

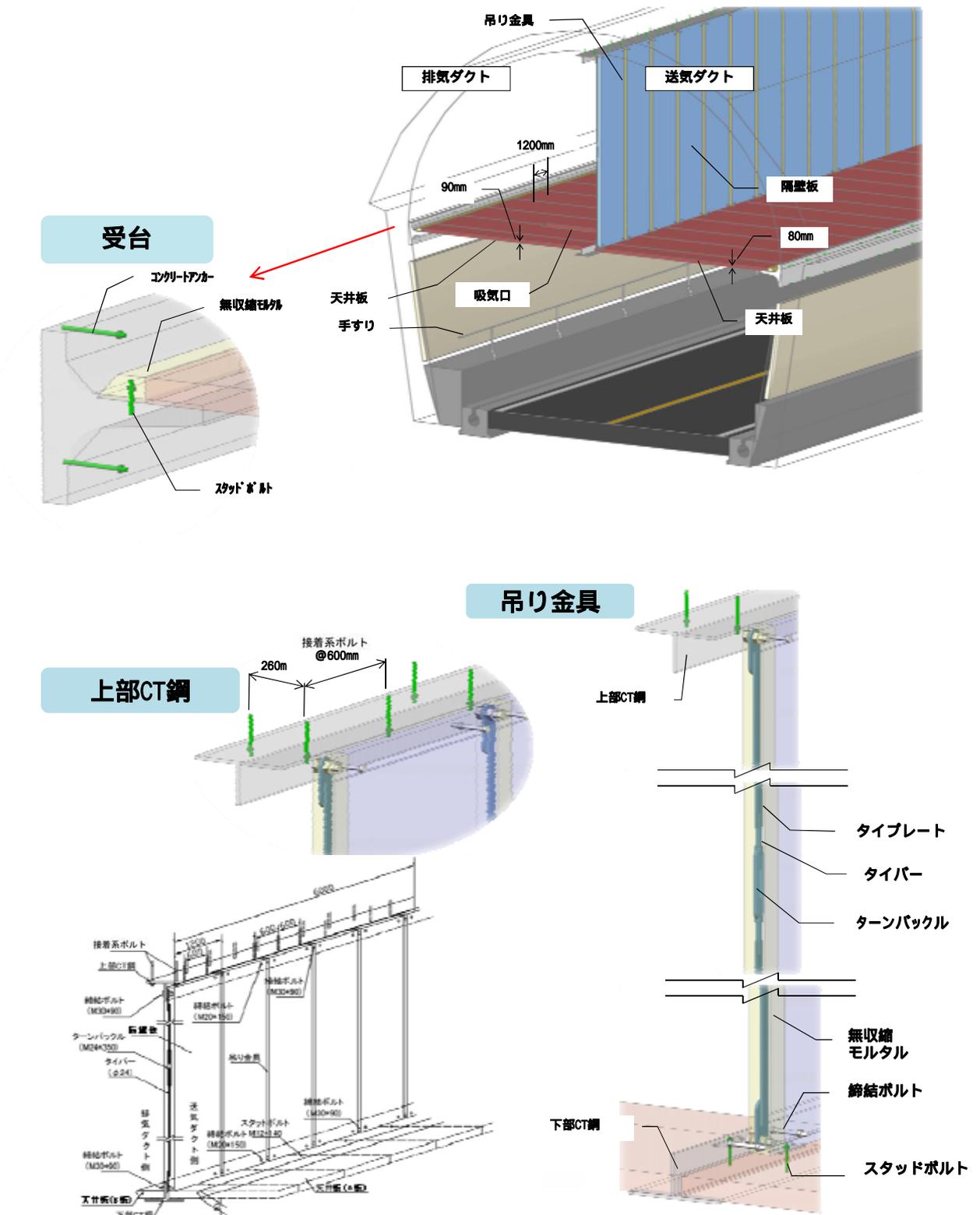
3.3 天頂部接着系ボルトの設計（再現設計）

目 次

3.3.1. 吊り天井板の構造設計	198
3.3.2. ダクト断面別の接着系ボルトの設計	224
3.3.3. 換気運転による接着系ボルト作用力の増加	228
3.3.4. C T鋼を固定する天頂部接着系ボルトの配置及び風荷重の影響解析	230

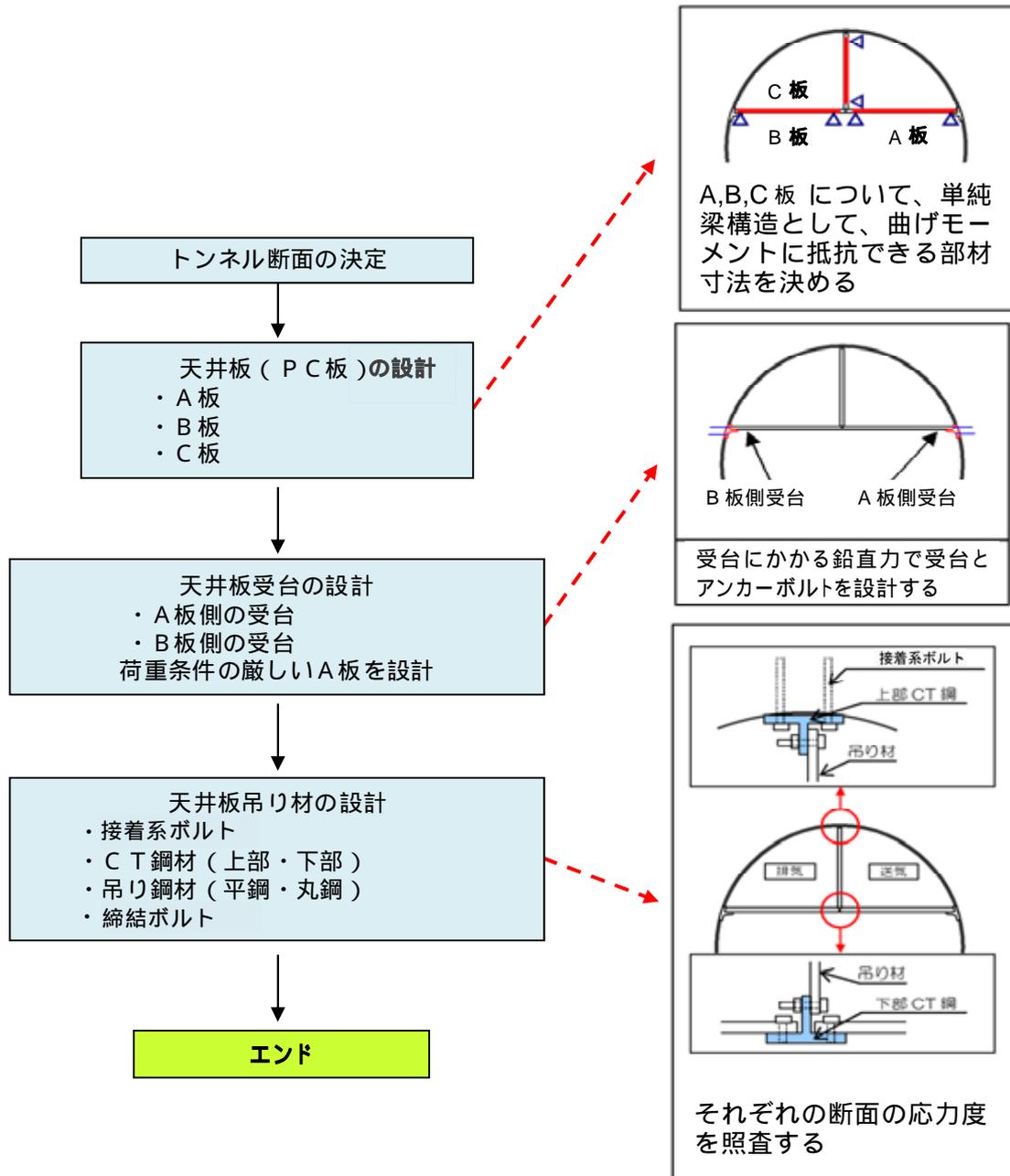
3.3.1. 吊り天井板の構造設計

3.3.1.1 トンネル各部の名称

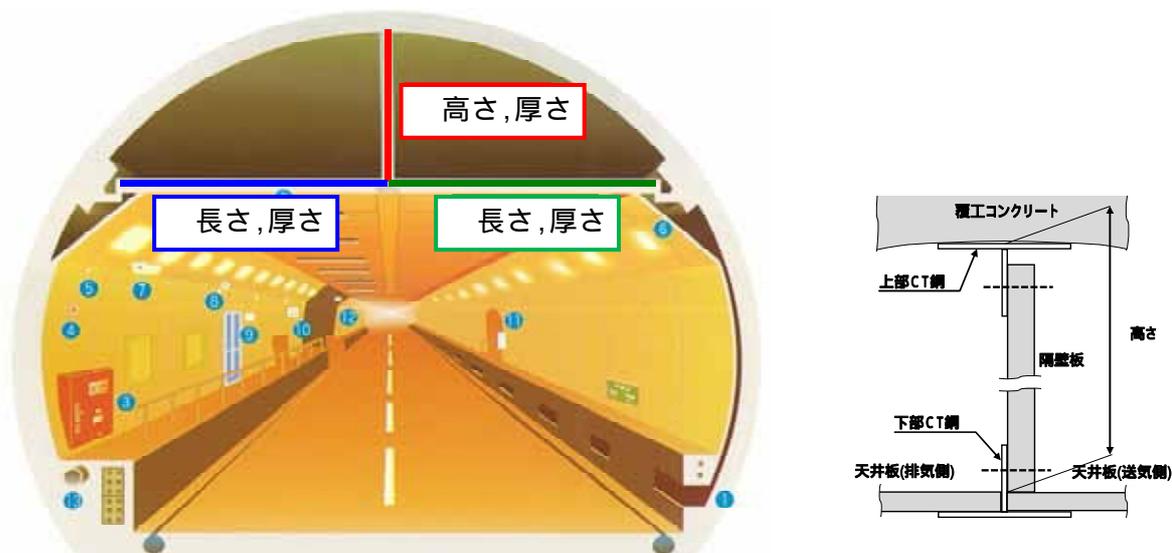


提供：中日本高速道路(株)

3.3.1.2 筐子トンネルにおける設計フロー



3.3.1.3 S, M, Lの3断面の概要図



	天井板(排気側)		天井板(送気側)		隔壁板	
	長さ (mm)	厚さ (mm)	長さ (mm)	厚さ (mm)	高さ (mm)	厚さ (mm)
S断面	4,080	70	3,920	70	2,360	60
M断面	4,600	70	4,560	70	3,570	60
L断面	5,010	90	5,010	80	5,370	100

上記寸法は、完成図の標準断面図から計上したものである。

長さ：天井板の長さ

高さ：隔壁板の長さ上部CT鋼までの長さを加えた値(右上図参照)

3.3.1.4 天井板設計の確認(構成部材の採用経緯)

笹子トンネルでは、当時の設計要領に準拠して、構成部材の選定を行っている。

設計要領第三集トンネル(2)トンネル換気(1970(昭和45)年 日本道路公団)

- ・設計荷重・・・死荷重(自重), 活荷重(風荷重, 作業荷重)
- ・たわみ・・・スパンの1/500以下
- ・構造寸法・・・厚さは15cm以下
- ・使用材料・・・鋼デッキプレート, 軽量気泡コンクリート板, プレストレストコンクリート板, 鉄筋コンクリート板のなかから, トンネルごとに選定

笹子トンネルの構成部材の選定

【天井板、隔壁板】施工性、機能性、耐久性、維持管理、美観、経済性を検討し、**主に経済性から「プレストレストコンクリート板」を採用。**

【吊材、接着系ボルト】採用理由、比較検討といった資料は見つからない。

3.3.1.5 天井板設計の確認(建設当時の材料定数をSI単位に換算表記)

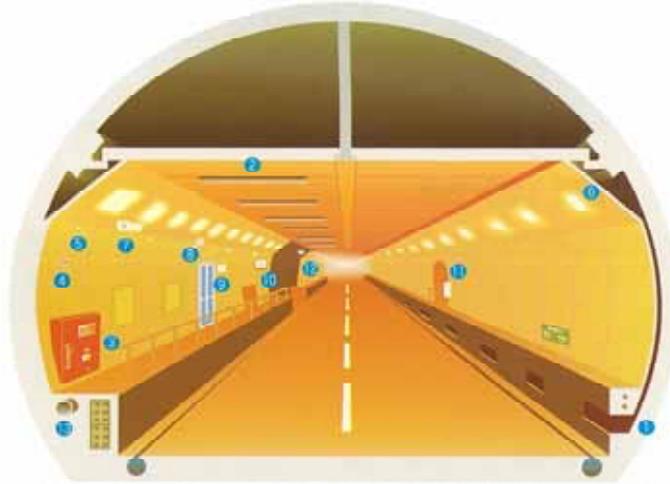
部位	材料強度		出典	準拠していたと思われる 基準・内規・技術図書類
覆工コンクリート	コンクリート圧縮強度	20 N/mm ² ¹	日本道路公団設計要領第三集トンネル(1970(昭和45)年)	
	せん断強度	0.65 N/mm ²		鉄筋コンクリート道路橋設計示方書(1964(昭和39)年) ($f_{ck} = 200 \text{ kg/cm}^2$ の許容せん断応力度 6.5 kg/cm^2) ³
接着系ボルト (16)	降伏強度	245 N/mm ²		道路橋示方書鋼橋編(1973(昭和48)年) (SS41 $2,500 \text{ kg/cm}^2$) ³
	付着強度	8 N/mm ²		覆工コンクリートと樹脂の付着(1974(昭和49)年) (当時のケミカルアンカーのパンフレットからの読み取りと推定) ³
	接着系ボルト径	16 mm ¹		
その他鋼材 (CT鋼、吊材、接合ボルト)	許容引張強度	140 N/mm ²		道路橋示方書鋼橋編(1973(昭和48)年) (SS41 $1,400 \text{ kg/cm}^2$) ³
	許容せん断強度	80 N/mm ²		道路橋示方書鋼橋編(1973(昭和48)年) (SS41 800 kg/cm^2) ³
	許容支圧強度	205 N/mm ²		道路橋示方書鋼橋編(1973(昭和48)年) (SS41 $2,100 \text{ kg/cm}^2$) ³
天井板(プレストレストコンクリート)	コンクリート圧縮強度	50 N/mm ² ²	プレストレストコンクリート道路橋示方書(1968(昭和43)年)(設計図材料表 $f_{ck} = 500 \text{ kg/cm}^2$)	
天井板(PCストランド)	引張強度	1730 N/mm ² ²	プレストレストコンクリート道路橋示方書(1968(昭和43)年)(SWPC7, 10.8 177 kg/mm^2)	
	降伏強度	1470 N/mm ² ²	プレストレストコンクリート道路橋示方書(1968(昭和43)年)(SWPC7, 10.8 150 kg/mm^2)	
天井板(鉄筋)	許容引張強度	180 N/mm ² ²	プレストレストコンクリート道路橋示方書(1968(昭和43)年)(SD30 $1,800 \text{ kg/cm}^2$)	
受台	コンクリート圧縮強度	24 N/mm ² ¹	日本道路公団設計要領第二集橋梁下部工(1970(昭和45)年)	

- 1 特記仕様書又は当時の設計要領に記載されていたもの
- 2 当時のS断面設計計算書に記載されていたもの
- 3 出典先を現時点で推定したもの

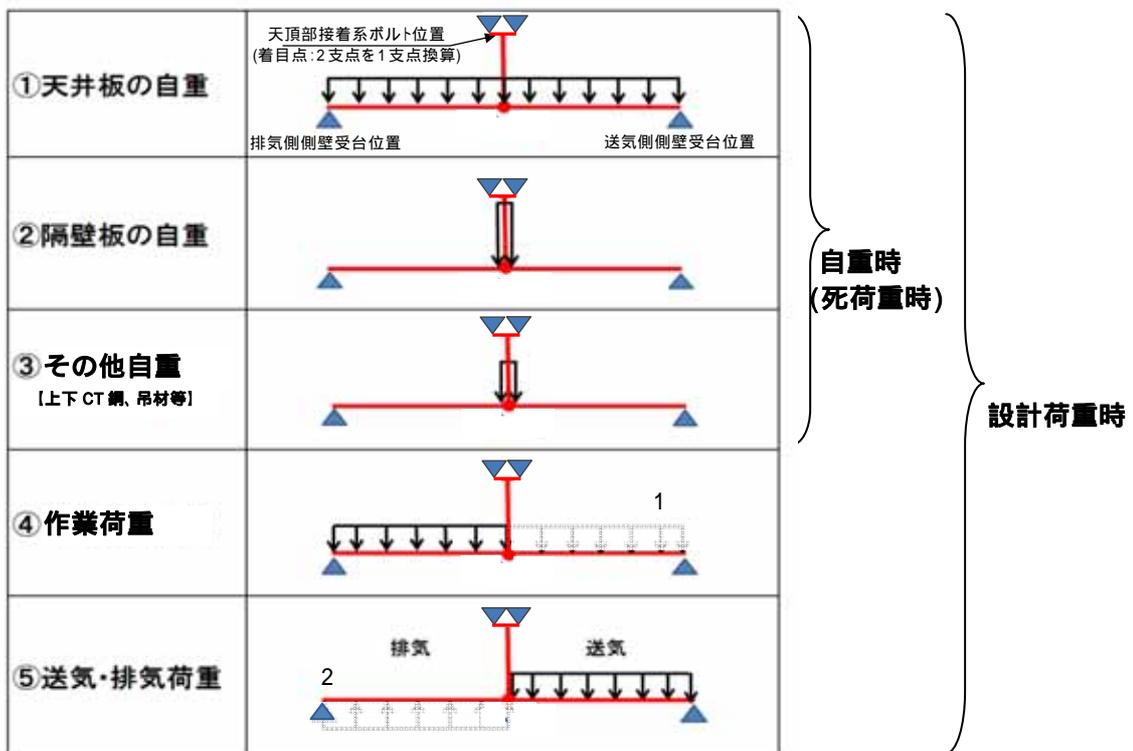
3.3.1.6 天頂部接着系ボルトの作用力を算出するために用いられた荷重の考え方

当時の設計要領第3集トンネル(2)トンネル換気(1970(昭和45)年)及び当初設計における設計条件を基に、送気側・排気側の天井板及び隔壁板の自重、換気運転に伴う風荷重(鉛直)、作業荷重及びその他部材の自重の組合せからなる天頂部接着系ボルトの設計で考慮されていた荷重と荷重組合せを再現した結果を以下に示す。

上部CT鋼6m間において、天頂部接着系ボルトは16本配置されており、上記より求まる6m当りの作用力をボルト本数で除したものが、ボルト1本に作用する力とされている。



天頂部接着系ボルトの作用力を算出するために用いられた荷重の組み合わせ



1. 送気側の作業荷重は、ボルト作用力の検討に見込んでいない。
2. 上向きの風荷重(鉛直)は、ボルト作用力の検討に見込んでいない。

3.3.1.7 作用力と強度

(1) L断面について、当初設計を再現して確認し、SI単位に換算表記

破壊モードと強度 ¹		作用力	強度/作用力	
アンカー定着部 コンクリートの コーン破壊		48.8kN/本	12.2kN/本	
アンカーボルトの 引抜け		52.2kN/本		
アンカーボルトの 降伏		38.4kN/本		
吊り金具固定ボル トのせん断		N = 78.5kN/本	N = 39.0kN/本	2.01
側壁受台取付アン カーボルトの引抜 け		T = 38.4kN/本	T = 9.5kN/本	4.04

