

スチール耐震検討マニュアルの抜粋

3.2 トンネル軸方向モデルの作成

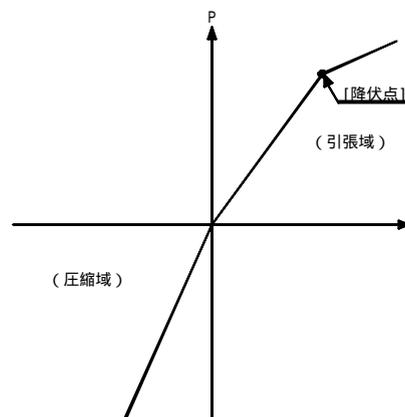
3.2.1 等価剛性モデルの概要

(1) 等価軸剛性

応答変位法による軸方向の検討では、シールド管路を弾性床上一様連続な梁として扱うが、この梁は本来、多数のセグメント本体とリング継手（継手板 + 継手ボルト）により構成された不連続構造物である。

従って、これら不連続な覆工構造系を見かけ上、等価な剛性（等価剛性）を持つ一様連続梁と仮定すると、その軸剛性はリング継手が引張荷重のみ有効なバネであるが為、引張と圧縮側に大きく剛性変化する非線形な性質を持つ事になる。

そこで、これを図 3.2.1 に示すとおり、以下の仮定条件で軸剛性、すなわち引張時を等価軸引張剛性に、また圧縮時を等価軸圧縮剛性にモデル化する。



シールドトンネルの軸方向剛性

等価軸剛性モデル仮定条件

- ・セグメントリングの円周方向の分割の影響は、軸力、曲げモーメント共にないものとする。
- ・リング継手 K_j は引張時のみバネとして扱うが、圧縮時には変形せずに無限の剛性を示すものとし、これを無視する。

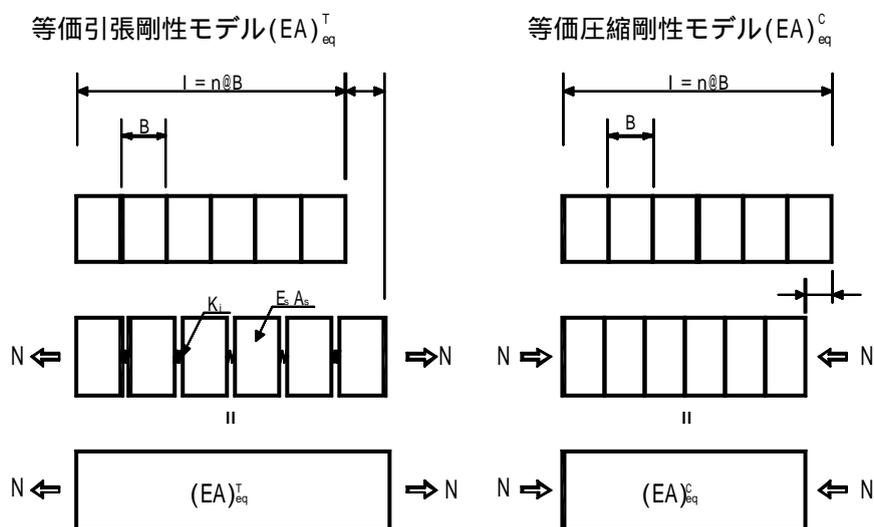


図 3.2.1 等価剛性モデル

3.2.2 等価軸圧縮剛性の算出

等価軸剛性は圧縮と引張りに区別して考えるが、まず等価圧縮軸剛性については以下のように算出する。

等価圧縮軸剛性は、セグメント本体の軸剛性のみを扱うものとし、セグメント有効断面積 A_s とセグメントの弾性係数 E_s を乗じて求めるものとする。なお、リング継手については、圧縮時は無限大の剛性を示すものとし、これを無視する。

$$(EA)_{eq}^c = E_s A_s \quad (\text{kN})$$

ただし、セグメント有効断面積については次に示す2通りの考え方がある事より、両者より選択する。

ケース1：セグメント全断面積を有効断面積とする考え方。

すなわち、セグメント有効断面積 $A_s = A_{s1} + A_{s2} + A_{s3}$

スキンプレート断面積： A_{s1}

$$A_{s1} = \frac{1}{4} (D_0^2 - (D_0 - 2t)^2)$$

縦リブ断面積： A_{s2}

$$A_{s2} = (t_s \times (h_s - R_2) + \frac{1}{4} (R_2^2 - R_1^2) + t_s \cdot (b_s - R_2)) \times n_s$$

セグメント継手板断面積： A_{s3}

$$A_{s3} = t_j \times h_j \times 2 \times n_j$$

ケース2：シールドジャッキ負担面積を有効断面積とする考え方(図3.2.3 斜線面積)

すなわち、 $A_s = A_{s4} + A_{s2} + A_{s3}$

ただし、 A_{s4} ：シールドジャッキ負担面積より考えるスキンプレート有効断面

$$A_{s4} = \text{縦リブ1本につき、スキンプレート厚 } t \text{ の } 40 \text{ 倍相当面積(} = 40t \text{)} \\ + \text{継手板1枚につきスキンプレート厚 } t \text{ の } 20 \text{ 倍相当面(} = 20t \text{)} \\ A_{s4} = 40t \times n_s + 20t \times n_j$$

