計・施工管理ガイドライン2017年度版説明会資料」(公社)日本下水道協会
- 2) 「下水道施設耐震計算例-管路施設編-2015年度版」(公社)日本下水道協会
- 3) 「下水道施設耐震計算例-管路施設編-2015年度版説明会資料」(公社)日本下水道協会
- 4) 「下水道施設の耐震対策指針と解説-2014年版-」(公社)日本下水道協会
- 5) 「下水道施設の耐震設計-2014年版の変更点-」シビルソフト開発
- 6) 「下水道施設耐震計算例-管路施設編-2001年度版」(公社)日本下水道協会