1. 強度は、安全率を考慮しない値である。

(2) (社)日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説」による強度の計算値

L断面の天頂部接着系ボルトの強度を、「各種合成構造設計指針・同解説」((社)日本建築学会 2010(平成 22)年改訂) により求めた結果を以下に示す。

破壊モードと強度		作用力	強度/作用力
アンカー定着部コ ンクリートのコー ン破壊、又は、 アンカーボルト引 抜け		40.2kN/本	12.2kN/本
アンカーボルトの 降伏		38.4kN/本	3.14
<p>「各種合成構造設計指針・同解説」では、接着系ボルトの有効埋込み長²が$10d_a$³程度まではコーン状破壊が支配的であるが、$10d_a$より長くなると付着破壊モードが顕著となってくるとされている。(10d_a以上の埋込み長があるものとした照査式) なお、本接着系ボルトの埋込み長は$10d_a$に満たないが、コーン破壊の適用式がないため、引き抜けの式を適用した。</p>			

2. ここでは「各種合成構造設計指針・同解説」に従い、有効埋込み長は $130-16=116$ mmとした。

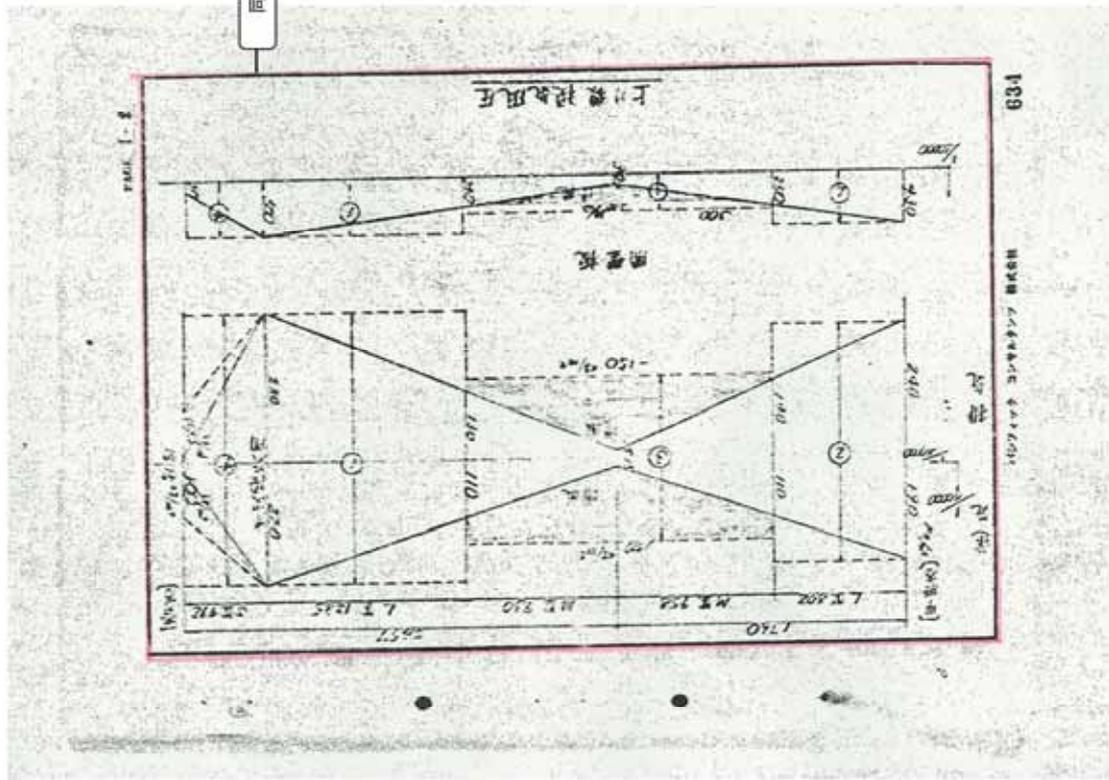
3. 同様に「各種合成構造設計指針・同解説」に従い、 d_a を接着系ボルトの径とした。

(3) S断面設計計算書に基づいた再現設計

1) L断面

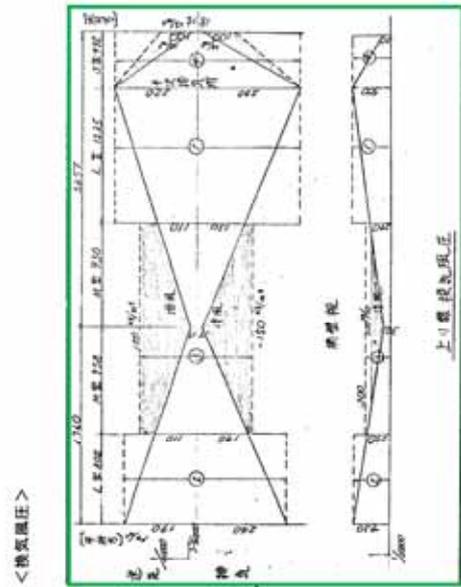
S断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))	L断面の再現設計	摘要																																
<p>第1章 設計条件</p> <p>1. 設計荷重</p> <p>(1) 風圧</p> <table border="1" data-bbox="478 649 582 1120"> <thead> <tr> <th>計算断面</th> <th>トンネル断面</th> <th>天井板</th> <th>隔壁板</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>L</td> <td>送気 220</td> <td>排気 -280</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>500</td> </tr> </tbody> </table> <p>(kg/m²)</p> <p>(2) 作業荷重 100 kg/m²</p> <p>2. 荷重の組合せ</p> <p>(1) 送気側</p> <p>(イ) 自重 + 風圧 (ロ) 自重 + 作業荷重 (イ)、(ロ)のいずれか大きい方について検討する。</p> <p>(2) 排気側</p> <p>(イ) 自重 + 風圧 (ロ) 自重 + 作業荷重 (イ)、(ロ)について検討する。 ただし、(イ)が正の値の場合は、いずれか大きい方について検討する。</p>	計算断面	トンネル断面	天井板	隔壁板	①	L	送気 220	排気 -280				500	<p>第1章 設計条件</p> <p>1. 設計荷重</p> <p>(1) 風圧</p> <table border="1" data-bbox="542 1478 742 1792"> <thead> <tr> <th>計算断面</th> <th>トンネル断面</th> <th>天井板</th> <th>隔壁板</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>L</td> <td>220</td> <td>-280</td> </tr> <tr> <td>②</td> <td>L</td> <td>190</td> <td>-240</td> </tr> <tr> <td>③</td> <td>M</td> <td>150</td> <td>-150</td> </tr> <tr> <td>④</td> <td>S</td> <td>220</td> <td>-280</td> </tr> </tbody> </table> <p>(kg/m²)</p> <p>(2) 作業荷重 100 kg/m² (規定決定には使用せず)</p> <p>2. 荷重の組合せ</p> <p>(イ) 自重 + 風圧 (ロ) 自重 + 作業荷重 (イ)、(ロ)について計算する。</p> <p>趣旨は同一であるが、当時の設計要領に基づき表記</p>	計算断面	トンネル断面	天井板	隔壁板	①	L	220	-280	②	L	190	-240	③	M	150	-150	④	S	220	-280	<p>(1) 風圧 当時の設定に基づく</p> <p>(2) 作業荷重 当時の設定に基づく</p>
計算断面	トンネル断面	天井板	隔壁板																															
①	L	送気 220	排気 -280																															
			500																															
計算断面	トンネル断面	天井板	隔壁板																															
①	L	220	-280																															
②	L	190	-240																															
③	M	150	-150																															
④	S	220	-280																															

S断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))

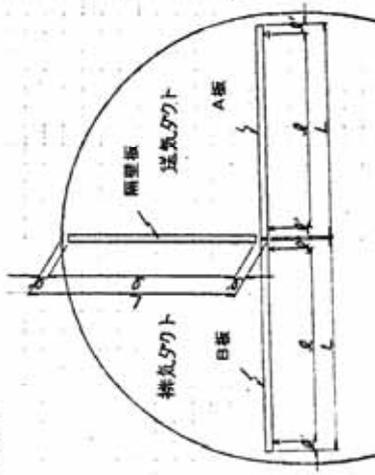


同

L断面の再現設計



3. 板長およびスパン



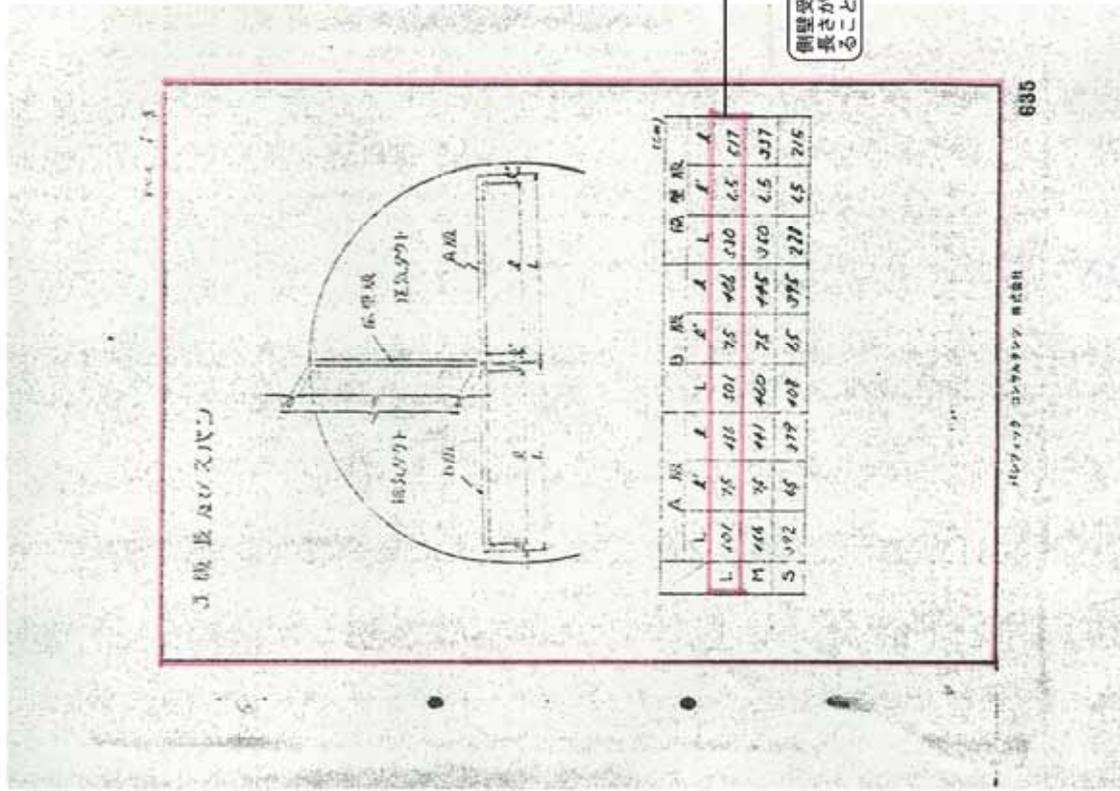
(m)

断面	A板		B板		隔壁板	
	L	B'	L	B'	L	B'
L	5.010	4.805	5.010	4.805	5.450	5.200
	50.100	50.100	50.100	50.100	50.070	50.070
	50.100	50.100	50.100	50.100	50.080	50.080

部変: 鋼管受付間
C: 下部工間

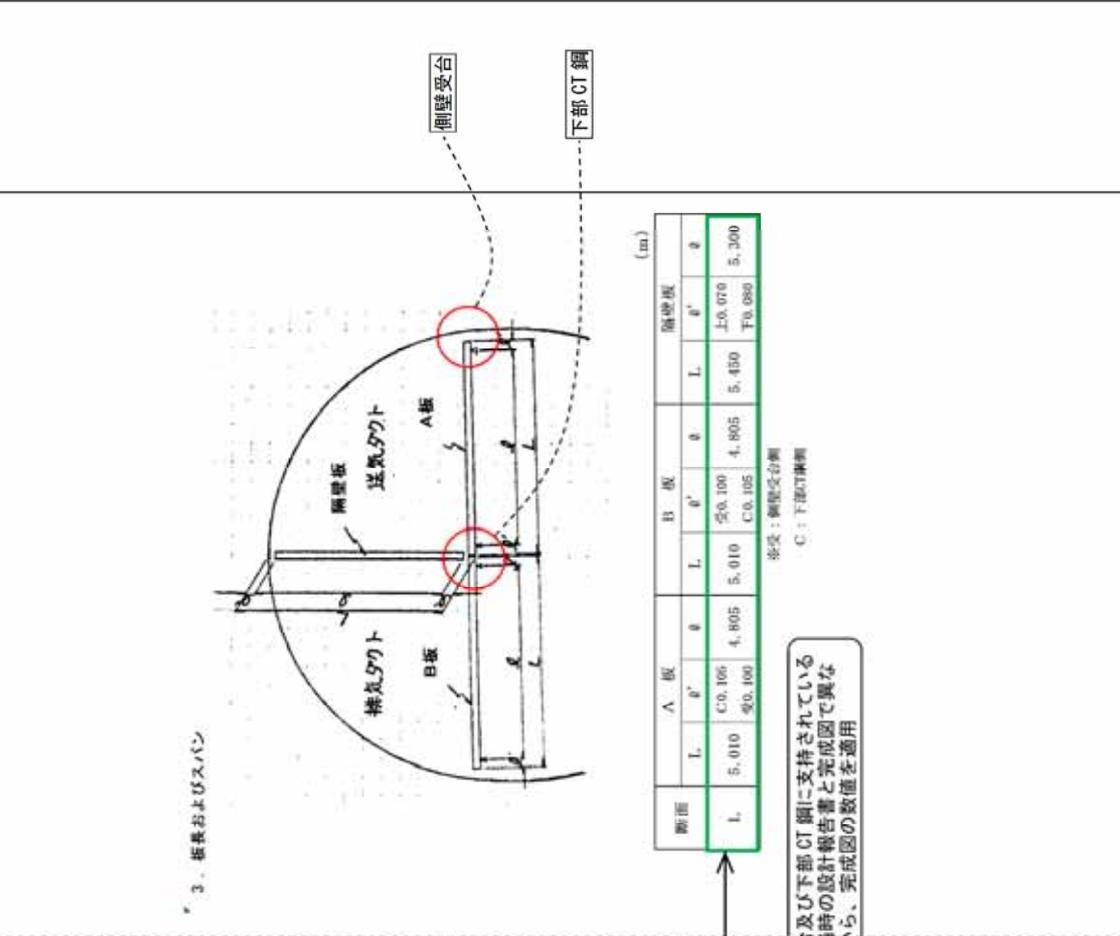
摘要

S断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))



側壁受台及び下部CT鋼に支持されている長さが当時の設計報告書と完成図で異なることから、完成図の数値を適用

L断面の再現設計



S 断面 当時の設計報告書 (提供: 中日本高速道路(株))

5. コンクリートのせん断力

ケミカルアンカーの穿孔深さは、 $L_0=130\text{mm}$ ($\phi 16$) とする。

円すい面積 (せん断抵抗面積)

$$A = \pi \cdot L \cdot L_0$$

$$= 3.14 \times (\sqrt{2} \times 130) \times 130 = 75,085 \text{ mm}^2 \text{ --- } \phi 16$$

コンクリート圧縮強度 $\sigma_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$

許容せん断応力度 $\tau_{sl} = 0.65 \text{ N/mm}^2$ とする。

せん断抵抗力

$$R = 75,085 \times 0.65 = 48.81 \text{ kN/本 --- } \phi 16$$

付着力

レジン付着力 $S = 8.0 \text{ N/mm}^2$ (3日)

$$P = (\pi \times \phi) \times L_0 \times S$$

$$= 3.14 \times 16 \times 130 \times 8.0 = 52.28 \text{ kN/本 --- } \phi 16$$

$> 48.81 \text{ kN/本}$

摘要

$L_0=130\text{mm}$

S断面では埋込み長 100mm を用いて、コンクリートが計算されており、それにならい L断面は 130 mm を代入。

付着力

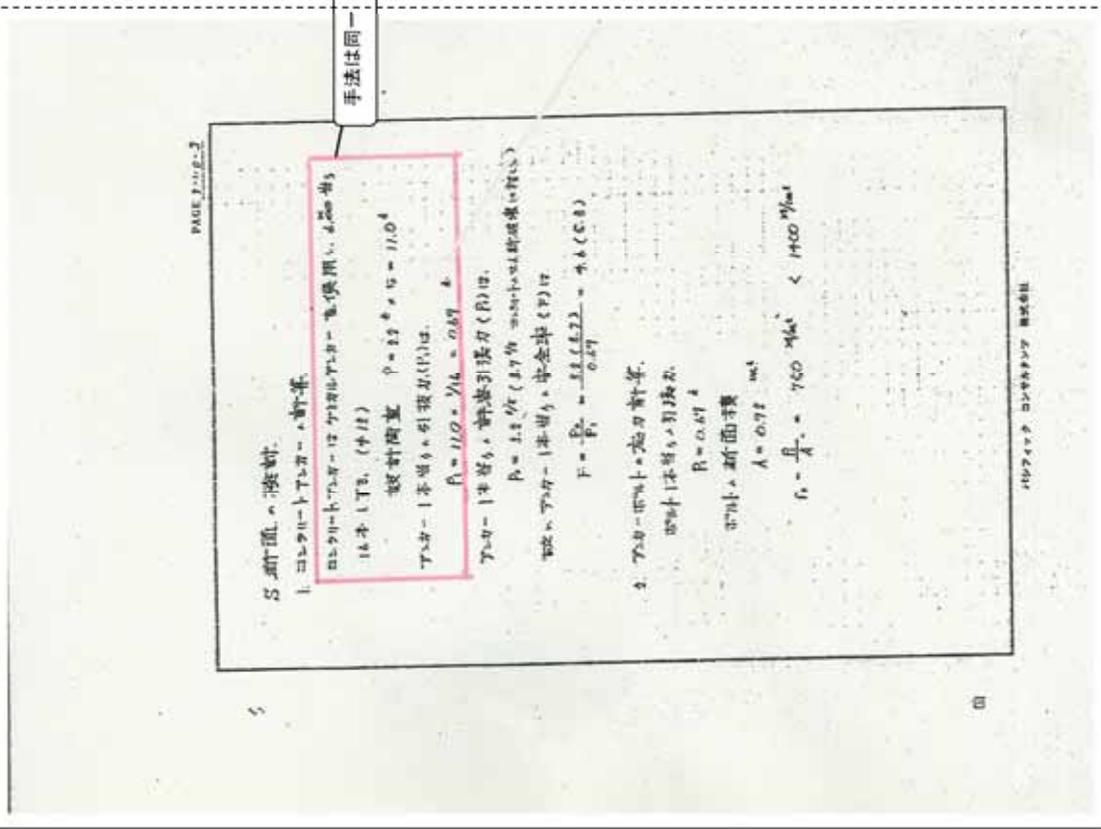
周長はボルト径 16 mm で計算されており、それを適用。付着面積の算定に埋込み長が使われており、それにならっている。

L 断面の再現設計

計算手法は同一 (単位系は現行基準に変更)

計算手法は同一 (単位系は現行基準に変更)

S断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))