なお、各部材詳細を下図に示す。

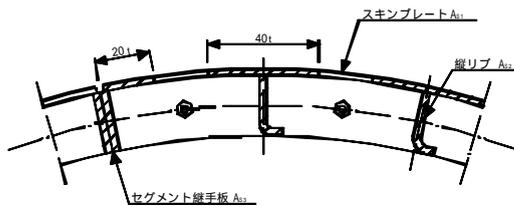


図3.2.3 スチールセグメント部材詳細図

ここに、

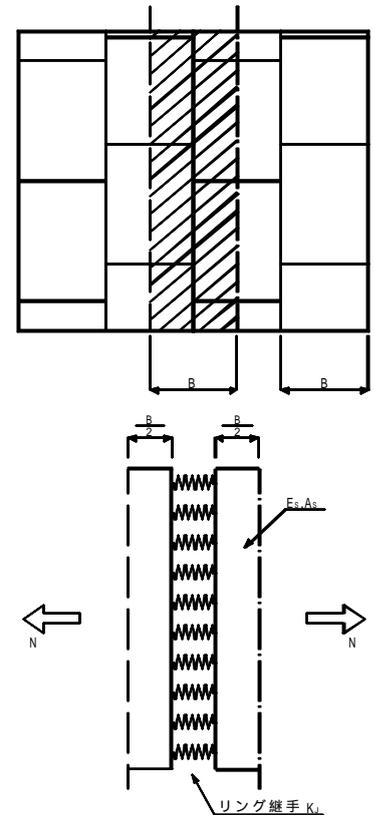
| | 記号 | 単位 |
|------------|-------|-----|
| セグメント外径 | D_0 | (m) |
| スキンプレートの厚さ | t | (m) |
| 縦リブの高さ | h_s | (m) |
| 縦リブの厚さ | t_s | (m) |
| 縦リブの幅 | b_s | (m) |
| 縦リブの内側曲線半径 | R_1 | (m) |
| 縦リブの外側曲線半径 | R_2 | (m) |
| 縦リブの本数 | n_s | (本) |
| 継手板の高さ | h_j | (m) |
| 継手板の厚さ | t_j | (m) |
| 継手板の枚数 | n_j | (枚) |

3.2.3 等価軸引張剛性 $(EA)_{eq}^T$ の算定

等価軸引張剛性は、セグメント本体の軸剛性とリング継手を評価し、これをシールド軸方向の荷重に対して弾性変形する剛性一様な連続梁として考える。

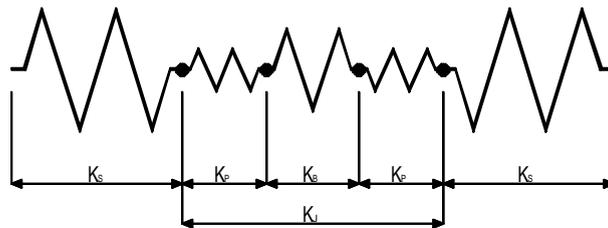
すなわちリング継手は主に、継手ボルト及び継手板（スチールセグメントの場合は主桁材）により構成されているが（場合によっては弾性ワッシャーも、これに追加される。）これらが軸方向に対し複合的な挙動を示すものとし、これをバネとして評価するものである。

但し、このバネ値の評価には様々な考え方があるが、本ソフトでは各種指針に対応出来るよう、次に示す仮定条件の基、モデル化を行っている。



(1) リング継手の構成

リング継手を構成するリング継手ボルト及び継手板（主桁）の組み合わせ方としては、一般に図3.2.4に示すとおり、ボルトと継手板軸剛性が直列バネとして有効に働くものとして扱う。



ここに、
 $\left\{ \begin{array}{l} K_s : \text{セグメントのバネ} \\ K_j : \text{リング継手のバネ} \\ K_p : \text{継手板のバネ} \\ K_b : \text{継手ボルトのバネ} \end{array} \right.$

図3.2.4 リング継手モデル図

(2) リング継手板の評価

1) 評価モデル

(1)で示したリング継手の評価のうち、継手板（主桁）については、さらに以下のモデル化ができる。

モデル1：スチールセグメントについては継手板を図3.2.5のとおり、ボルトを中心に2枚の縦リブに挟まれた主桁材として置換えて考えるが、本モデル1ではボルトから短辺方向にあるスキンプレートで固定された片持ち梁として主桁剛性を評価する。（図3.2.6（a）図参照）

モデル2：スキンプレートは無視し、縦リブに固定された両端固定梁として主桁剛性を評価する。（図3.2.6（b）図参照）

モデル3：モデル2では主桁を縦リブに固定された両端固定梁としているが、さらに継手張力が増加し、やがて両端固定部が降伏し、縦リブ間隔をスパンとする両端完全塑性ヒンジ支持梁として、主桁剛性を評価する。（図3.2.6（c）図参照）但し、本モデルはレベル2検討時のみ対象となる。（レベル1は許容応力度法での応力照査となることから、降伏点を越すような状況は無い。）

尚、モデル2,3については文献11)、12)他による。

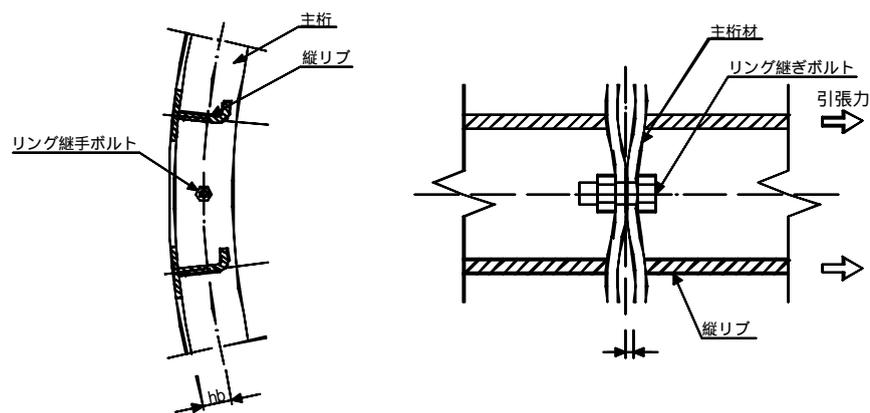
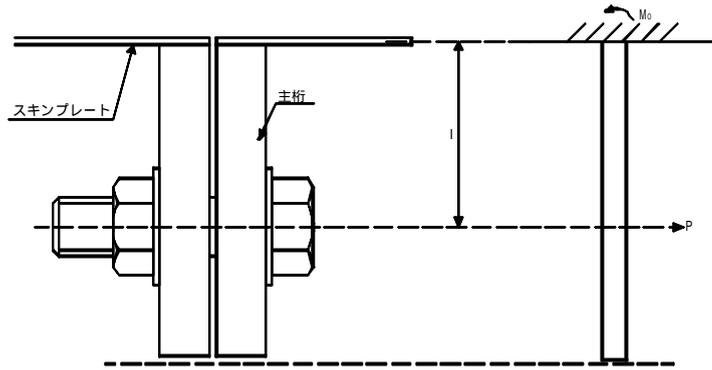


図3.2.5 リング継手モデル図

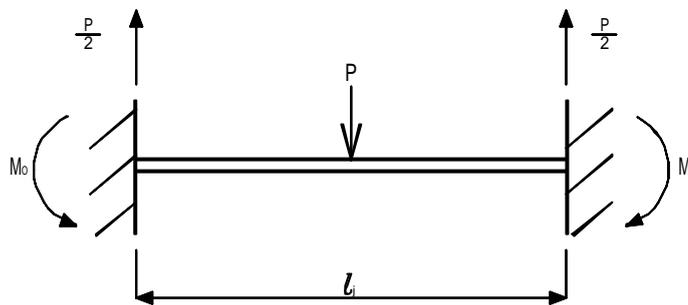
モデル1 片持梁モデル(KP)



$$= \frac{Pl^3}{3EI}$$

$$M_0 = pl$$

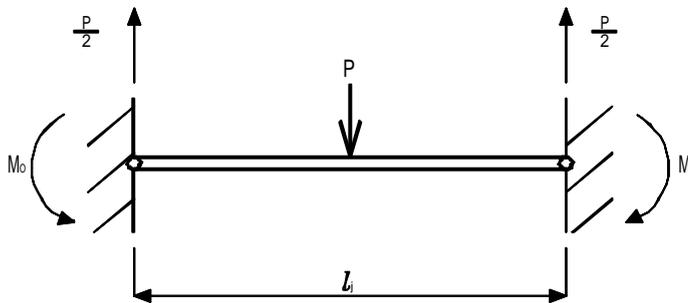
モデル2 両端固定梁モデル(KP1)



$$= \frac{Pl^3}{192EI}$$

$$M_0 = \frac{pl}{8}$$

モデル3 両端塑性ヒンジ梁モデル(KP2)



$$= \frac{Pl^3}{48EI} - \frac{Mpl^3}{8EI}$$

$$M_P = \frac{Bt^2 y}{4}$$

(= 継手板一枚当り)

図 3.2.6 リング継手金具（主桁）モデル

これより、リング継手板（主桁）についての3ケース、各々のバネ定数は次式のとおりとなる。

モデル1（片持梁） $k_{PS} = \frac{3EI P_1}{l_j^3}$

モデル2（両端固定梁） $k_{P1} = \frac{192EI P_2}{l_j^3}$

モデル3（両端塑性ヒンジ梁） $k_{P2} = \frac{48EI P_2}{l_j^3}$

ただし、梁と仮定した継手板の断面二次モーメント IP_1 は、以下のとおりとなる。

片持ち梁と仮定した場合の継手板断面二次モーメント： IP_1

$$IP_1 = \frac{l_j \cdot tr^3}{12} \quad (m^4)$$

l_j ：梁と仮定した継手板（主桁）の幅

$$l_j = rB \cdot B$$

ここに、 $\left\{ \begin{array}{l} rB : \text{リング円ピッチ半径}(m) \\ B : \text{ボルト角度}(rad) \end{array} \right.$

両端固定梁あるいは、両端塑性ヒンジ梁と仮定した場合の継手板断面二次モーメント： IP_2

$$IP_2 = \frac{h_j \cdot tr^3}{12} \quad (m^3) \dots \dots$$

h_j = 継手板高さ（主桁高さ）(m)

尚、一部自治体基準の IP_2 の算出方法について、以下のようにボルト径を差引いた断面二次モーメントを示している事から、本ソフトでは選択項目として挙げた。

$$IP_2 = \frac{(h_j - b) \cdot tr^3}{12} \quad (m^3) \dots \dots$$

b ：ボルト孔の径(m)

但し、式を用いると式に比べ、10～20%のバネ値の低下が見られる。

尚、これら継手モデルについては、現在のところモデル1～3が一般的に知られるところであるが、これらの組合せ方等、厳密には確立された考え方がなく、例えば、表3.2.1に示すとおり、各自自治体基準においても明らかな差異が生じている。

従って、本ソフトではこれらモデル全ての選択が可能なよう配慮しているが、一応標準的モデルとして下記のとおりとしている。

レベル1：両端固定梁（モデル2）

レベル2：両端固定 両端塑性ヒンジ梁（モデル2 3）

すなわち、レベル1の標準モデルとして『両端固定梁』を選択しているが、これは建設省土木研究所資料である文献11)等でも提案されているように、過去の計算事例において比較的用いられてきたモデルであることから設定している。

レベル2においては、その終局限界を降伏点とするのであれば両端固定モデルで良いが、引張強度を持って終局限界としている計算事例が多いことに配慮し、『両端固定 両端塑性ヒンジ梁』を基本と設定している。

但し、これらについては、あくまで一応の目安としているものであり、自治体基準等を十分考慮した上で選択することを推奨する。

表 3.2.1 自治体基準による継手モデルの考え方

| 自治体基準 | 地震動 | 継手モデルの考え方 |
|-------|------|---|
| A | レベル1 | 片持ち梁（但し、応力結果より端部が降伏している場合、再度、両端固定として計算する。） |
| | レベル2 | 両端固定 両端塑性ヒンジ梁 [引張強度] |
| B | レベル1 | 両端固定 |
| | レベル2 | 両端固定 [降伏点] |
| C | レベル1 | 両端固定 |
| | レベル2 | 両端固定（但し、応力結果より、降伏している場合は両端塑性ヒンジで計算する。）[降伏点] |
| D | レベル1 | 両端固定 |
| | レベル2 | 両端固定 [引張強度] |
| E | レベル1 | 片持ち梁 |
| | レベル2 | 両端固定 [引張強度] |