L断面の再現設計

L断面の検討

1. コンクリートアンカーの計算

コンクリートアンカーはケミカルアンカーを使用し、6.00m当り16本とする。(φ16)

設計荷重 $P = 39.0 \times 5 = 195.0 \text{ kN}$

アンカー1本当りの引抜力 P_1 は、 $P_1 = 195.0 / 16 = 12.19 \text{ kN}$

アンカー1本当りの許容引抜力 P_a は、 $P_a = 38.1 \text{ kN} (48.8 \text{ kN})$ (コンクリートのせん断破壊に対して)

アンカー1本当りの安全率(F)は、 $F = P_a/P_1 = 38.4 (48.8) / 12.2 = 3.1 (4.0)$

2. アンカーボルトの応力計算

ボルト1本当りの引抜力 $P_1 = 12.2 \text{ kN}$

ボルトの断面積 $A = 157 \text{ mm}^2$

ボルトの引張応力 $\sigma_t = P_1/A = 78 \text{ N/mm}^2 < 140 \text{ N/mm}^2$

アンカー1本当りの引抜力
φ16鋼 長さ分を全本数で除した値

S断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))

取付けボルト(ピン)

使用ボルト $d = 12 \text{ mm}$
 断面積 $A_s = 6.06 \text{ cm}^2$

① せん断応力度
 $\tau = \frac{P}{A_s} = \frac{39000}{6.06} = 6435 \text{ N/cm}^2 < 10000 \text{ N/cm}^2$

② 圧縮応力度
 $\sigma_c = \frac{P}{t \cdot d} = \frac{39000}{0.9 \times 1.2} = 36111 \text{ N/cm}^2 < 14000 \text{ N/cm}^2$

③ せん断・計算
 せん断許容力 $N = 6.06 \times 10000 = 60600 \text{ N}$
 $39000 \text{ N} < 60600 \text{ N}$

④ 圧縮・計算
 圧縮許容力 $N = 6.06 \times 14000 = 84840 \text{ N}$
 $39000 \text{ N} < 84840 \text{ N}$

手法は同一

L断面の再現設計

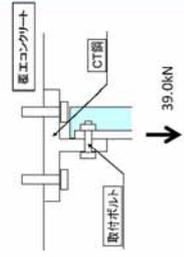
4. 取付けボルト(ピン)

使用ボルト $d = 30 \text{ mm}$ (M30×90)
 断面積 $A_s = 561 \text{ mm}^2$
 締結金具厚 $t = 12 \text{ mm}$ (CT鋼: 15mm)

① せん断応力度
 $\tau = \frac{R}{A_s} = \frac{39000}{561} = 69.5 \text{ N/mm}^2 < 80 \text{ N/mm}^2$

② 圧縮応力度
 $\sigma_c = \frac{P}{t \cdot d} = \frac{39000}{12.0 \times 30.0} = 107.5 \text{ N/mm}^2 < 205 \text{ N/mm}^2$

例) せん断耐力
 $N = 561 \times 140 = 78.54 \text{ kN}$



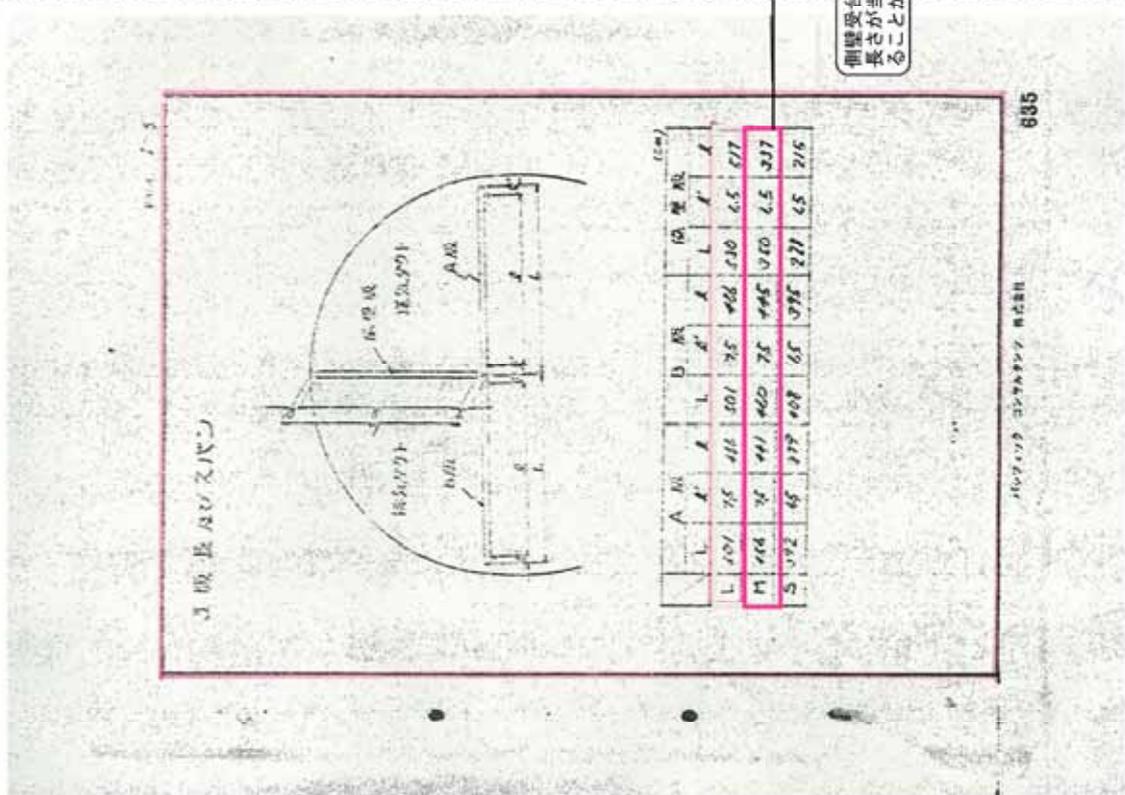
左記、 $80 \text{ N/mm}^2 \cdot 205 \text{ N/mm}^2$ は、せん断応力度及び圧縮応力度の許容値を示す。
 例) せん断耐力
 $N = 561 \times 140 = 78.54 \text{ kN}$

S 断面 当時の設計報告書(提供：中日本高速道路(株))	L 断面の再現設計	摘要
<p style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px;">当時の設計報告書には検討なし</p>	<p>側壁受台金属系ボルトの照査</p> <p>1.ボルト1本あたり引張強度</p> <ul style="list-style-type: none"> ・受台作用力 15.813 kN(1.2m) ・作用長 L0 480 mm ・ボルト指置間隔 H 400 mm $\text{ボルト引張力 } T = P \times L0 / H = \frac{15.813 \times 480}{400} = 18.976 \text{ kN(1.2m)}$ <ul style="list-style-type: none"> ・ボルト本数 N 2 本(1.2m) (上面引張側) ・ボルト本数 ΣN 3 本(1.2m) ・ボルト1本あたり引張力 9.488 kN/本 ・ボルト1本あたりせん断力 6.325 kN/本 <p>2.強度の計算</p> <p>(日本建築学会 各種合成構造設計指針・同解説B20により求める)</p> <p>金属系ボルト1本当たりの引張強度は、下記の式で算定される値のうち小さい値とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・降伏により決まる場合のボルト1本当たりの許容引張力 $Pa1 = \Phi 1 \cdot \sigma pa = 38.465 \text{ kN}$ <p>ここに、$\Phi 1$: 1 (※ここでは強度扱いとして1とする) σpa: 245 N/mm² (SS400扱い) scA: 157 mm²</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コーン破壊により決まる場合のボルト1本当たりの許容引張力 $Pa2 = \Phi 2 \cdot \sigma ct \cdot Ac = 41.550 \text{ kN}$ <p>ここに、$\Phi 2$: 1 (※ここでは強度扱いとして1とする) Fc: 20 N/mm² $\sigma ct = 0.31 \sqrt{Fc}$: 1.39 $Ac = \pi \times Le \times (Le + da)$: 29971 mm²</p> <p> da: 16 mm Le: 90.0 mm </p> <p>3.強度の対比</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ボルト1本あたり引張力 9.488 kN/本 < MIN(Pa1, Pa2) = 38.47 kN/本 	<p>当時の設計報告書 が見つからず、復元 した。</p> <p>2.強度の計算 現在の基準で試 算した。</p> <p>左記指針では低減 係数を用いている が、再現設計との比 較のため、$\phi=1$と して計算した。</p>

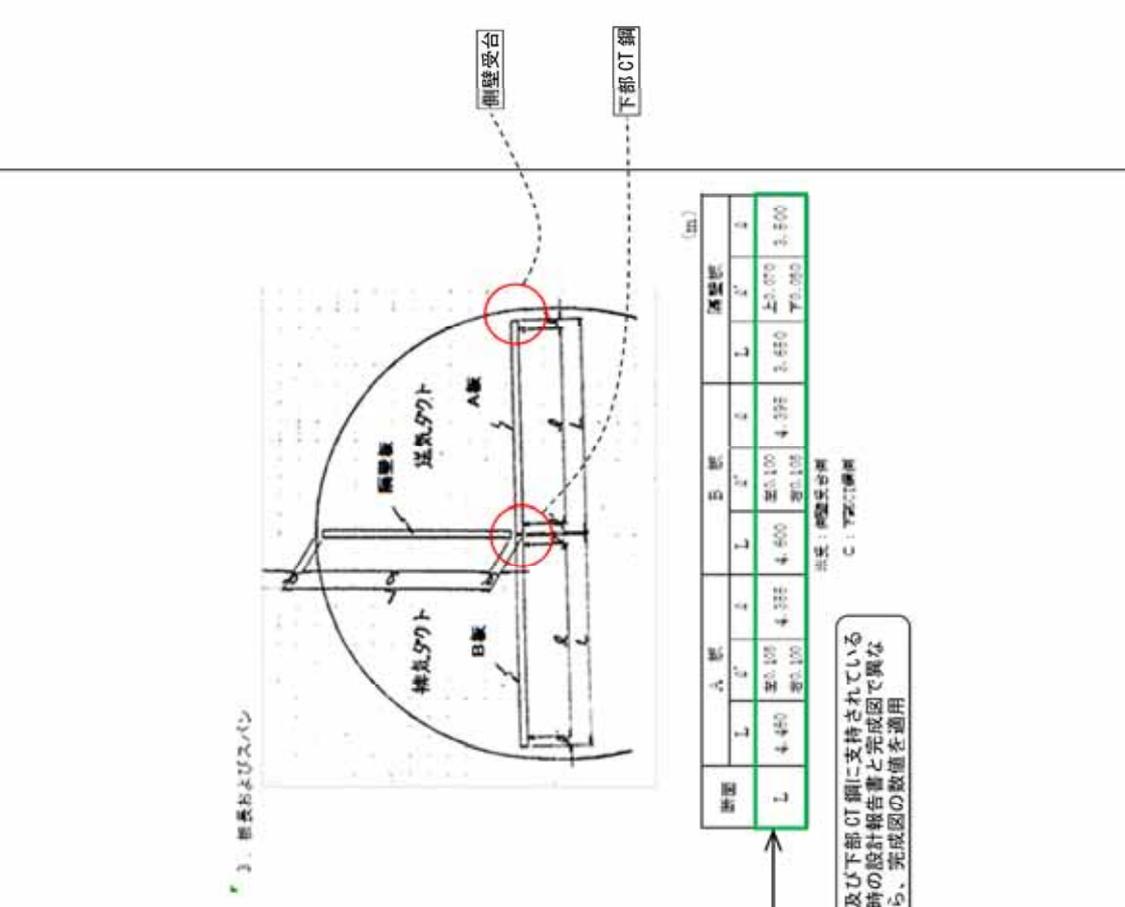
2)M 断面

S 断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))	M断面の再現設計	摘要																								
<p>第1章 設計条件</p> <p>1. 設計荷重</p> <p>(1) 風圧</p> <table border="1" data-bbox="518 1467 774 1780"> <thead> <tr> <th>計算断面</th> <th>トンネル断面</th> <th>天井板</th> <th>隔壁板</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>L</td> <td>送気 150</td> <td>排気 -150</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>200</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 作業荷重 100 kg/m²</p> <p>2. 荷重の組合せ</p> <p>(1) 送気側</p> <p>(イ) 自重 + 風圧 (ロ) 自重 + 作業荷重 (イ)、(ロ)のいずれか大きい方について検討する。</p> <p>(2) 排気側</p> <p>(イ) 自重 + 風圧 (ロ) 自重 + 作業荷重 (イ)、(ロ)について検討する。 ただし、(イ)が正の値の場合は、いずれか大きい方について検討する。</p> <p>PAGE 1-1</p> <p>033</p>	計算断面	トンネル断面	天井板	隔壁板	①	L	送気 150	排気 -150				200	<p>第1章 設計条件</p> <p>1. 設計荷重</p> <p>(1) 風圧</p> <table border="1" data-bbox="518 660 614 1108"> <thead> <tr> <th>計算断面</th> <th>トンネル断面</th> <th>天井板</th> <th>隔壁板</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>L</td> <td>送気 150</td> <td>排気 -150</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>200</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 作業荷重 100 kg/m²</p> <p>2. 荷重の組合せ</p> <p>(1) 送気側</p> <p>(イ) 自重 + 風圧 (ロ) 自重 + 作業荷重 (イ)、(ロ)のいずれか大きい方について検討する。</p> <p>(2) 排気側</p> <p>(イ) 自重 + 風圧 (ロ) 自重 + 作業荷重 (イ)、(ロ)について検討する。 ただし、(イ)が正の値の場合は、いずれか大きい方について検討する。</p>	計算断面	トンネル断面	天井板	隔壁板	①	L	送気 150	排気 -150				200	<p>(1) 風圧 当時の設定に基づく</p> <p>(2) 作業荷重 当時の設定に基づく</p>
計算断面	トンネル断面	天井板	隔壁板																							
①	L	送気 150	排気 -150																							
			200																							
計算断面	トンネル断面	天井板	隔壁板																							
①	L	送気 150	排気 -150																							
			200																							

S断面 当時の設計報告書(提供：中日本高速道路(株))



M断面の再現設計



側壁受台及び下部CT鋼に支持されている長さが当時の設計報告書と完成図で異なることから、完成図の数値を採用

摘要

側壁受台
下部CT鋼

S断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))

M断面の再現設計

摘要

5. コンクリートのせん断力

ケミカルアンカーの埋孔深さは、 $L_p=100\text{mm}$ ($\phi 13$) とする。

円すい面積(せん断抵抗面積)

$$A = \pi \cdot L \cdot L_p$$

$$= 3.14 \times (\sqrt{2} \times 100) \times 100 = 44,429 \text{ mm}^2 \text{ --- } \phi 16$$

コンクリート圧縮強度 $\sigma_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$

許容せん断応力度 $\tau_{al} = 0.65 \text{ N/mm}^2$ とする。

せん断抵抗力

$$R = 44,429 \times 0.65 = 28,88 \text{ kN/本 --- } \phi 16$$

付着力のチェック

レジン付着力 $S = 8.0 \text{ N/mm}^2$ (3日)

$$P = (\pi \times \phi) \times L_p \times S$$

$$= 3.14 \times 12 \times 100 \times 8.0 = 30.16 \text{ kN/本 --- } \phi 16$$

$$> 28.88 \text{ kN/本}$$

計算手法は同一
(単位系は現行
基準に変更)

6. コンクリートのせん断力

ケミカルアンカーの埋孔深さは、 $L_p=100\text{mm}$ ($\phi 13$) とする。

円すい面積(せん断抵抗面積)

$$A = \pi \cdot L \cdot L_p$$

$$= 3.14 \times (\sqrt{2} \times 100) \times 100 = 44,429 \text{ mm}^2 \text{ --- } \phi 16$$

コンクリート圧縮強度 $\sigma_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$

許容せん断応力度 $\tau_{al} = 0.65 \text{ N/mm}^2$ とする。

せん断抵抗力

$$R = 44,429 \times 0.65 = 28,88 \text{ kN/本 --- } \phi 16$$

付着力のチェック

レジン付着力 $S = 8.0 \text{ N/mm}^2$ (3日)

$$P = (\pi \times \phi) \times L_p \times S$$

$$= 3.14 \times 12 \times 100 \times 8.0 = 30.16 \text{ kN/本 --- } \phi 16$$

$$> 28.88 \text{ kN/本}$$

計算手法は同一
(単位系は現行
基準に変更)

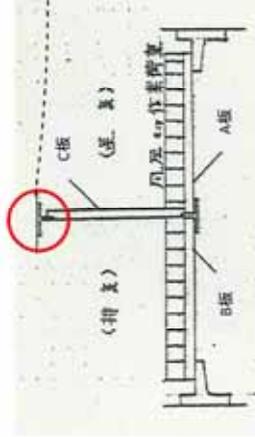
S断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))

M断面の再現設計

摘要

2) 荷重 (1.0m当り)

端目点



荷重種別	A板(逆気側)	B板(排気側)	C板(隔壁)
板厚(m)	0.070	0.070	0.060
板長(m)	4.560	4.600	3.500
床位体積重量(kN/m ³)	24.500	24.500	24.500
単位長当り重量(kN)	7.820	7.889	5.145
支点反力(kN)	3.910	3.945	5.145
風荷重(kN/m ²)	1.472	-1.472	2.911
作用長(m)	4.560	4.600	3.500
支点反力(kN)	3.356	-3.386	5.152
作業荷重(kN/m ²)	1.000	1.000	-
作用長(m)	4.560	4.600	-
支点反力(kN)	2.280	2.300	-
受お反力	7.266	3.945	-
合計	6.190	6.245	-

(最大反力)

- A板自重による反力
- B板自重による反力
- C板自重
- A板風荷重による反力
- B板作業荷重による反力

合計 $R_0 = 18.656 \text{ kN/m}$

$W = 1.000$

その他自重(CT鋼, 吊材等)

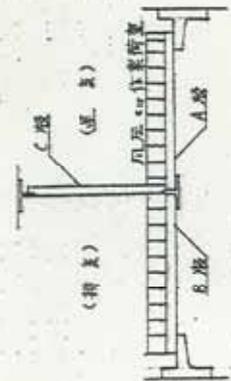
最大反力(1パネル1.2m当り)

$R = (R_0 \times 1.20) + W = (18.656 \times 1.20) + 1.000 = 23.387 \text{ kN} \approx 23.5 \text{ kN/枚}$

計算手法は同一(単位系は現行基準に変更)

計算手法は同一(単位系は現行基準に変更)

2) 荷重 (1.0m当り)



項目	単位	値	単位	値	単位	値	
A板自重反力	kN	7.820	桁梁自重反力	kN	7.889	床版自重反力	5.145
B板自重反力	kN	3.945	A板風荷重反力	kN	3.356	B板風荷重反力	-3.386
C板自重反力	kN	5.145	作業荷重反力	kN	2.280	合計反力	6.245

$R = (18.656 \times 1.20) + 1.000 = 23.387 \text{ kN}$

$R = (18.656 \times 1.20) + 1.000 = 23.387 \text{ kN}$

$R = (18.656 \times 1.20) + 1.000 = 23.387 \text{ kN}$

$R = (18.656 \times 1.20) + 1.000 = 23.387 \text{ kN}$

S断面 当時の設計報告書(提供：中日本高速道路(株))

5 断面の検討

1. コンクリートアンカーの計算

コンクリートアンカーはケミカルアンカーを使用し、
6.00m当り16本とする。(φ12)