表中の 印は継手モデルの考え方を完全に決定しているのではなく、計算事例に紹介する程度の目安的な記述に留めている。

表 3.2.2

ボルト 1 本の軸力 (P) 1kN 当りの曲げ応力度 B_m (kN/m²)、及び軸力 1kN 当りのせん断応力度 B_t (kN/m²) の算定式

| | 荷重形態とモーメント図 | 応力状態 | B_m 算定式 | B_t 算定式 |
|-----------------|-------------|--|--|------------------------|
| モデル 1 (片持ち梁) | | $= \frac{M}{W} = \frac{Ph_b}{\frac{JtJ^2}{6}}$ $= \frac{6Ph_b}{JtJ^2}$ | $B_m = \frac{6 \cdot h_b}{J \cdot tJ^2}$ | $B_t = \frac{1}{JtJ}$ |
| モデル 2 (両端固定梁) | | $= \frac{M_0}{W} = \frac{\frac{Pl_j}{8}}{\frac{h \cdot tJ^2}{6}}$ $= \frac{3Pl_j}{4htJ^2}$ | $B_m = \frac{3 \cdot l_j}{4htJ^2}$ | $B_t = \frac{1}{2htJ}$ |
| モデル 3 (両端完全塑性梁) | | <p>(塑性モーメントの仮定)</p> $M_p = \frac{htJ^2 \cdot y}{4}$ <p>(h : 幅当り)</p> $\frac{htJ^2 \cdot y}{4} = \frac{Pl_j}{4}$ $y = \frac{P \cdot l_j}{h \cdot tJ^2}$ | $B_m = \frac{l_j}{h \cdot tJ^2}$ | $B_t = \frac{1}{2htJ}$ |

2) 支持条件が変化する継手板モデル(モデル3: 両端固定 塑性ヒンジ)の考え方

継手板モデルで示したモデル3(両端塑性ヒンジ梁)については、初期荷重の段階から継手板両端が塑性ヒンジ状態になるとは考えられず、本来は作用引張が発生し、両端固定支持状態にあった継手板が張力の増加に伴い、やがて両端に発生するモーメントにより両端の圧縮縁及び引張縁が降伏点に達し、その後、完全な塑性ヒンジ状態に移行すると考えるのが適当である。

但し、この移行の過程の考え方については、単純に梁両端の降伏点を境として両端固定 完全塑性ヒンジ状態とするのではなく、先に示した一部自治体耐震基準が参考としている建設省土木研究所資料である文献(11)では、これについて以下のように示している。

すなわち、ここに両端固定梁とした時のバネ定数を K_{P1} 、両端塑性ヒンジ梁とした時のバネ定数を K_{P2} とし、各々以下のように定義付けする。

$\left\{ \begin{array}{l} K_{P1} : \text{継手板(主桁)両端固定すると、両端に } M_0 = P \cdot l/8 \text{ の曲げモーメントが作用するが、この} \\ \text{モーメントにより両端の圧縮縁及び引張縁が降伏点に達する時の作用引張 } P_y \text{ 以下の範囲。} \\ K_{P2} : \text{作用引張が増加し、継手板両端が完全な塑性ヒンジが形成された後のバネ定数。} \end{array} \right.$

また、この時の継手板両端の降伏点 P_y は

$$P_y = \frac{4B \cdot t_r^2}{3l_j} \cdot y \quad (\text{kN}) \quad \text{で求められる。}$$

ここに、 $\left\{ \begin{array}{l} B : \text{継手板幅 [= 主桁高 } h \text{] (m)} \\ t_r : \text{主桁厚 (m)} \\ l_j : \text{継手板スパン長 [縦リブ間隔] (m)} \\ y : \text{板材の降伏点応力 (N/mm}^2\text{)} \end{array} \right.$

従って、上式で算定された P_y 以下の作用引張の範囲では、両端固定支持梁として、また P_y 以上では塑性ヒンジ支持梁として計算する。但し、塑性ヒンジ支持梁と P_y の値で判定された場合、次に示す移行領域を考慮しなければならない。すなわち、両端固定支持から両端に完全な塑性ヒンジが形成される状態への移行過程では、降伏点荷重 P_y で明確に変化するものではなく、実際は図3.2.7及び図3.2.8の破線で示したような挙動を示す領域(移行領域)が考えられる。

そこで、この挙動を図中の実線で示すように理想化し、剛性を設定するもので、この実線の折れ点を両端固定支持から両端塑性ヒンジ支持への移行点とし P_j で表すと、この P_j と P_y の関係は

$P_j = P_y$ となる。

なお、この P_j について『建設省土木研究所資料第2275号』では、 $P_j = \frac{3}{2} P_y$ と仮定しており、特に本係数を用いても問題はないが、例えば前章『2-3 耐震応力照査指標』に示す、(1) 鋼材の応力度表の引張強度を見ると、SM490Aの場合、引張強度下限値 490 N/mm^2 となっており、この数値は同材料の降伏点応力度 325 N/mm^2 の1.5倍相当になる。すなわち、完全塑性域となるはずの P_j 点がこのまま引張強度に相当するといった矛盾が発生することになるため、本ソフトではあえて $P_j = P_y$ なる係数として表現することにした。

(例えば、引張強度を引張強度範囲[すなわち、SM490Aの場合、 $490 \sim 610 \text{ N/mm}^2$]の中間値[550 N/mm^2]と設定するならば、 $P_j = \frac{3}{2} P_y$ でも問題はないと考えられる。)

すなわち

$$P_j = \sigma_y \cdot j \quad P_y = \frac{4ht^2}{3lj} \cdot \sigma_y \text{ より (} B=h \text{)}$$

$$j = \frac{\sigma_y \cdot lj^2 \cdot y}{8Et r}$$

となる。

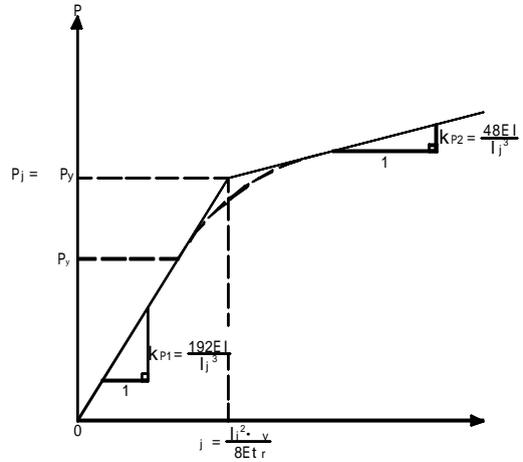


図 3.2.7 継手剛性領域図(継手板 1 枚当たり)

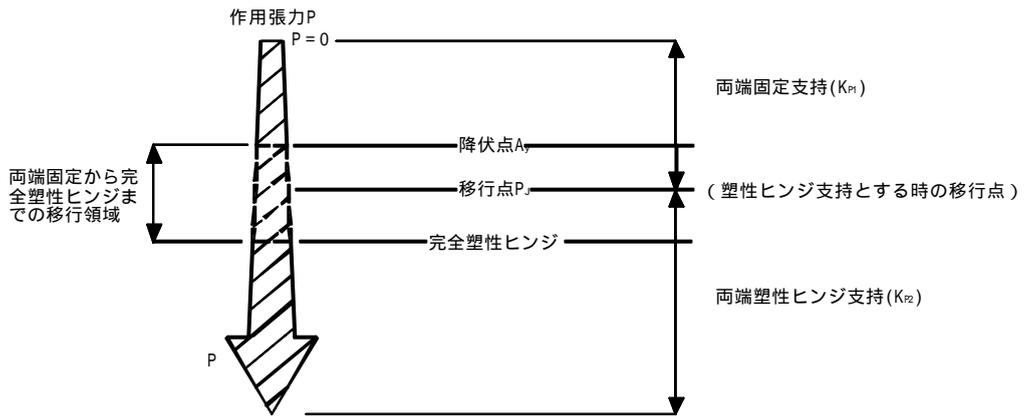


図 3.2.8 支持条件の移行過程

3.4 弾性ワッシャーを用いた場合のトンネル軸方向の応力算定

前節までの説明で、応答変位法によるシールドトンネル軸方向の耐震検討は、地震動による地盤変位（応答変位）が土のバネを介して、等価剛性梁として表されたシールドトンネルに強制変位として伝わり、この時に生じるトンネルひずみ量から軸力を求めるものであることを示した。

従って、トンネル自体の等価剛性が低下すれば、当然、発生軸力も比例して小さくなることから、シールドトンネルの等価剛性の扱いは耐震検討上、非常に重要なファクターとなると言える。

一方、等価剛性の構成は前述のとおり、セグメント本体+リング継手剛性（リング継ぎボルト+継手板）による直列バネとして評価されている。このうち、継手板（主桁）の剛性評価の考え方については数パターンあり、評価方法の選択によって発生軸力に大きな差が生じることになるものの、実際には各種耐震基準に示された評価法に基づき算定することになる。

そこで、このように行われた耐震検討の結果、所定の許容範囲に収まらない場合の対策として、等価剛性自体の低減化を図ることが考えられる。

一般に、この対策法としては、

ボルト部への弾性ワッシャーの装着
可撓セグメントの装着

等が挙げられるが、可撓セグメントの装着についてはシールドと人孔接続部や急な土質変化部等、地震荷重が一箇所に集中するような有限長トンネルの解析ケースでは有効であるが、無限長トンネルとして扱われる一般管路では、弾性ワッシャーが適しているものと考えられる。

そこで本項では、この弾性ワッシャーについての説明と計算要領について説明する。

3.4.1 弾性ワッシャーとは

弾性ワッシャーとは、リング継ぎボルトに用いる通常の銅製ワッシャーを、ゴムタイプやエポキシ樹脂といった圧縮性においてかなり軟らかく、弾性的な性状を示す円環のワッシャーで図3.4.1に示すとおり、リング方向の継手ボルトに対して通常のボルト用ワッシャー同様にに取り付けていくのである。

すなわち、地震動によるシールドトンネル軸方向のリング継手を構成する継手ボルト+継手板（主桁）にかかる引張力が各々の許容値をオーバーした場合においても、この弾性ワッシャーを取り付けることでトンネルに働く軸方向の

ひずみ量そのものが吸収され、軸力そのものの低減を図れる。

この弾性ワッシャーの取り付け要領としては図3.4.2に示すとおり、1箇所当り1個取り付け（a図）あるいは1箇所当り2個取り付け方式（b図）があるが、いずれにしても同一リング円周上のボルト全てに挿入する必要がある。