設計荷重
 $P = 23.5 \times 5 = 117.5 \text{ kN}$

アンカー1本当りの引抜力 P_1 は、
 $P_1 = 117.5 / 16 = 7.34 \text{ kN}$
 $\approx 7.4 \text{ kN}$

アンカー1本当りの許容引抜力 P_a は、
 $P_a = 20.6 \text{ kN}$ (28.8 kN コンクリートのせん断破壊に対して)

アンカー1本当たりの安全率(F)は
 $F = P_a / P_1 = 20.6(28.8) / 7.4 = 2.7(3.9)$

2. アンカーボルトの応力計算

ボルト1本当りの引抜力
 $P_1 = 7.4 \text{ kN}$

ボルトの断面積
 $A = 84.3 \text{ mm}^2$

ボルトの引張応力
 $\sigma_t = P_1 / A = 88 \text{ N/mm}^2 < 140 \text{ N/mm}^2$

M断面の再現設計

L断面の検討

1. コンクリートアンカーの計算

コンクリートアンカーはケミカルアンカーを使用し、
6.00m当り16本とする。(φ12)

設計荷重
 $P = 23.5 \times 5 = 117.5 \text{ kN}$

アンカー1本当りの引抜力 P_1 は、
 $P_1 = 117.5 / 16 = 7.34 \text{ kN}$
 $\approx 7.4 \text{ kN}$

アンカー1本当りの許容引抜力 P_a は、
 $P_a = 20.6 \text{ kN}$ (28.8 kN コンクリートのせん断破壊に対して)

アンカー1本当たりの安全率(F)は
 $F = P_a / P_1 = 20.6(28.8) / 7.4 = 2.7(3.9)$

2. アンカーボルトの応力計算

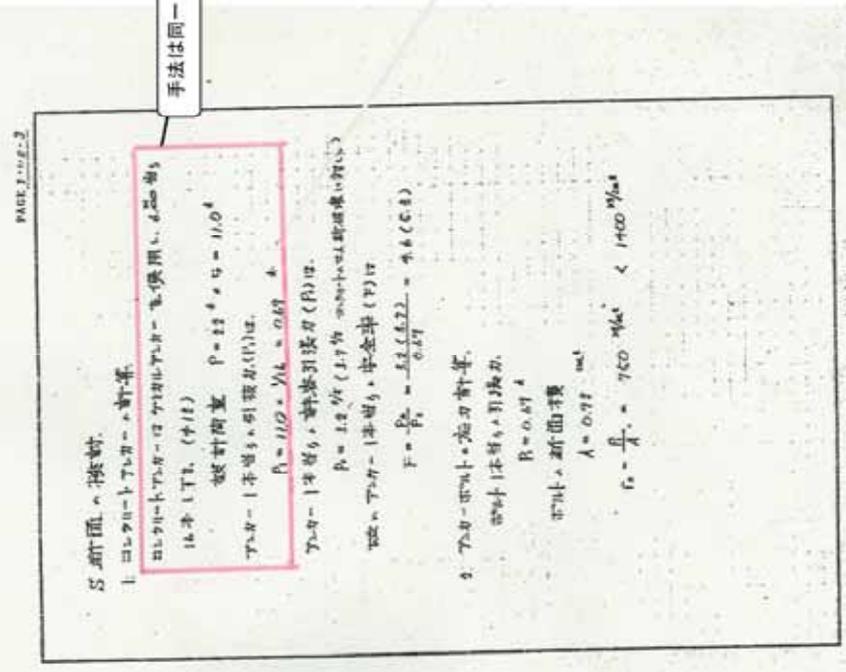
ボルト1本当りの引抜力
 $P_1 = 7.4 \text{ kN}$

ボルトの断面積
 $A = 84.3 \text{ mm}^2$

ボルトの引張応力
 $\sigma_t = P_1 / A = 88 \text{ N/mm}^2 < 140 \text{ N/mm}^2$

概要

7カー1本当りの引抜力
 CT鋼6m長さ分を
 全本数で除した
 値



S断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))

取付けボルト(ピン)

使用ボルト $d = 22$ mm (M22×75)

断面積 $A_s = 303$ mm²

締結金具厚 $t = 9$ mm (CT鋼: 15mm)

39.0kN

(1) せん断応力度 $\tau = \frac{R}{A_s} = \frac{23500}{303} = 78.0$ N/mm² < 80 N/mm²

(2) 支圧応力度 $\sigma_s = \frac{P}{t \cdot d} = \frac{23500}{9.0 \times 22.0} = 119.0$ N/mm² < 205 N/mm²

左記、80N/mm²・205N/mm²は、せん断応力度及び支圧応力度の許容値を示す。

例) せん断耐力 $N = 303 \times 140 = 42.4$ kN

M断面の再現設計

摘要

左記、80N/mm²・205N/mm²は、せん断応力度及び支圧応力度の許容値を示す。

例) せん断耐力 $N = 303 \times 140 = 42.4$ kN

S 断面 当時の設計報告書 (提供：中日本高速道路 (株))

天井振受台の設計

1) 受台の設計条件

(振用材料)

コンクリート $\sigma_{tk} = 24 \text{ N/mm}^2$

鉄 筋 SD30 $\sigma_{sk} = 160 \text{ N/mm}^2$

鋼 材 SS41 $\sigma_{tk} = 140 \text{ N/mm}^2$

許容曲げ引張応力度 $\sigma_{sk} = 80 \text{ N/mm}^2$

許容せん断応力度

2) A板側受台

(1) 形状寸法

(作用力計算より)

作用力 (自重+風荷重(鉛直)) 7.266 kN/m

(自重+作業荷重) 6.190 kN/m

$\therefore R = 7.266 \text{ kN/m}$

Fig. 1

(単位:mm)

$f = \frac{2 \times 0.08 + 0.12}{0.08 + 0.12} \times \frac{0.4}{3}$

$= 0.187 \text{ m}$

脊梁(芯)として、金属系ボルト位置にある台座部の重量を計上する。

(2) 荷重 既行き 1.200 m 当りでの設計とする

作用力 (P-C板+風荷重(鉛直)) $= 7.266 \times 1.200 = 8.719 \text{ kN}$

自重 (受台) $R_{d①} = 0.100 \times 0.600 \times 1.200 \times 24.5 = 1.764 \text{ kN}$

$R_{d②} = (0.050 + 0.120) / 2 \times 0.400 \times 1.200 \times 24.5 = 1.176 \text{ kN}$

$R_{d③} = 1/2 \times (0.100 + 0.120) \times 0.600 \times 1.200 \times 24.5 = 0.194 \text{ kN}$

計 $= 11.853 \text{ kN}$

M断面の再現設計

当時の設計報告書が見つからず、復元した。

当時の設計報告書には検討なし

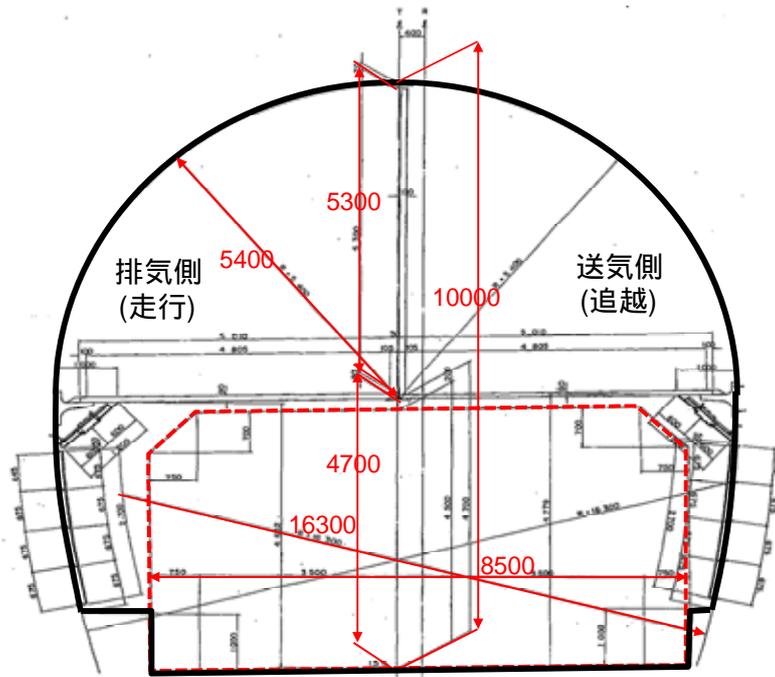
S断面 当時の設計報告書(提供: 中日本高速道路(株))	M断面の再現設計	摘要
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 10px;"> 当時の設計報告書には検討なし </div> <p>側壁受台金属系ボルトの照査</p> <p>1.ボルト1本あたり引抜強度</p> <ul style="list-style-type: none"> ・受台作用力 11,853 kN(1.2m) ・作用長 L₀ 430 mm ・ボルト総間隔 H 400 mm $T = P \times L_0 / H = 11,853 \times 430 / 400 = 12,742 \text{ kN(1.2m)}$ <ul style="list-style-type: none"> ・ボルト本数 N 2 本(1.2m) (上面引張側) ・ボルト本数 2N 3 本(1.2m) ・ボルト1本当りの引抜力 6,371 kN/本 ・ボルト1本当りせん断力 4,247 kN/本 <p>2.強度の計算</p> <p>(日本建築学会 各種合成構造設計指針・同解説R20により求める)</p> <p>金属系ボルト1本当りの引抜力は、下記2式で算定される値のうち小さい値とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・降伏により決まる場合のボルト1本当りの許容引張り力 $P_{a1} = \phi_1 \cdot s \cdot e \cdot p_a \cdot s_c A = 38.47 \text{ kN}$ <p>ここに、ϕ_1: 1 (※ここでは強度係数として1とする) $s \cdot e \cdot p_a$: 245 N/mm² (SS400扱い) $s_c A$: 157 mm²</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コーン破壊により決まる場合のボルト1本当りの許容引張り力 $P_{a2} = \phi_2 \cdot e \cdot o \cdot t \cdot A_c = 41.55 \text{ kN}$ <p>ここに、ϕ_2: 1 (※ここでは強度係数として1とする) $e \cdot o \cdot t$: 29 N/mm² $A_c = \pi \times L_e \times (L_e + d_a)$: 1,39 d_a: 16 mm L_e: 96.0 mm</p> <p>3.強度の対比</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ボルト1本あたり引抜力 6,371 kN/本 < MIN(P_{a1}, P_{a2}) = 38.47 kN/本 	<p>当時の設計報告書が見つからず、復元した。</p> <p>2.強度の計算 現在の基準で試算した。</p> <p>左記指針では低減係数を用いているが、再現設計との比軟のため、$\phi=1$として計算した。</p>	

3.3.2. ダクト断面別の接着系ボルトの設計

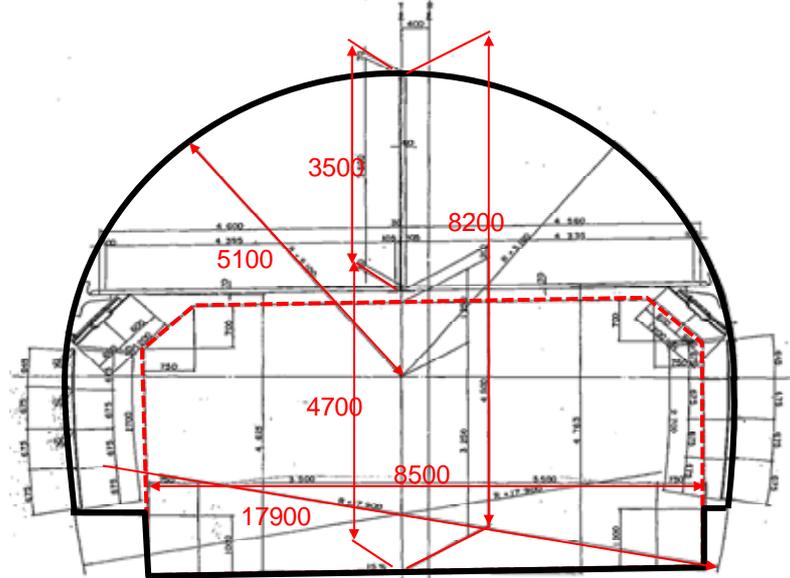
3.3.2.1 ダクト断面別の寸法

- ・ L断面の内空高は10.0mであり、建築限界上方の送・排気ダクトの空間が大きい。
- ・ そのためL断面では、天井板隔壁の高さも5.300m(厚さは100mm)と最大である。

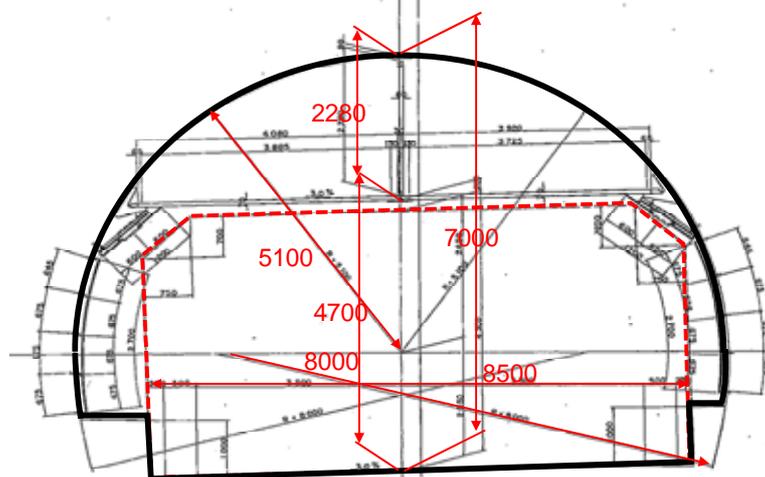
	L断面	M断面	S断面
トンネル幅員 (m)	8.500		
トンネル内空高 (m)	10.000	8.200	7.000
覆工上部半径 (m)	5.400	5.100	5.100
覆工下部半径 (m)	16.300	17.900	8.000
隔壁高 (m)	5.300	3.500	2.280
天井板設置高 (m)	4.700		



L断面



M断面



S断面

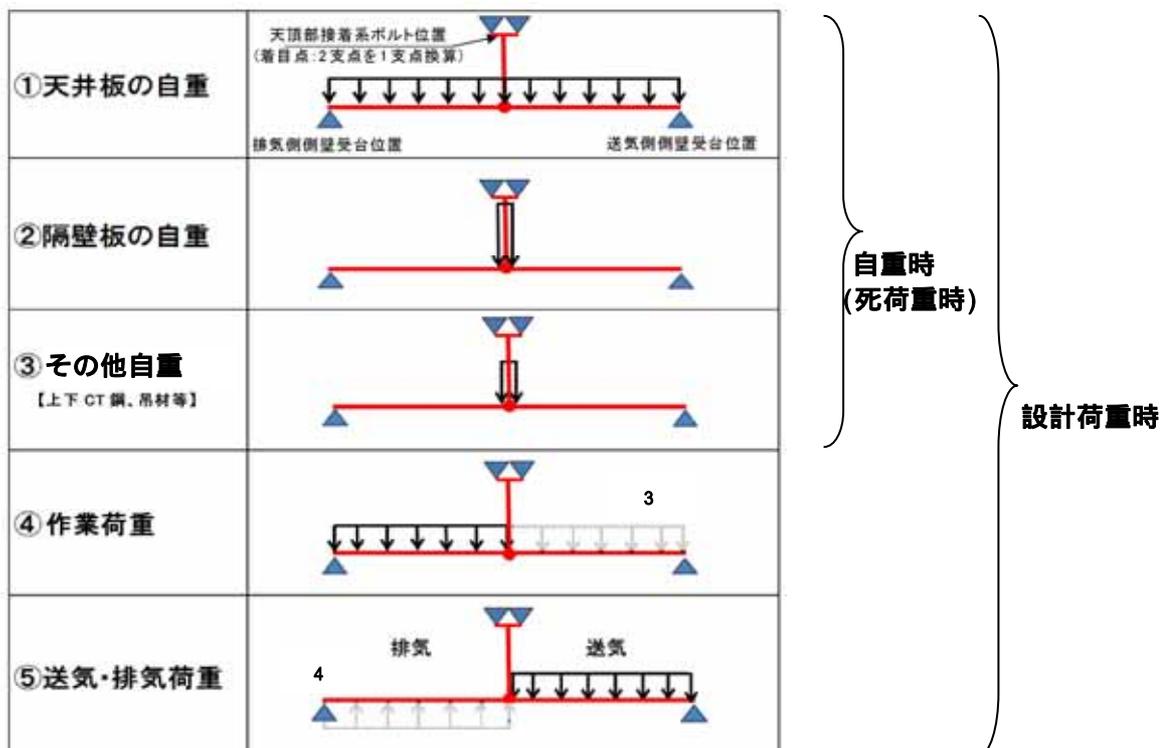
提供：中日本高速道路(株)

3.3.2.2 ダクト断面別の接着系ボルトの作用力

- ・ L断面の接着系ボルト作用力は、設計荷重時¹ 12.2kN、自重時(死荷重時)² 9.3kNである。
- ・ M及びS断面の接着系ボルト作用力は、設計荷重時 6.6~7.4kN、自重時(死荷重時) 4.3~5.4kNと、L断面の0.5~0.6倍と小さい。
- ・ 一方、設計上の接着系ボルト仕様は、M・S断面で M12 (実際に使用されたのはM16)の細径としており、発生する引張応力度は、L断面M16の0.86~1.13倍と同等である。

			L断面			M断面			S断面		
			B板(排気側)	C板(隔壁板)	A板(送気側)	B板(排気側)	C板(隔壁板)	A板(送気側)	B板(排気側)	C板(隔壁板)	A板(送気側)
自重	板厚	mm	90	100	80	70	60	70	70	60	70
	板長	mm	5010	5300	5010	4600	3500	4560	4080	2280	3920
	単位質量	kN/mm ³	24.5			24.5			24.5		
	単位幅質量	kN/m	11.047	12.985	9.820	7.889	5.145	7.820	6.997	3.352	6.723
	支点作用力 ¹	kN/m	5.524	12.985	4.910	3.945	5.145	3.910	3.499	3.352	3.361
	合計()	kN/m	23.418			13.000			10.212		
	パネル当たり作用力(=1.2x +1.0) ²	kN/パネル	29.102 29.5			16.600 17.0			13.254 13.5		
ボルト作用力(=5x /16)	kN/本	9.219 9.3			5.313 5.4			4.219 4.3			
設計荷重 (=自重+A板 風荷重(鉛直) +B板作業 荷重)	荷重	kN/mm ²	1.000	0.000	2.160	1.000	0.000	1.472	1.000	0.000	2.160
	支点作用力 ¹	kN/m	2.505	0.000	5.412	2.300	0.000	3.356	2.040	0.000	4.234
	合計()	kN/m	31.335			18.656			16.485		
	パネル当たり作用力(=1.2x +1.0) ²	kN/パネル	38.602 39.0			23.387 23.5			20.782 21.0		
	ボルト作用力(=5x /16)	kN/本	12.188 12.2			7.344 7.4			6.563 6.6		
接着系 ボルト 仕様	径		M16			M12			M12		
	有効断面積	mm ²	156.7			84.3			84.3		
	引張応力度(自重)	N/mm ²	59.3 (1.00)			64.1 (1.06)			51.0 (0.86)		
	引張応力度(設計荷重)	#	77.9 (1.00)			87.8 (1.13)			78.3 (1.01)		