(a) 1個取付図 (b) 2個取付図

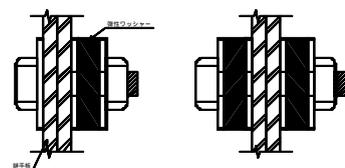


図3.4.2 弾性ワッシャー取付要領

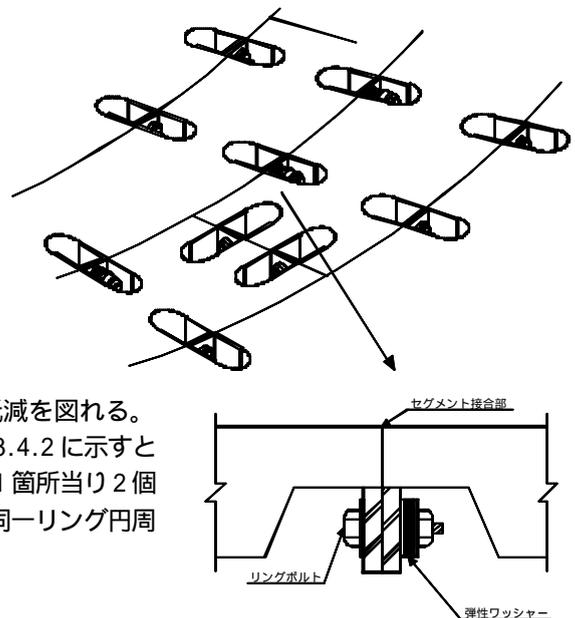


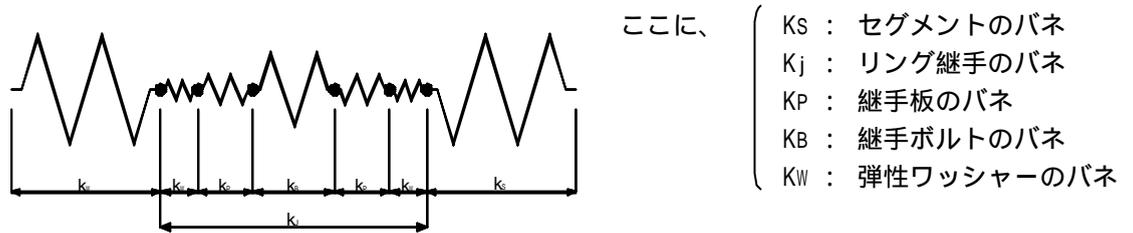
図3.4.1 弾性ワッシャー取付姿図

但し、シールドセグメント軸方向の全リング継手に装着する必要はなく、1Ring 毎～ nRing 毎に考えれば良い。

すなわち、応答変位法での軸方向計算を行うには、既に何度も示しているとおり、セグメントの複雑な部材構成を剛性一様な等価剛性梁として評価しているため、これらセグメント部材と同列に弾性ワッシャーのバネ値をつなぎ合わせトンネル全体の剛性として評価するならば、地震力により発生する軸力の低減を図るために、あえて全リングに挿入する必要はなく、むしろ弾性ワッシャー1個当りの性能と目標とする軸力低下の大きさを見極め、より経済的な配置検討となるよう配慮しなければならない。

3.4.2 弾性ワッシャーによる継手の評価

等価引張剛性 $(EA)_{eq}^T$ の算定に際し、図3.2.4にてリング継手ボルトと継手板軸剛性が直列バネとして動くものとしたリング継手モデル図を示したが、弾性ワッシャーを挿入した時のモデルとしては図3.2.3のとおりとなる。



すなわち、これは先に示したボルト+継手板の直列バネに、更に弾性ワッシャーも直列につなぎ足したものであり、この時のリング継手1箇所当りの軸剛性 k_j は、P. に示した主桁モデル毎に示すと次式のとおりとなる。

すなわち、リング継ボルトと継手板（主桁）及び弾性ワッシャーが直列バネとして有効に働くものと仮定した場合の継手バネ。

継手板を片持ち梁とした場合： k_{JS} （モデル1）

・全リング毎に弾性ワッシャーを入れた時

$$\frac{1}{k_{JS}} = \frac{1}{k_B} + \frac{2}{k_{PS}} + \frac{nWb}{k_W} \text{ より}$$

$$k_{JS} = \frac{k_B \cdot k_{PS} \cdot k_W}{k_{PS} \cdot k_W + 2k_B \cdot k_W + nWb \cdot k_B \cdot k_{PS}}$$

・nリング毎に弾性ワッシャーを入れた時

$$\frac{1}{k_{JS}} = \frac{1}{k_B} + \frac{2}{k_{PS}} + \frac{nWb}{nk_W} \text{ より}$$

$$k_{JS} = \frac{k_B \cdot k_{PS} \cdot k_W}{k_{PS} \cdot k_W + 2k_B \cdot k_W + \frac{nWb}{n} \cdot k_B \cdot k_{PS}}$$

継手板を両端固定支持とした場合：kJ1 （モデル2）

・全リング毎に

$$kJ1 = \frac{k_B \cdot k_{P1} \cdot k_W}{k_{P1} \cdot k_W + 2k_B \cdot k_W + nW_b \cdot k_B \cdot k_{P1}}$$

・ n リング毎に弾性ワッシャーを入れた時

$$\frac{1}{kJ1} = \frac{1}{k_B} + \frac{2}{k_{P1}} + \frac{nW_b}{nk_W}$$

$$kJ1 = \frac{k_B \cdot k_{P1} \cdot k_W}{k_{P1} \cdot k_W + 2k_B \cdot k_W + \frac{nW_b}{n} \cdot k_B \cdot k_{P1}}$$

継手板を両端塑性ヒンジ支持とした場合：kJ2 （モデル3）

・全リング毎に

$$kJ2 = \frac{k_B \cdot k_{P2} \cdot k_W}{k_{P2} \cdot k_W + 2k_B \cdot k_W + nW_b \cdot k_B \cdot k_{P2}}$$

・ n リング毎に弾性ワッシャーを入れた時

$$\frac{1}{kJ2} = \frac{1}{k_B} + \frac{2}{k_{P2}} + \frac{nW_b}{nk_W}$$

$$kJ2 = \frac{k_B \cdot k_{P2} \cdot k_W}{k_{P2} \cdot k_W + 2k_B \cdot k_W + \frac{nW_b}{n} \cdot k_B \cdot k_{P2}}$$

ここに、

| | | |
|-----|---|-----------------------------|
| kJ | : | リング継手 1 個当りのバネ |
| | | 但し、 |
| | | kJS : 継手板片持梁 |
| | | kJ1 : 継手板両端固定 |
| | | kJ2 : 継手板両端塑性ヒンジ |
| kP | : | 継手板のバネ |
| | | 但し、 |
| | | kJS : 継手板片持梁 |
| | | kJ1 : 継手板両端固定 |
| | | kJ2 : 継手板両端塑性ヒンジ |
| kB | : | 継手ボルトのバネ |
| nWb | : | 弾性ワッシャー1箇所当り設置ゴム数(1個 or 2個) |

従って、リング継手の軸剛性（リング当り）としては、継手個所数 nrb を乗じ、

$KJ = kJ \times nrb$ で与えられる。

3.4.3 弾性ワッシャーのバネ値

弾性ワッシャーについての概要説明については前述したとおりであるが、ここでは弾性ワッシャーについての具体的なバネ値について説明する。

一般に、現在各メーカーから出されている弾性ワッシャーの種別としては下表のとおりである。

| | 会社名 | タイプ | 備考 |
|---|------------|---------|----|
| A | 東洋ゴム工業(株) | 繊維補強ゴム | |
| B | 利昌工業(株) | エポキシ樹脂製 | |
| C | 西部ポリマ化成(株) | ウレタン樹脂製 | |

以上のとおり、これら各メーカー各々に全て材質も異なるために、当然弾性係数（EW）についても異なる結果となる。

建設省土木研究所『ガイドライン（案）』では、弾性ワッシャーのバネ値の算定式として、

$$KW = \frac{EW \cdot AW}{tW}$$

ここに、

| | |
|----|------------------------------------|
| KW | 弾性ワッシャーの圧縮剛性[バネ値] (kN/m) |
| EW | 弾性ワッシャーの圧縮弾性係数(kN/m ²) |
| AW | 弾性ワッシャーの断面積(m ²) |
| tW | 弾性ワッシャーの厚さ(m) |

と、示されている。

しかしながら、各メーカー共に圧縮弾性係数についての確立された根拠を持っておらず、実績サイズに関するデータのみでの提示しか行っていないのが実情である。(パンフレット等には一応の目安としての弾性係数が示されてはいるが、ワッシャーの大きさに何ら比例せず、明確な数値が割り出せない。)

そこで、本ソフトでは上記メーカー3社に対し、実際のセグメントに使用される頻度の高いボルト径、及びその強度区分についてのワッシャー形状・バネ値の提示を求め、これによりまとめ上げたデータより、直接弾性ワッシャー1個当りのバネ値を自動入力する手法をとっている。(数値変更も可能)(メーカーの提示データのまとめについては、表3.4.1及び表3.4.2に示しているので参考にされたい。)

但し『ガイドライン（案）』他、各自治体基準には前述のバネ値算定式を示されていることから、本式による算定も可能なように配慮している。(入力時に【弾性係数より圧縮剛性を求める】を選択し、各数値[EW・AW・tW]を任意入力してください。)

3.4.4 弾性ワッシャーの選択について（参考資料）

弾性ワッシャーについては大きく3種類（繊維補強ゴム・エポキシ・ウレタンゴム）に分けられるが、どの種類を選択するかは、設計者が性能・信頼度・価格等、総合的に判断し決定する必要がある。

しかるに、一般に弾性ワッシャーを考える時、各社パンフレットでは性能等についても差異は明確に認められない。

そこで、参考資料として本マニュアルでは、まずメーカー3社に1ページずつの枠内での自社製品の特徴・実績（主な業務）等について提示してもらうこととした。

結果をP. ~P. に示しているが、ここに示す内容については、客観性を保つため一切の修正を加えないものとした。従って、疑問等については各頁に示す連絡先に問い合わせ願いたい。

さらに、表3.4.1に示す部材についての単価表（平成13年3月末時点）についても同時に提示を求めている。結果を表3.4.3に示すが、詳細設計時には再度、各メーカーへの見積り依頼を願います。

いずれにしても、本マニュアルでは明確に示されないが、実際には各々特徴があり、単に価格だけで決定するのではなく、設計者が十分な調査・検討することが肝要である。

表 3.4.1 弾性ワッシャーサイズ比較表

| 締付ボルト | | 弾性ワッシャーサイズ | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------------|--------------|---------------------------|-------------|--------------|---------------------------|-------------|--------------|---------------------------|-------------|--------------|---------------------------|
| 呼び径 | 強度区分 | 繊維補強ゴム | | | | エポキシ樹脂 | | | | ウレタンゴム | | | |
| | | 外寸法 (mm) | ゴム寸法 (mm) | 断面積 (mm ²) |
| M16 | 6.8 | | | | | | | | | | | | |
| | 8.8 | 外径() | 52 | 50.0 | 1709.0 | 外径() | - | - | - | 外径() | 44 | 34 | 653.5 |
| | | 内径() | 18 | 18.0 | | 内径() | - | - | | 内径() | 18 | 18 | |
| 10.9 | 厚さ(t) | 11.1 | 5.0 | 厚さ(t) | - | - | 厚さ(t) | 16 | 10 | | | | |
| M20 | 6.8 | | | | | | | | | | | | |
| | 8.8 | 外径() | 63 | 61.0 | 2542.3 | 外径() | - | 45 | 1210 | 外径() | 52 | 42 | 1005.3 |
| | | 内径() | 22 | 22.0 | | 内径() | - | 22 | | 内径() | 22 | 22 | |
| 10.9 | 厚さ(t) | 17.6 | 10.0 | 厚さ(t) | - | 15 | 厚さ(t) | 16 | 10 | | | | |
| N22 | 6.8 | | | | | | | | | | | | |
| | 8.8 | 外径() | 73 | 71.0 | 3468.3 | 外径() | - | 50 | 1510 | 外径() | 57 | 47 | 1282.6 |
| | | 内径() | 25 | 25.0 | | 内径() | - | 24 | | 内径() | 24 | 24 | |
| 10.9 | 厚さ(t) | 21.0 | 13.4 | 厚さ(t) | - | 15 | 厚さ(t) | 16 | 10 | | | | |
| N24 | 8.8 | | | | | | | | | | | | |
| | 10.9 | 外径() | 85 | 83.0 | 4879.7 | 外径() | - | 55 | 1844 | 外径() | 60 | 50 | 1432.6 |
| | | 内径() | 26 | 26.0 | | 内径() | - | 26 | | 内径() | 26 | 26 | |
| 10.9 | 厚さ(t) | 30.6 | 20.0 | 厚さ(t) | - | 19 | 厚さ(t) | 16 | 10 | | | | |
| N27 | 8.8 | | | | | | | | | | | | |
| | 10.9 | 外径() | 75 | 73.0 | 3478.5 | 外径() | - | 66 | 2759 | 外径() | 67 | 57 | 1891.2 |
| | | 内径() | 30 | 30.0 | | 内径() | - | 29 | | 内径() | 29 | 29 | |
| 10.9 | 厚さ(t) | 28.5 | 20.9 | 厚さ(t) | - | 22 | 厚さ(t) | 16 | 10 | | | | |
| N30 | 8.8 | | | | | | | | | | | | |
| | 10.9 | 外径() | 72 | 70.0 | 2993.1 | 外径() | - | 67 | 2720 | 外径() | 73 | 63 | 2313.0 |
| | | 内径() | 33 | 33.0 | | 内径() | - | 32 | | 内径() | 32 | 32 | |
| 10.9 | 厚さ(t) | 20.0 | 13.4 | 厚さ(t) | - | 19 | 厚さ(t) | 19 | 10 | | | | |