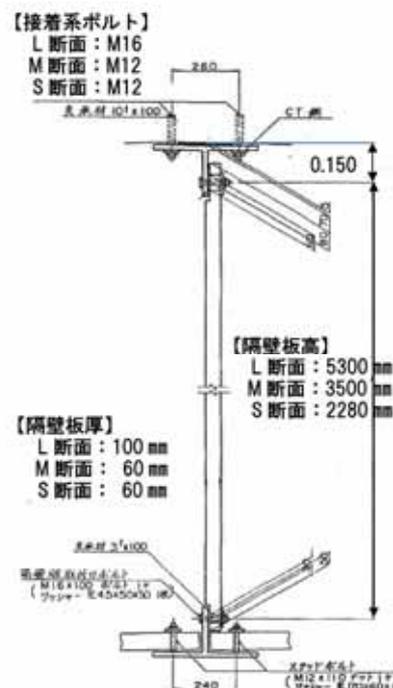
荷重の組み合わせは以下の通りである。



1. ここでいう支点作用力とは、天頂部接着系ボルト位置を着目点とし、2支点(列)の作用力の和を1支点に換算したものである。
2. 1.0kN/パネルとは、トンネル方向の1.2mあたりのその他自重(上下CT鋼、吊材等)を示す。
3. 送気側の作業荷重は、ボルト作用力の検討に見込んでいない。
4. 上向きの風荷重(鉛直)は、ボルト作用力の検討に見込んでいない。

3.3.2.3 ダクト断面別の接着剤の平均付着応力度

- ・ 3.6.3 の引抜試験において、引き抜かれたボルトは、落下区間を含むL断面区間を除いた他の区間においては、設計で得られた接着系ボルトよりも太径の接着系ボルトであった。
- ・ これを踏まえれば、接着剤の平均付着応力度が最も大きい区間は、落下区間を含む東京側のL断面（設計荷重時で 1.68N/mm^2 ）であり、他の区間に比べて、強度に対する余裕が小さくなっていったと考えらる。



上記、隔壁板高は隔壁板の高さ方向の全長を示す。

実際に配置されている接着系ボルトでの定着部の付着応力度の差異

		L断面(名古屋側)	M断面	L断面(東京側)	S断面	
区間延長	m	802	1888	1235	492	
設計上の接着系ボルト	-	M16	M12	M16	M12	
実際の使用接着系ボルト	-	M20	M16	M16	M16	
有効断面積 A	mm ²	244.8	156.7	156.7	156.7	
削孔径	mm	22	19	19	19	
削孔深さ	mm	200	130	130	130	
定着長 L(=削孔深さ-ボルト径/2)	mm	190	122	122	122	
自重時	接着系ボルト作用力 Pd	kN	9.3	5.4	9.3	4.3
	平均付着応力度	N/mm ²	0.71	0.74	1.28	0.59
設計荷重時	接着系ボルト作用力 P	kN	12.2	7.4	12.2	6.6
	平均付着応力度	N/mm ²	0.93	1.02	1.68	0.91

$$1.28 / (0.59 \sim 0.74) = 1.73 \sim 2.17$$

$$1.68 / (0.91 \sim 1.02) = 1.65 \sim 2.85$$

平均付着応力度は、所定通りの付着長があるものとし、 $P / (x \times L)$ とした。

3.3.3. 換気運転による接着系ボルト作用力の増加

3.3.3.1 計算位置と設計風荷重

設計断面(L)の寸法は、左図に示すように、内空高が10.0m及び隔壁高が5.3mである。

また、設計断面(L)の隔壁の設計風荷重は、下図のように送気・排気側の風圧の差であり、その最大値は米沢川換気所で 4.90kN/m^2 ($220+280\text{ kg/m}^2$)である。

一方、落下区間の風荷重は、当初設計で考慮していた風荷重を線形補間すると設計風荷重の最大値の72%にあたる 3.55kN/m^2 ($162+200\text{ kg/m}^2$)である。

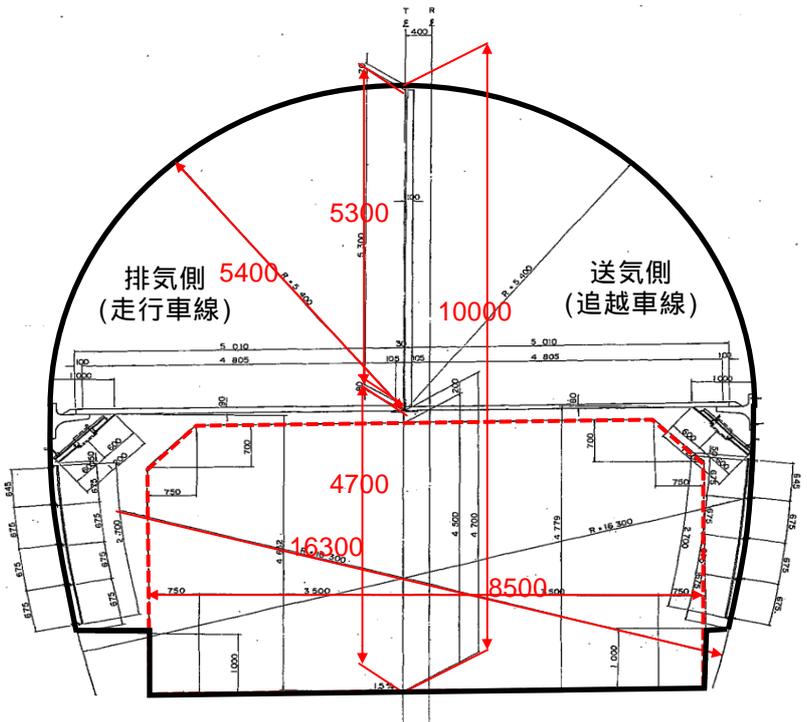


図 設計断面(L)の寸法 (単位:mm)

提供：中日本高速道路(株)

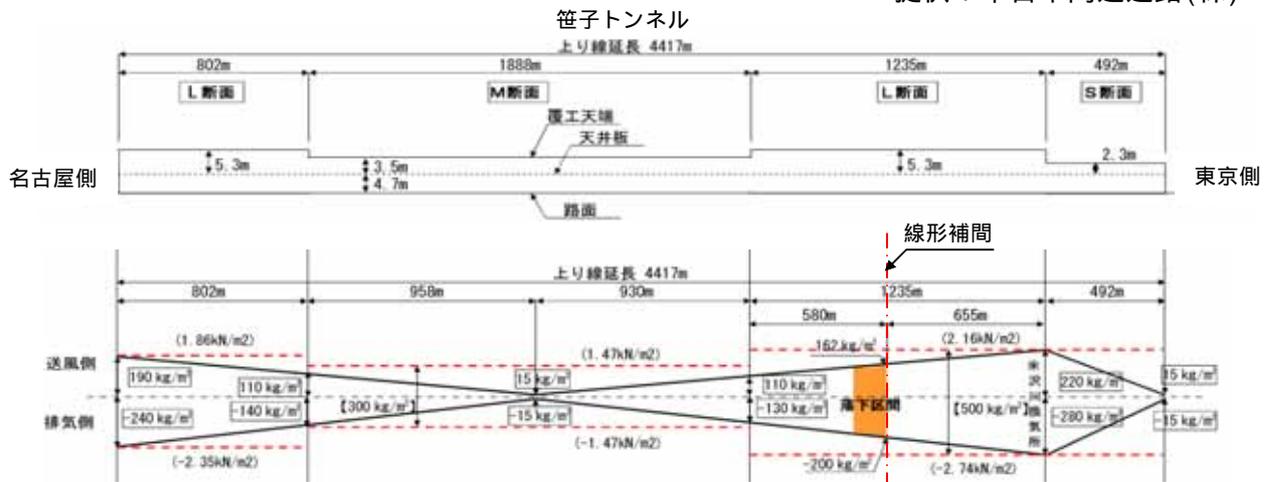


図 トンネル方向の設計風荷重 (上段:トンネル側面図 下段:設計風荷重)

- 凡例) ———— : 当初設計における距離による減衰を考慮した風圧
 - - - - - : ダクト断面の設計風荷重
 □ : 寸法を引出した断面での風圧

表 落下区間の風荷重の設定

	M・L断面境界部	落下区間(東京側)	米沢川換気所部
送気側風荷重	110 kg/m ²	$220 - (220 - 110) / 1235 \times 655 = 162\text{ kg/m}^2$	220 kg/m ²
排気側風荷重	-130 kg/m ²	$-280 - (-280 + 130) / 1235 \times 655 = -200\text{ kg/m}^2$	-280 kg/m ²
絶対値合計	240 kg/m ² (2.35 kN/m ²)	362 kg/m ² (3.55 kN/m ²)	500 kg/m ² (4.90 kN/m ²)

3.3.3.2 換気運転による天頂部接着系ボルトの作用力の増加量の計算

天頂部接着系ボルトは下図のように、断面方向に 260 mm の間隔、トンネル方向に 600 mm の間隔に設置され、また長さ 6.0 m の C T 鋼に送気側・排気側ともに各 8 本配置されている。

ここでは、隔壁板に風荷重(水平)が作用すると、C T 鋼が回転するように変形し、天頂部の左右 2 列の接着系ボルトがその荷重を分担し受け持つと仮定して作用力を算出する。

下表に設計断面(L)及び落下区間において、風荷重(水平)により接着系ボルトに作用する荷重の増加の違いを示す。その結果、設計断面(L)では風荷重により送気側ボルト 1 本あたり 5.6 kN 作用力が増加し、落下区間では増加作用力は 4.0 kN であると算定された。設計荷重による作用力と足し合わせれば、設計断面(L)で 17.8 kN、落下区間で 16.2 kN である。

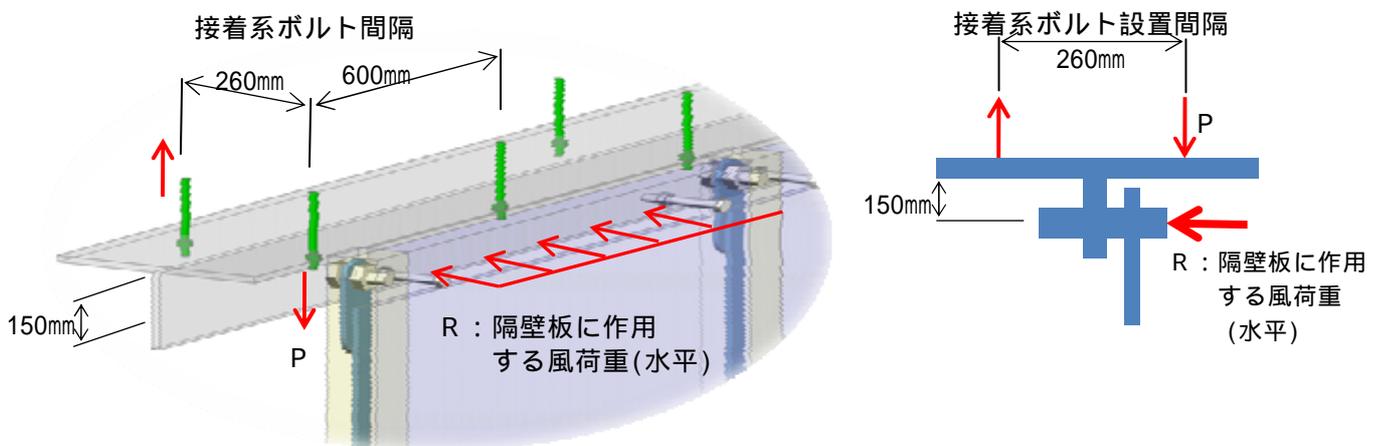


図 覆工天頂部接着系ボルト設置状況と寸法

表 落下区間と設計断面(L)でのボルト増加作用力の違い

	落下区間	設計断面(L)	備考
計算位置	米沢川換気所から 名古屋側へ 655m	米沢川換気所	
隔壁板に作用する風荷重(水平) R (kN/m ²)	3.55	4.90	
風荷重(水平)Rによる 上部CT鋼部作用力 (kN/m)	9.4 (=3.55/2 × 5.30)	13.0 (=4.90/2 × 5.30)	隔壁板高 5.30m (作用方向:)
接着系ボルト 1 本当たりの 増加作用力 P (kN/本)	4.0 (=9.4 × 6.0 × 0.15 / (0.26 × 8))	5.6 (=13.0 × 6.0 × 0.15 / (0.26 × 8))	CT鋼長 6.0m 接着系ボルト本数 16 本 (作用方向:)
接着系ボルト 1 本当たりの 鉛直方向作用力の合計 P (kN/本)	16.2 (=12.2+4.0)	17.8 (=12.2+5.6)	設計荷重による作用力+ 上記による増加作用力

3.3.4. CT鋼を固定する天頂部接着系ボルトの配置及び風荷重の影響解析

本節では、接着系ボルトの配置が接着系ボルトの作用力分布に与える影響を確認することを目的とした。トンネル軸方向 6m を対象として、CT鋼、隔壁板、天井板、吊り金具、締結ボルト、スタッドボルト、接着系ボルトを 3 次元モデルで再現し、死荷重（自重）時、及び風荷重時（鉛直＋水平）における接着系ボルトの作用力を有限要素法により解析するものである。

なお、本解析は接着系ボルトの作用力分布を相対的に比較するために、構造及び荷重分布（風荷重の与え方など）をモデル化して行ったものであり、数値の絶対値を議論するものではない。

3.3.4.1 検討ケース

ケース No	1-1-1	1-1-2	1-1-3	1-2	1-3	2-1-1	2-1-2	2-1-3	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6
ケース	死荷重の影響解析					風荷重（鉛直＋水平）の影響解析					接着系ボルトが対称配置であった場合の解析					
接着系ボルト本数	16本										20本					
荷重の組合せ	死荷重時（①～③）					風荷重時（①～⑥）					死荷重時（①～③）			風荷重時（①～⑥）		
ダクト断面	L断面	L断面	L断面	M断面	S断面	L断面	L断面	L断面	M断面	S断面	L断面	M断面	S断面	L断面	M断面	S断面
接着系ボルトのばね定数	K1	K2	K3	K1		K2	K3	K1								

(1)荷重の組合せ

本項では次ページに示す①～③の自重を死荷重とした。

また、本影響解析における風荷重は、次ページに示す⑤風荷重（鉛直）と⑥風荷重（水平）を両方考慮した風荷重（鉛直＋水平）である。すなわち、当初設計時に考慮していた「⑤天井板にかかる送気・排気の鉛直方向の風荷重」に加えて、「⑥隔壁にかかる水平方向の風荷重」も考慮した場合の接着系ボルトにかかる作用力等を算出した。

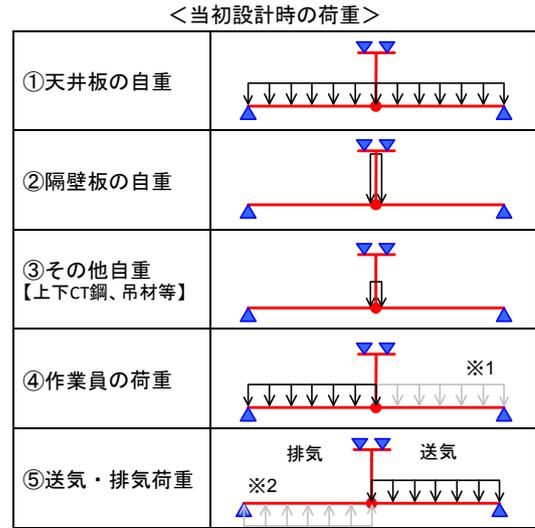
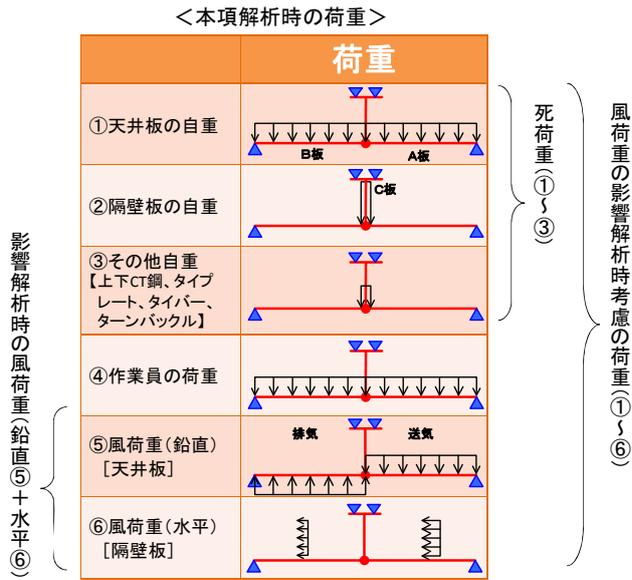
(2)接着系ボルトのばね定数