表 3.4.2 弾性ワッシャー性能比較表

| 締付 ボルト | | 初期締付時 | | | | ボルト許容応力*1.5 | | | | ボルト降伏点応力 | | | |
|-----------|----------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| 呼び 径 | 強度 区分 | 軸力 (kN) | 歪量(mm) | | | 軸力 (kN) | バネ定数(kN/mm) | | | 軸力 (kN) | バネ定数(kN/mm) | | |
| | | | 繊維補 強ゴム | エポキシ 樹脂 | ウレタ ンゴム | | 繊維補 強ゴム | エポキシ 樹脂 | ウレタ ンゴム | | 繊維補 強ゴム | エポキシ 樹脂 | ウレタ ンゴム |
| M16 | 6.8 | 19.15 | 0.74 | - | 3.10 | 47.88 | 65.30 | - | 22.1 | 72.96 | 82.78 | - | 28.9 |
| | 8.8 | 26.45 | 0.81 | - | 3.59 | 66.12 | 90.16 | - | 31.4 | 100.32 | 101.19 | - | 40.9 |
| | 10.9 | 34.66 | 0.99 | - | 3.98 | 86.64 | 113.00 | - | 42.1 | 142.88 | 146.24 | - | 58.2 |
| M20 | 6.8 | 30.87 | 1.38 | 0.20 | 3.03 | 77.18 | 54.48 | 55.1 | 34.4 | 117.60 | 66.72 | 35.6 | 45.0 |
| | 8.8 | 42.63 | 1.65 | 0.32 | 3.51 | 106.58 | 68.76 | 34.8 | 48.8 | 161.70 | 86.28 | 28.6 | 63.7 |
| | 10.9 | 55.86 | 1.93 | 0.52 | 3.91 | 139.65 | 91.08 | 26.4 | 65.5 | 230.30 | 117.07 | 32.1 | 90.5 |
| N22 | 6.8 | 38.18 | 1.50 | 0.18 | 2.90 | 95.45 | 42.11 | 71.6 | 42.4 | 145.44 | 52.84 | 45.1 | 55.3 |
| | 8.8 | 52.72 | 1.89 | 0.32 | 3.39 | 131.81 | 53.01 | 45.6 | 60.1 | 199.98 | 70.46 | 37.2 | 78.3 |
| | 10.9 | 69.08 | 2.30 | 0.52 | 3.79 | 172.71 | 70.98 | 34.5 | 80.6 | 284.82 | 95.88 | 42.1 | 111.2 |
| N24 | 8.8 | 61.42 | 1.65 | 0.70 | 3.42 | 153.56 | 47.74 | 37.2 | 70.0 | 232.98 | 61.94 | 33.0 | 91.2 |
| | 10.9 | 80.48 | 2.06 | 1.06 | 3.82 | 201.21 | 58.32 | 31.3 | 93.9 | 331.82 | 80.82 | 33.9 | 129.5 |
| N27 | 8.8 | 79.87 | 3.50 | 0.71 | 3.28 | 199.67 | 49.92 | 62.7 | 90.5 | 302.94 | - | 41.5 | 117.9 |
| | 10.9 | 104.65 | 4.21 | 0.98 | 3.69 | 261.63 | 72.68 | 48.6 | 121.3 | 431.46 | - | 43.5 | 167.2 |
| N30 | 8.8 | 97.61 | 3.24 | 0.75 | 3.19 | 244.04 | - | 55.3 | 109.8 | 370.26 | - | 51.1 | 143.0 |
| | 10.9 | 127.91 | 3.69 | 1.08 | 3.59 | 319.77 | - | 46.6 | 147.2 | 527.34 | - | 54.5 | 202.8 |

表中 1) ワッシャー材料に挙げる3種についてのメーカーを示すと以下のとおり。

繊維補強ゴム・・・東洋ゴム工業(株)
 エポキシ樹脂・・・利昌工業(株)
 ウレタンゴム・・・西部ポリマ化成(株)

- 2) ・ボルト許容応力×1.5はレベル1
 ・ボルト降伏点応力はレベル2 を示す。
 3) 初期締付時は、ボルト許容応力度×0.6とする。
 4) -は、現在のところ設定軸力に対する対応材料がない。(ただし、メーカーサイドとしては詳細な条件があれば対応できるとしている。