接着系ボルトのばね定数（K1～K3）の具体的な値を以下のように設定した。

K1=1.00×10⁸[N/mm]：数値計算上、接着系ボルト作用力を大きく評価することを目的に値を設定

K2=2.41×10⁵[N/mm]：接着系ボルトに用いられているボルト鋼材の弾性係数と寸法に着目して設定

K3=1.42×10⁴[N/mm]：「3.6 天頂部接着系ボルトの引抜試験」における接着系ボルトの引抜試験結果から設定

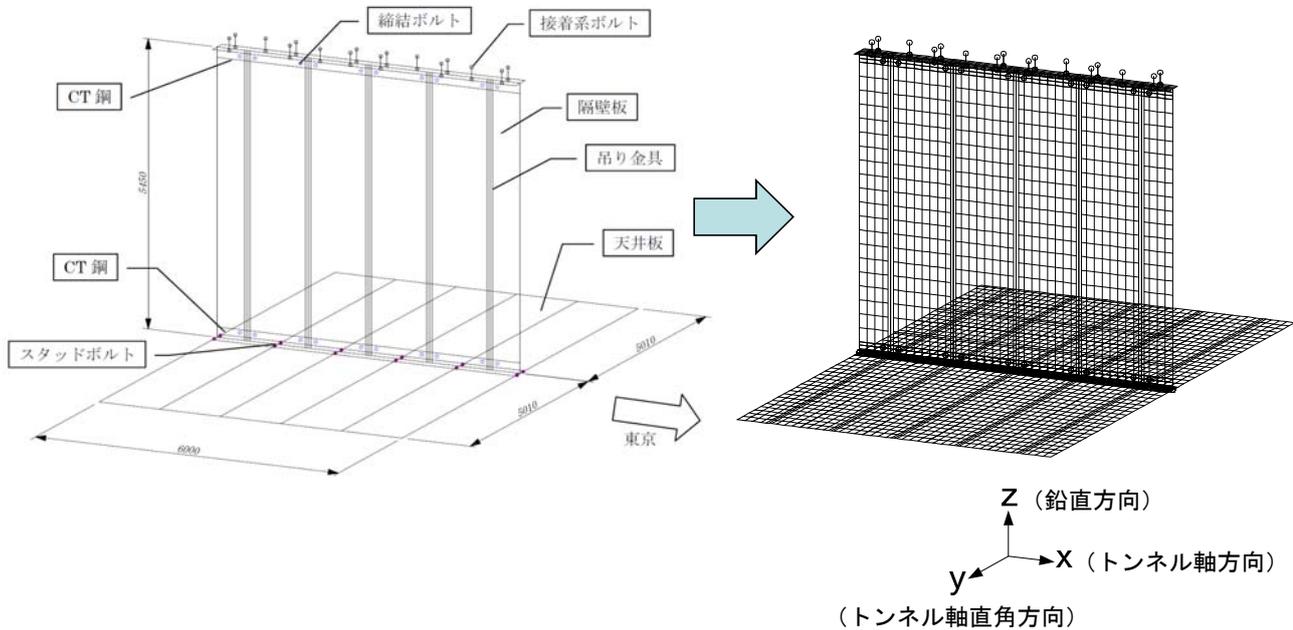


※1.送気側の作業荷重は、検討に見込んでいない。
 ※2.上向き風荷重(鉛直)は、検討に見込んでいない。

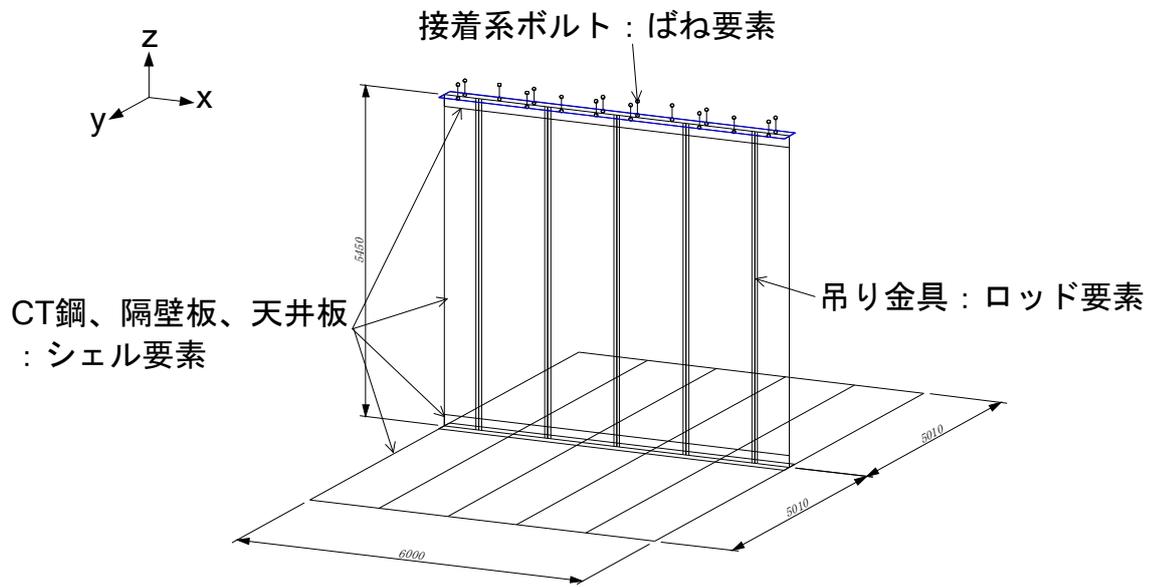
3.3.4.2 構造のモデル化

(1)天井板の実構造に基づく解析モデル

解析モデルを作成するうえで、トンネル軸方向を x 軸、トンネル軸直角方向 y 軸、鉛直方向を z 軸とした。



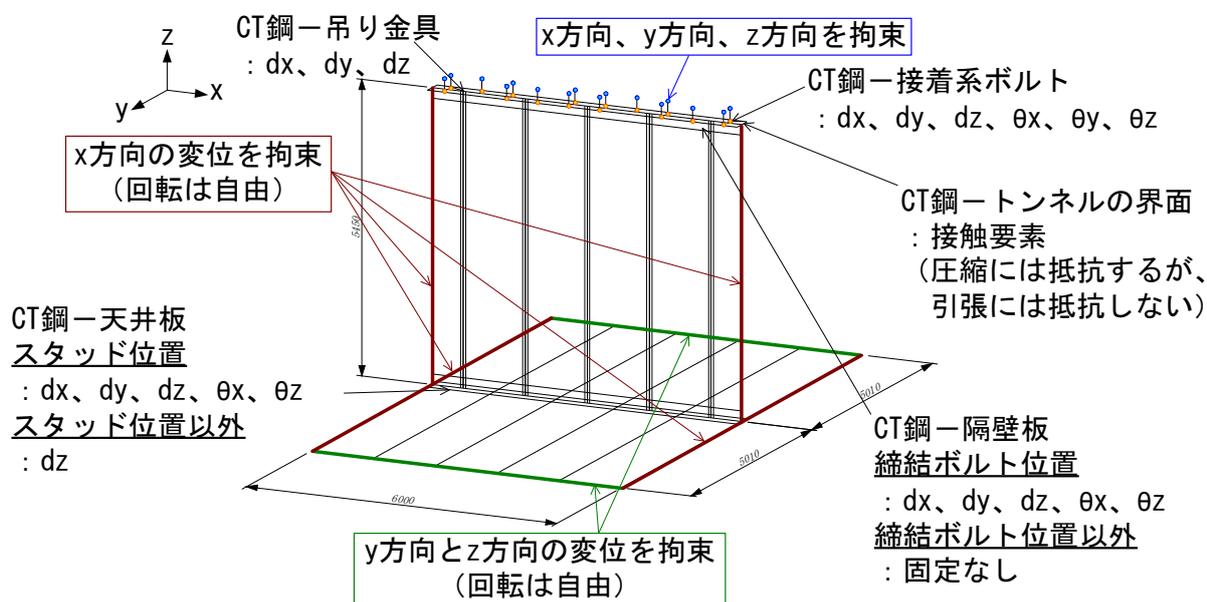
(2)使用要素



部材	要素タイプ
CT鋼	シェル要素
天井板	シェル要素
隔壁板	シェル要素
吊り金具	ロッド要素
接着系ボルト	ばね要素

要素タイプ	軸力	曲げモーメント	せん断力
シェル要素	伝達する	伝達する	伝達する
ロッド要素	伝達する	伝達しない	伝達しない
ばね要素	伝達する	伝達しない	伝達しない

(3)境界条件



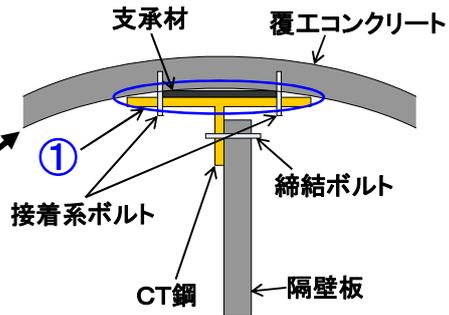
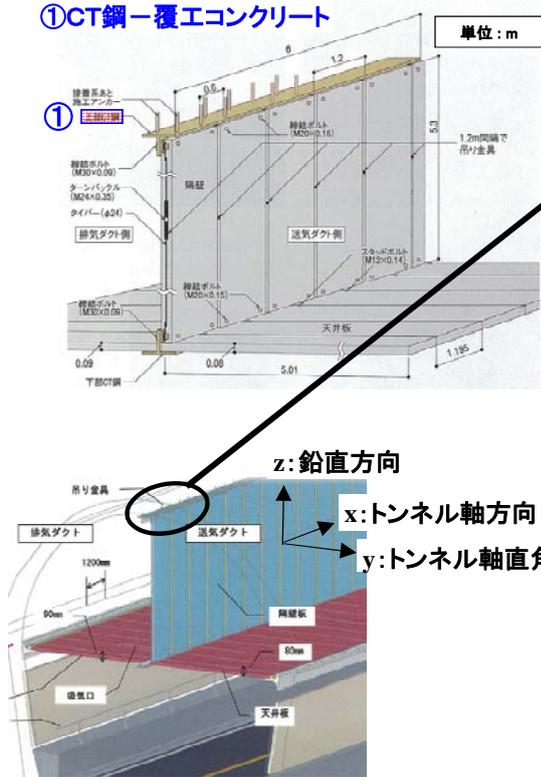
部材の組合せ	相対変位			相対角度		
	dx	dy	dz	θ_x	θ_y	θ_z
①CT鋼—接着系ボルト	固定	固定	固定	固定	固定	固定
②CT鋼—吊り金具	固定	固定	固定	可動	可動	可動
③CT鋼—隔壁板(締結ボルト位置)	固定	固定	固定	固定	可動	固定
④CT鋼—隔壁板(締結ボルト位置以外)	可動	可動	可動	可動	可動	可動
⑤CT鋼—天井板(スタッド位置)	固定	固定	固定	固定	固定	可動
⑥CT鋼—天井板(スタッド位置以外)	可動	可動	固定	可動	可動	可動

変位 (d) が固定 : 軸力を伝達

回転 (θ) が固定 : 曲げモーメントを伝達

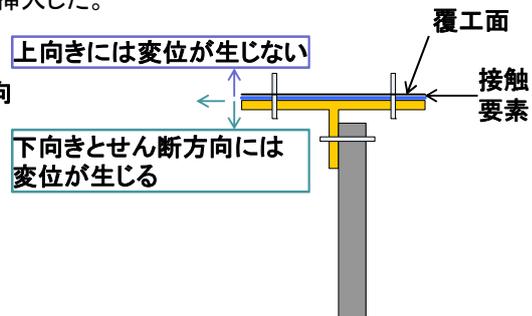
【境界条件】CT鋼-覆エコンクリート

①CT鋼-覆エコンクリート



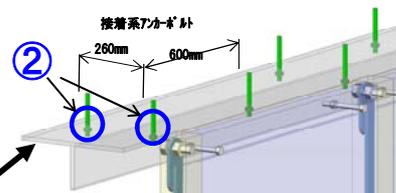
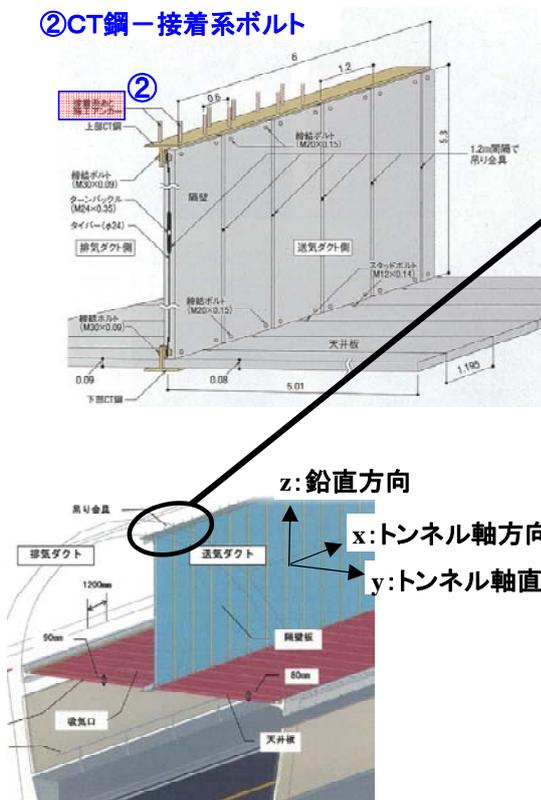
CT鋼と覆エコンクリートは支承材を介して接しており、CT鋼が上向きに変位することはない。

CT鋼と覆エコンクリートの間の圧縮には抵抗するが、引張とせん断には抵抗しない接触要素を挿入した。



【境界条件】CT鋼-接着系ボルト

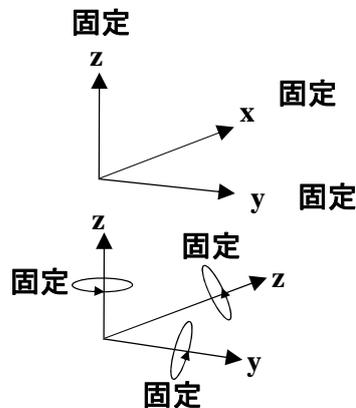
②CT鋼-接着系ボルト



CT鋼と接着系ボルトの接点には変位差や回転差が生じない

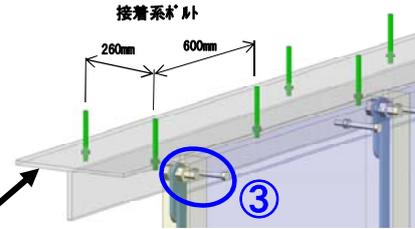
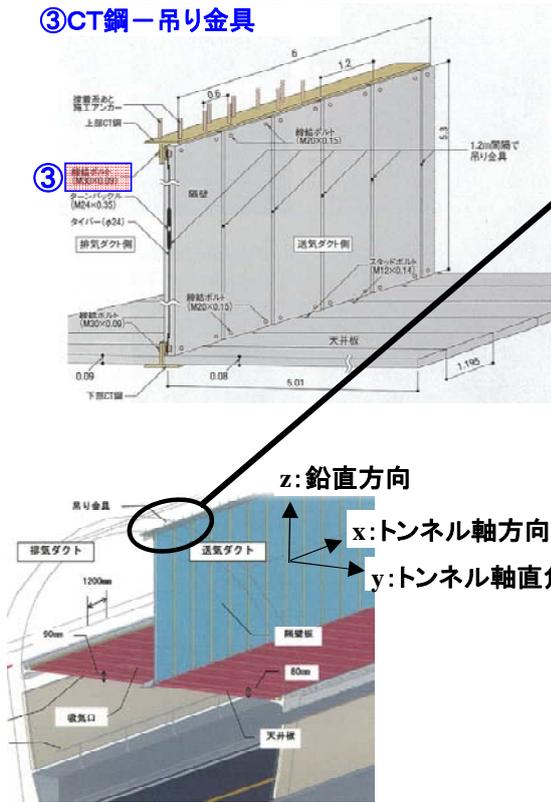
全方向の相対変位 \ast と相対角度 \ast を拘束

\ast 相対変位および相対角度とは、CT鋼と接着系ボルトの変位差、およびCT鋼と接着系ボルトのなす角を指す。



【境界条件】CT鋼—吊り金具

③CT鋼—吊り金具

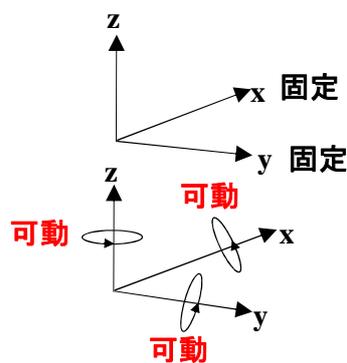


CT鋼と吊り金具の接合に使用されているターンバックルは、各方向に回転するが、CT鋼ウェブから吊り金具が離れることはない

全方向の相対変位※を拘束、相対角度※を解放

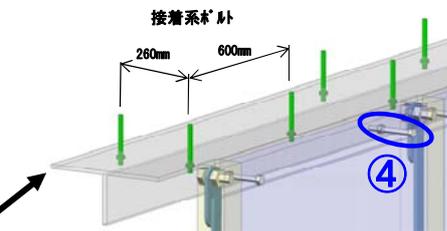
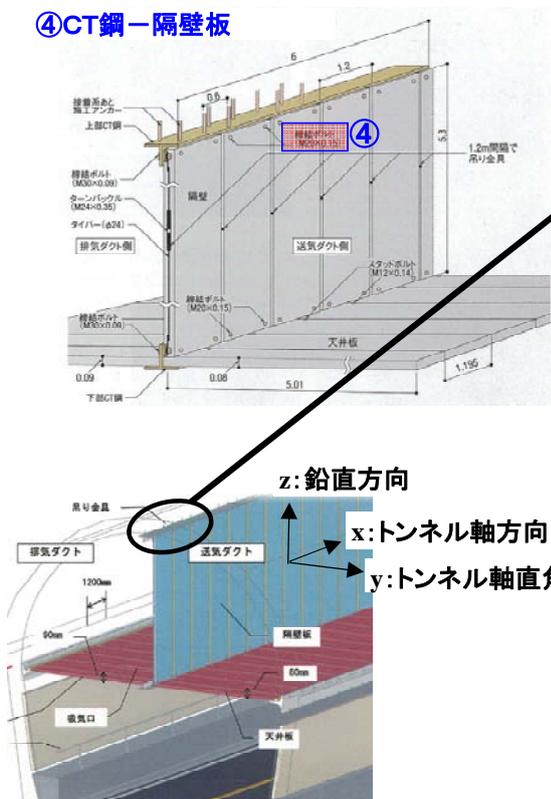
※相対変位および相対角度とは、CT鋼と吊り金具の変位差、およびCT鋼と吊り金具のなす角を指す。

固定



【境界条件】CT鋼—隔壁板（締結ボルト位置）

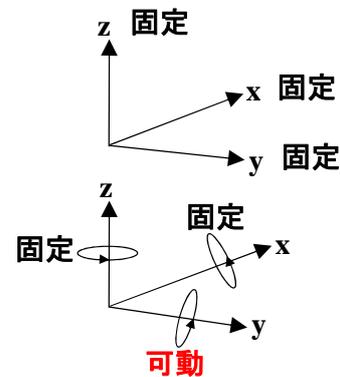
④CT鋼—隔壁板



隔壁板とCT鋼はボルト固定されており、変位差は生じない。ボルト軸方向の回転は許すが、その他の方向の回転差は生じない

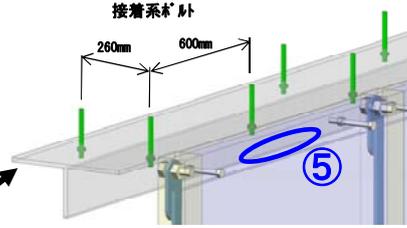
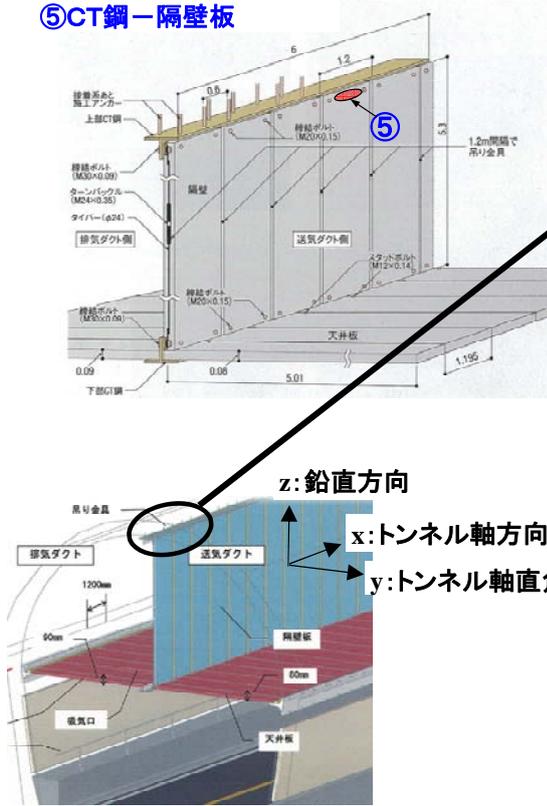
全方向の相対変位※を拘束、y方向の相対角度※を解放

※相対変位および相対角度とは、CT鋼と隔壁板の変位差、およびCT鋼と隔壁板のなす角を指す。



【境界条件】CT鋼-隔壁板（締結ボルト位置以外）

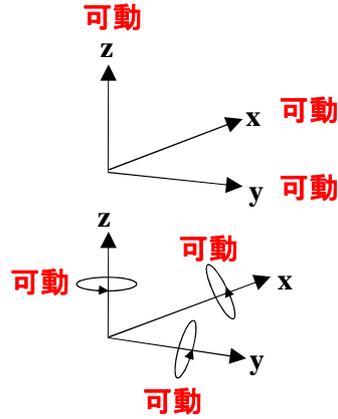
⑤CT鋼-隔壁板



締結ボルト位置以外の場所ではCT鋼と隔壁板が接合されていない

全方向の相対変位※と相対角度※を解放

※相対変位および相対角度とは、CT鋼と隔壁板の変位差、およびCT鋼と隔壁板のなす角を指す。



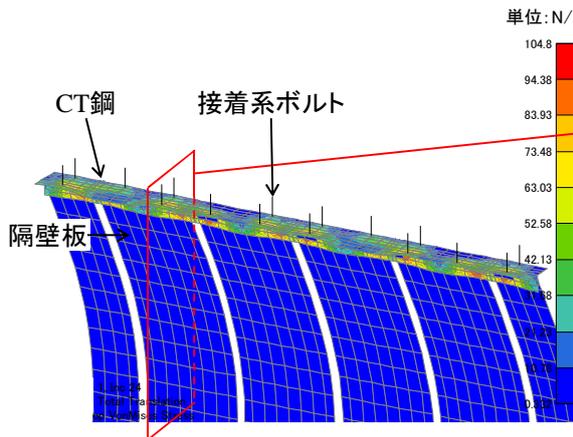
【境界条件】CT鋼と隔壁板の変形

実構造

CT鋼のウェブと隔壁板は、締結ボルト位置で接合されている

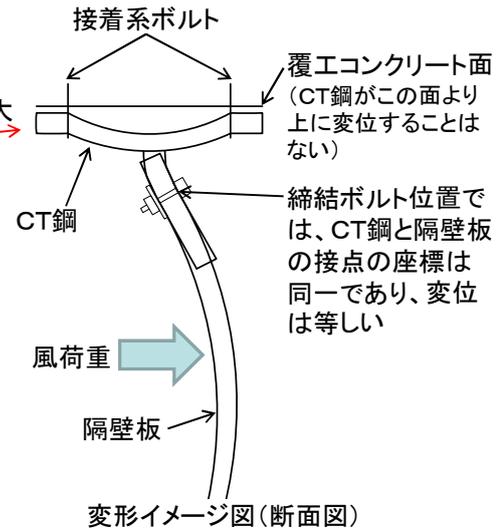
解析モデル

CT鋼のウェブと隔壁板の締結ボルト位置の変位が等しくなるように設定



変形図(変形倍率50倍鳥瞰図)

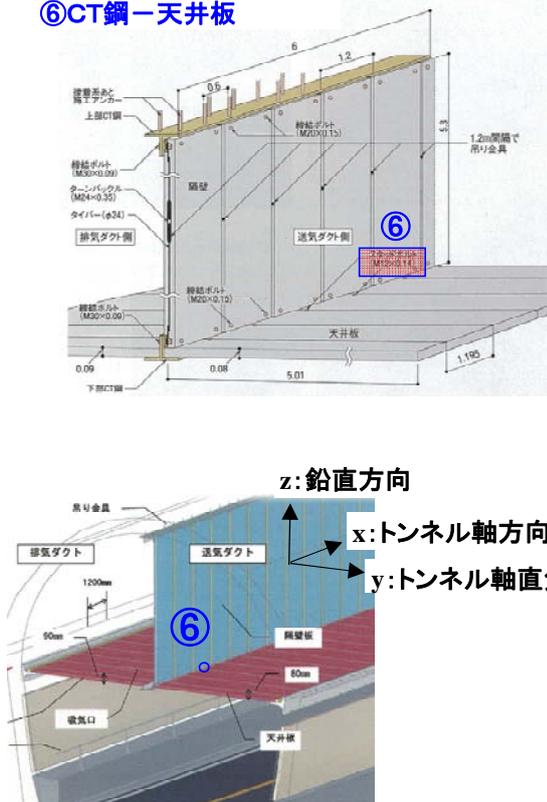
※変形状況が分かりやすいように、変形を強調している。



変形イメージ図(断面図)

【境界条件】CT鋼-天井板（スタッドボルト位置）

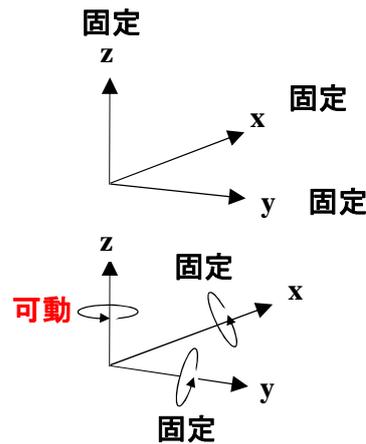
⑥CT鋼-天井板



スタッドの位置では、天井板が下部CT鋼フランジから離れることはない。
スタッドの軸方向の回転は許すが、その他の方向の回転は生じない

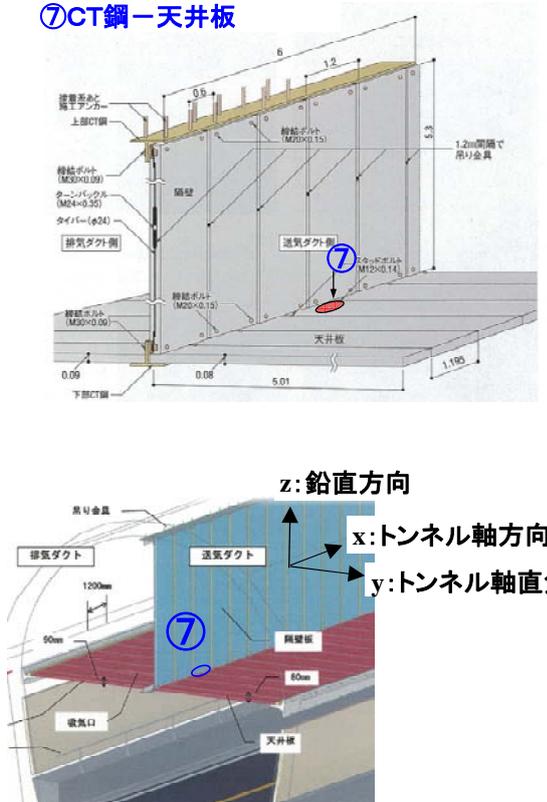
全方向の相対変位※を拘束、z方向の相対角度※を解放

※相対変位および相対角度とは、CT鋼と天井板の変位差、およびCT鋼と天井板のなす角を指す。



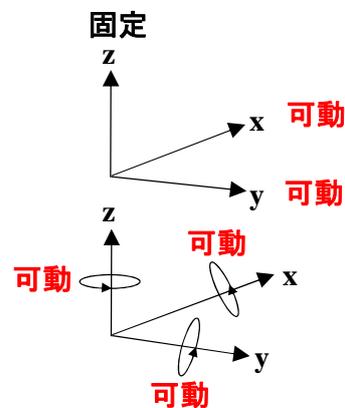
【境界条件】CT鋼-天井板（スタッドボルト位置以外）

⑦CT鋼-天井板



スタッド位置以外の場所ではCT鋼と天井板は接合されていないが、CT鋼のフランジによって天井板が支えられている。

鉛直方向の相対変位※を拘束し、
その他の相対変位と相対角度※を解放
※相対変位および相対角度とは、CT鋼と天井板の変位差、およびCT鋼と天井板のなす角を指す。



(4)ばね定数K1～K3の算出方法

接着系ボルトのモデル化に用いたばね要素のばね定数をパラメータとした解析では、K1、K2、K3 の3 ケースを実行した。各ケースにおけるばね定数を以下のように設定した。

1)K1の設定

数値計算上、接着系ボルト作用力を大きく評価することを目的に、有効数字 1 桁で $K1 = 1.00 \times 10^8$ [N/mm] (K2 の約 1,000 倍、K3 の約 10,000 倍) に設定

2)K2の設定

ボルト鋼材の寸法と弾性係数より算出

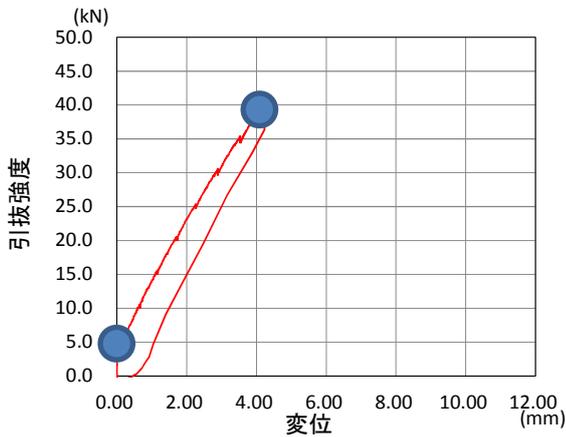
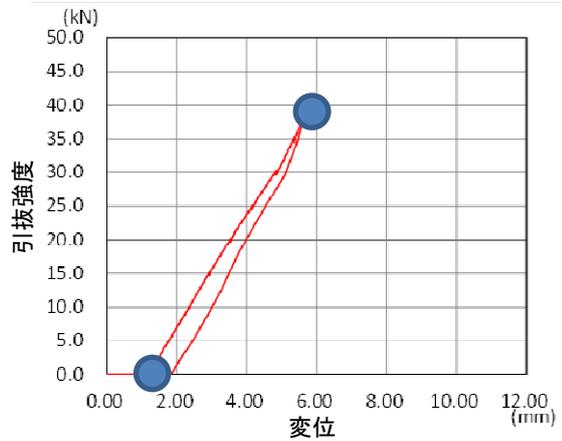
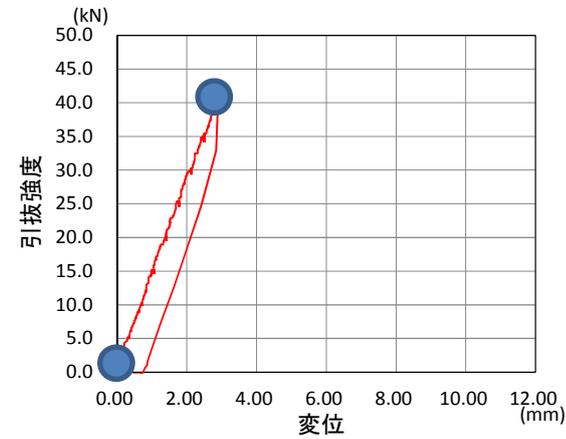
$$E \frac{x}{L} = \frac{Kx}{A}$$

$$\therefore K = \frac{EA}{L} = 2.00 \times 10^5 \times 156.7 \div 130 = 2.41 \times 10^5 \text{ [N/mm]}$$

項目	寸法
呼び径	M16
有効断面積 A	156.7mm ²
埋込み長 L	130mm
弾性係数 E	2.00 × 10 ⁵ N/mm ²

3)K3の設定

「3.6 天頂部接着系ボルトの引抜試験」における引抜試験結果から得られた引抜強度と変位から、M16 のばね定数を算出



直線的に変位していると仮定し、● 2点間の直線の傾きからばね定数を算出

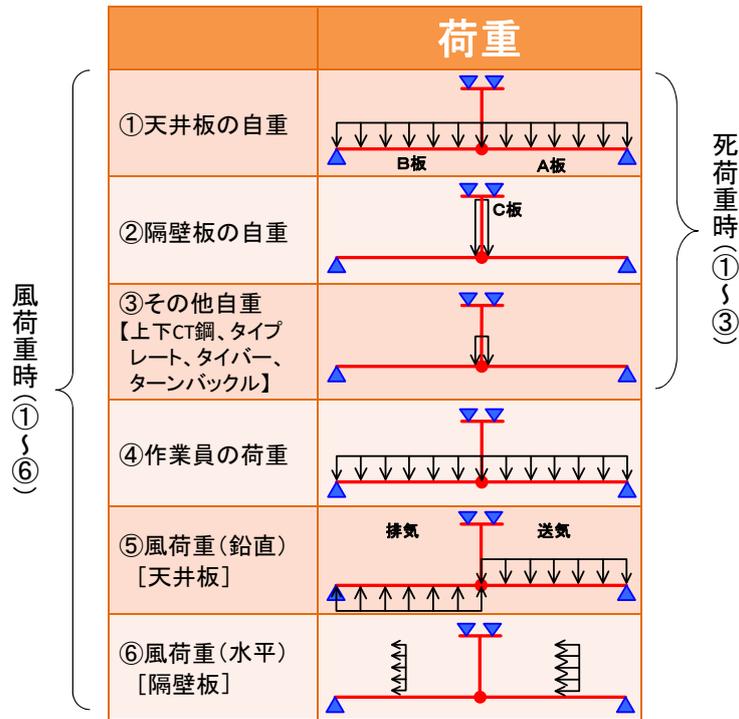
引抜試験にて引き抜けなかった接着系ボルトの見かけのばね定数は次頁に示す表のようになった。見かけ剛性を平均すると 1.42×10^4 [N/mm] となる。

試験体 NO	見かけ剛性 [N/mm]	引抜強度 [kN]
2	1.58E+04	40.2
4	1.52E+04	40.5
6	1.04E+04	40.3
7	6.90E+03	40.1
8	1.08E+04	40.1
9	9.08E+03	40.3
12	8.80E+03	40.0
13	7.14E+03	40.1
14	5.43E+03	40.2
16	7.35E+03	40.5
17	1.15E+04	40.0
18	1.92E+04	40.3
19	1.65E+04	41.6
22	9.87E+03	40.4
23	3.82E+04	40.5
25	1.40E+04	40.4
31	9.04E+03	40.5
35	1.11E+04	40.1
37	7.09E+03	40.1
46	1.15E+04	40.2
54	1.31E+04	40.0
55	2.55E+04	40.4
60	1.83E+04	40.4
75	1.19E+04	40.2
76	6.60E+03	40.2
77	2.14E+04	40.2
78	1.97E+04	40.4
83	1.16E+04	40.0
90	7.98E+03	40.4
94	1.41E+04	40.5
95	5.43E+03	40.4
103	1.15E+04	40.9
104	6.33E+03	40.0
108	1.61E+04	40.1
110	1.96E+04	40.1

試験体 NO	見かけ剛性 [N/mm]	引抜強度 [kN]
111	2.21E+04	40.2
113	6.90E+03	40.1
115	3.92E+04	40.1
117	2.26E+04	40.1
118	1.25E+04	40.2
119	7.63E+03	40.3
120	8.26E+03	40.2
121	5.23E+03	40.0
122	2.38E+04	40.3
123	1.31E+04	40.3
125	7.38E+03	40.1
127	2.02E+04	40.1
130	1.42E+04	40.4
131	1.10E+04	40.1
136	1.06E+04	40.1
140	1.01E+04	40.1
141	1.19E+04	40.0
146	8.50E+03	40.3
147	1.03E+04	40.3
149	1.34E+04	40.6
151	1.14E+04	40.4
152	2.38E+04	40.2
155	7.21E+03	40.5
160	3.25E+04	40.5
161	6.53E+03	40.2
162	8.80E+03	40.1
164	1.42E+04	40.2
165	1.63E+04	40.3
174	2.85E+04	40.3
175	1.38E+04	40.3
178	1.19E+04	40.0
179	1.09E+04	40.1
183	6.25E+04	40.2
185	1.16E+04	40.1

3.3.4.3 荷重の載荷方法

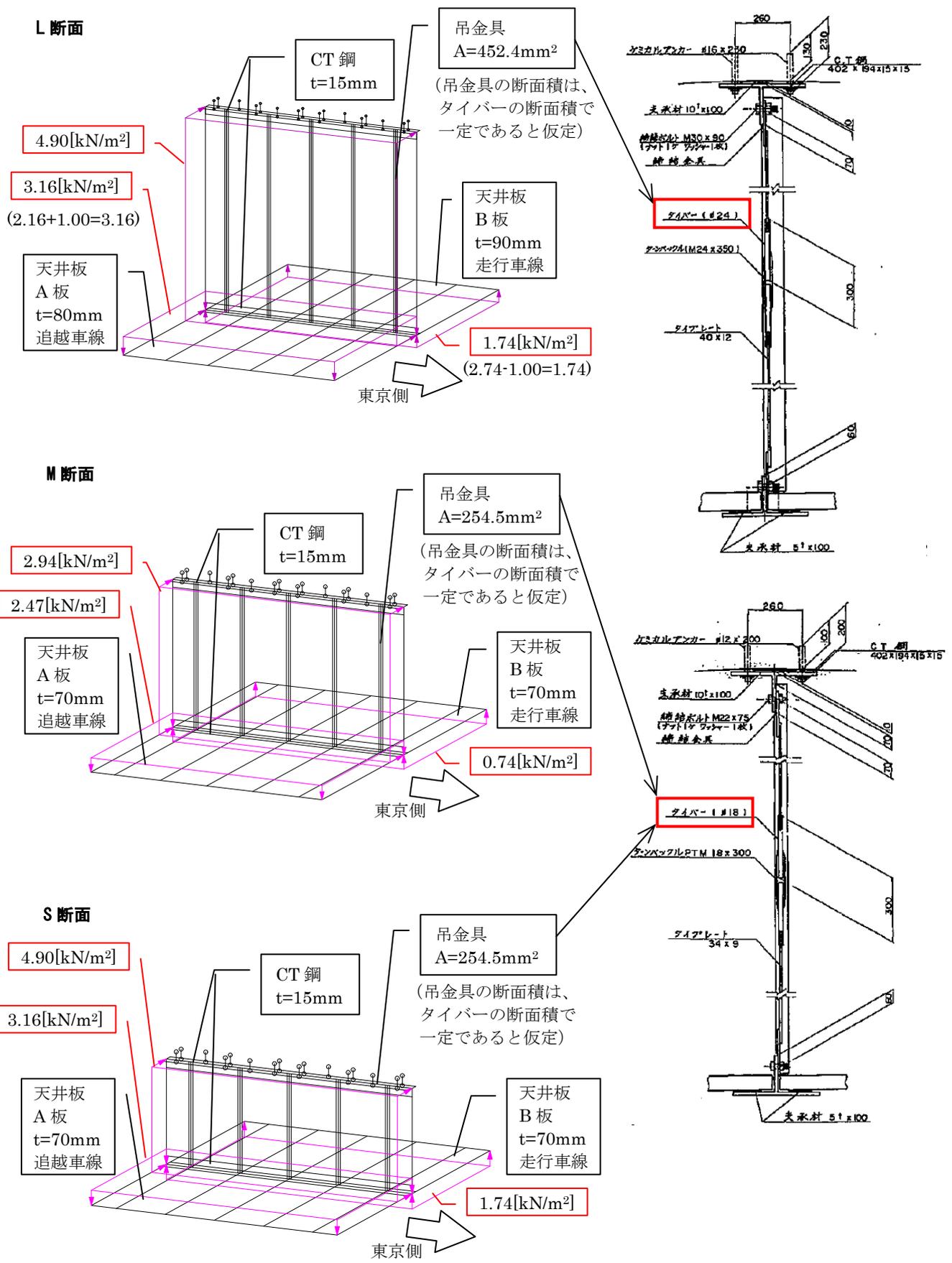
- ・ 死荷重時には、下図①②③の単位体積重量を与える。
- ・ 作業員の荷重として④の等分布荷重を載荷。
- ・ 風荷重は、天井板に⑤の鉛直方向等分布荷重を載荷するとともに隔壁板に水平方向の等分布荷重⑥を載荷。
- ・ 風荷重時には、下図①～⑥を載荷。



死荷重		(i)板厚[m]	(ii)長さ[m]	(iii)単位体積重量 ^{※1} [kN/m ³]	(iv)トンネル軸方向の 単位m当り重量[kN/m] (i)×(ii)×(iii)
①天井板の自重	A板	0.080	5.010	24.500	9.820
	B板	0.090	5.010	24.500	11.047
②隔壁板の自重	C板	0.100	5.300	24.500	12.985
③その他自重 ^{※2}	—	—	—	77.000	1.393
作業荷重		(i)作業荷重 [kN/m ²]	(ii)作用長さ [m]	(iii)トンネル軸方向の 単位m当り作業荷重[kN/m] (i)×(ii)	
④作業員の荷重	A板	1.000	5.010	5.010	
	B板	1.000	5.010	5.010	
風荷重		(i)風荷重 [kN/m ²]	(ii)作用長さ [m]	(iii)トンネル軸方向の 単位m当り風荷重[kN/m] (i)×(ii)	
⑤風荷重(鉛直) [天井板]	A板	2.160	5.010	10.822	
	B板	-2.740	5.010	-13.727	
⑥風荷重(水平) [隔壁板]	C板	4.900	5.300	25.970	

※1：死荷重の算出には、「道路橋示方書・同解説 I 共通編 平成 24 年 3 月 社団法人 日本道路協会」に示されている鉄筋コンクリートと鋼の単位体積重量を用いた。

※2：「③その他自重」では、次ページの図に示す CT 鋼の板厚と吊金具の断面積を用いて、上下 CT 鋼、タイプレート、タイバー、ターンバックルの重量を積み上げた。



3.3.4.4 死荷重の影響解析

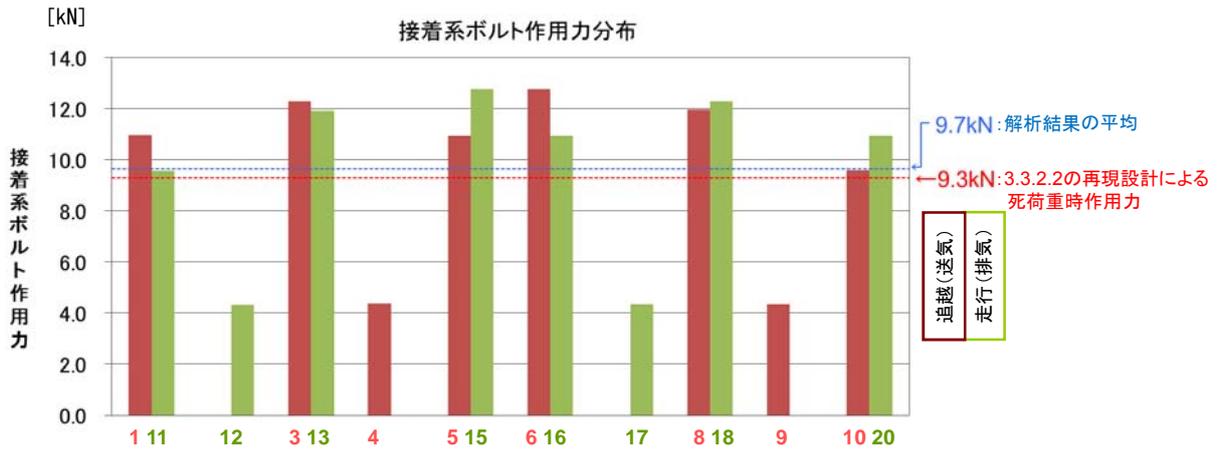
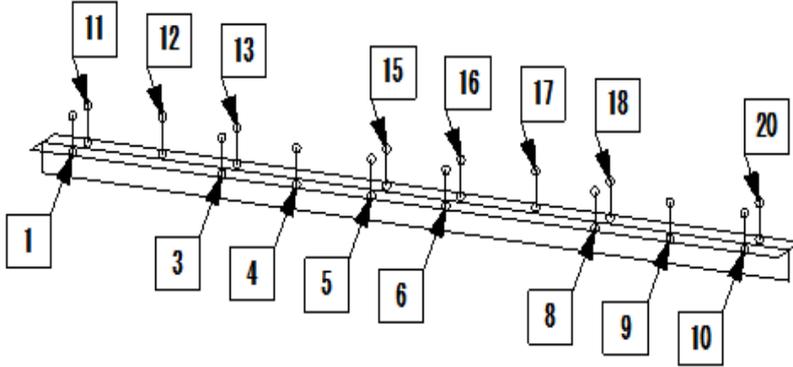
(1)検討ケース

ケース No	1-1-1	1-1-2	1-1-3	1-2	1-3	2-1-1	2-1-2	2-1-3	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	
ケース	死荷重の影響解析					風荷重(鉛直+水平)の影響解析					接着系ボルトが対称配置であった場合の解析						
接着系ボルト本数	16本											20本					
荷重の組合せ	死荷重時 (①~③)					風荷重時 (①~⑥)					死荷重時 (①~③)			風荷重時 (①~⑥)			
ダクト断面	L断面	L断面	L断面	M断面	S断面	L断面	L断面	L断面	M断面	S断面	L断面	M断面	S断面	L断面	M断面	S断面	
接着系ボルトのばね定数※	K1	K2	K3	K1			K2	K3	K1								

: 本節の検討範囲

(2)解析結果[1]

1)ケース 1-1-1(L断面)接着系ボルト作用力 (K1=1.00×10⁸ [N/mm])

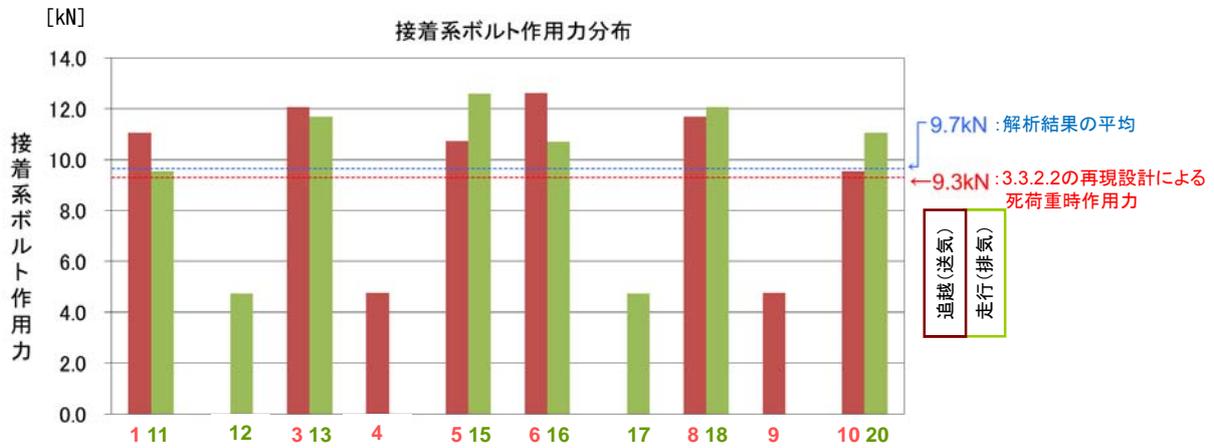
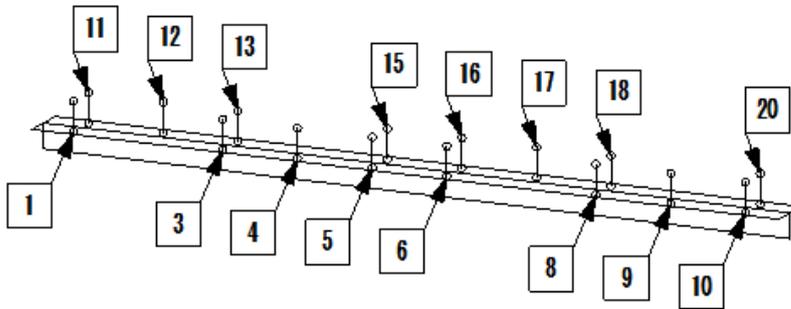


接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	10.97	4.76	11	9.58	5.45
-	-	-	12	4.33	12.06
3	12.33	4.24	13	11.95	4.37
4	4.37	11.95	-	-	-
5	10.96	4.76	15	12.76	4.09
6	12.78	4.09	16	10.94	4.77
-	-	-	17	4.34	12.03
8	11.97	4.36	18	12.30	4.24
9	4.35	12.01	-	-	-
10	9.60	5.44	20	10.95	4.77

は、反対側にボルトがない位置

2) ケース 1-1-2(L断面) 接着系ボルト作用力 ($K_2=2.41 \times 10^5$ [N/mm])

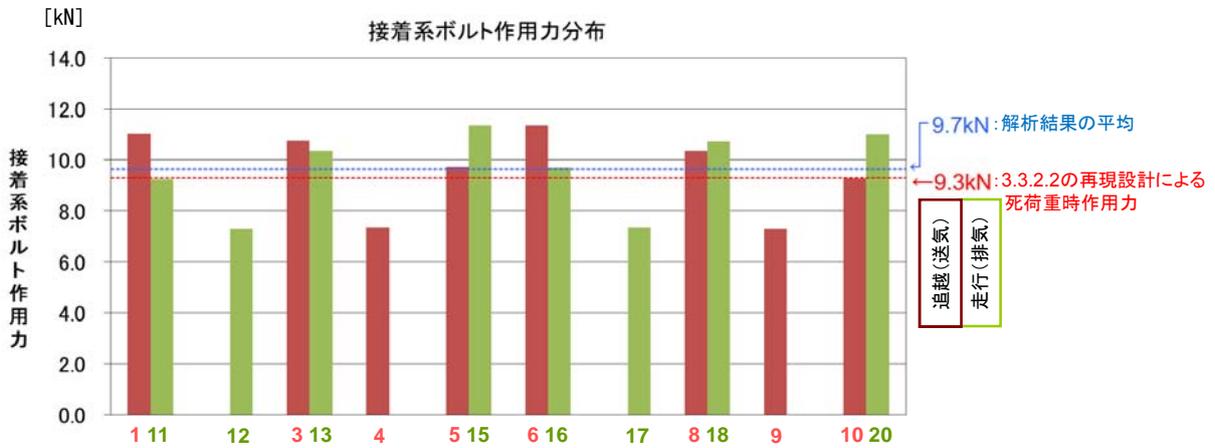
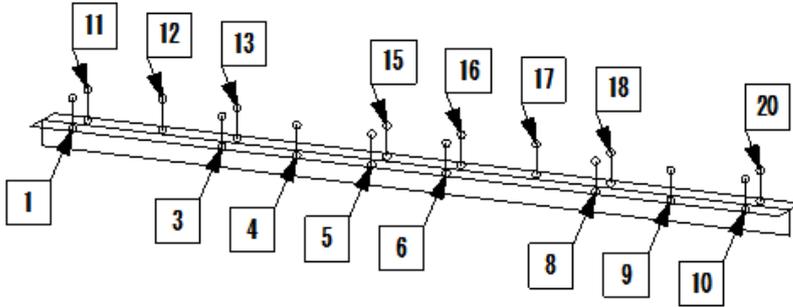


接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	11.07	4.72	11	9.53	5.48
-	-	-	12	4.75	10.99
3	12.08	4.32	13	11.69	4.47
4	4.77	10.94	-	-	-
5	10.73	4.86	15	12.60	4.14
6	12.62	4.14	16	10.72	4.87
-	-	-	17	4.74	11.00
8	11.70	4.46	18	12.06	4.33
9	4.77	10.94	-	-	-
10	9.55	5.47	20	11.06	4.72

は、反対側にボルトがない位置

3) ケース 1-1-3(L断面) 接着系ボルト作用力($K3=1.42 \times 10^4$ [N/mm])



接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	11.03	4.73	11	9.26	5.64
-	-	-	12	7.30	7.16
3	10.77	4.85	13	10.36	5.04
4	7.37	7.08	-	-	-
5	9.72	5.37	15	11.35	4.60
6	11.36	4.60	16	9.71	5.38
-	-	-	17	7.35	7.10
8	10.38	5.03	18	10.75	4.85
9	7.31	7.14	-	-	-
10	9.27	5.63	20	11.01	4.74

は、反対側にボルトがない位置

(3)解析結果[2]

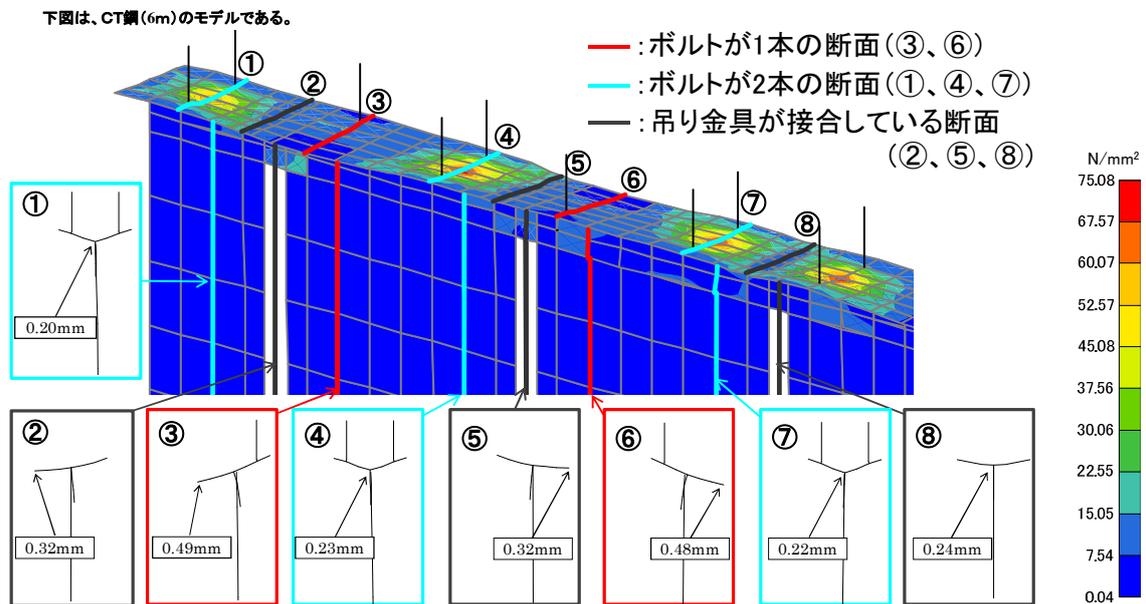
1)ケース 1-1-1(L断面)CT鋼の変形 (K1=1.00×10⁸ [N/mm])

<接着系ボルト作用力分布について>

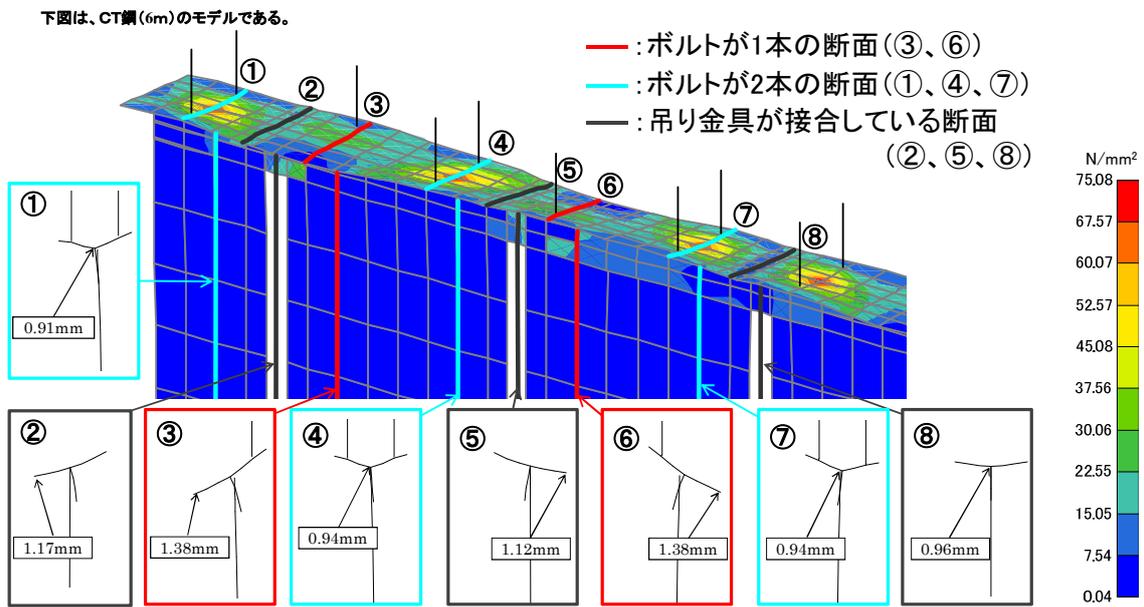
変形を強調 (変形倍率 50 倍) した変形図に Von Mises 応力 (※) コンターを重ねた図

※Von Mises 応力 (σ_{VM}) : 三主応力を次式に代入したスカラー値でCT鋼フランジの上面、隔壁板の表面における応力

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}}$$



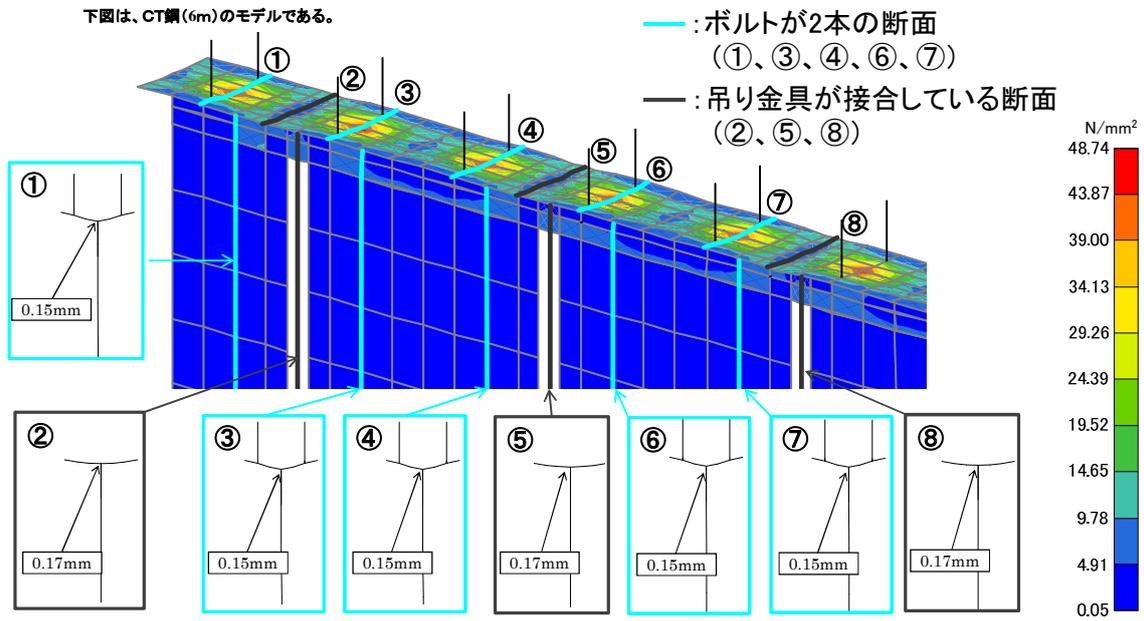
2)(L断面)CT鋼の変形 ($K3=1.42 \times 10^4$ [N/mm])



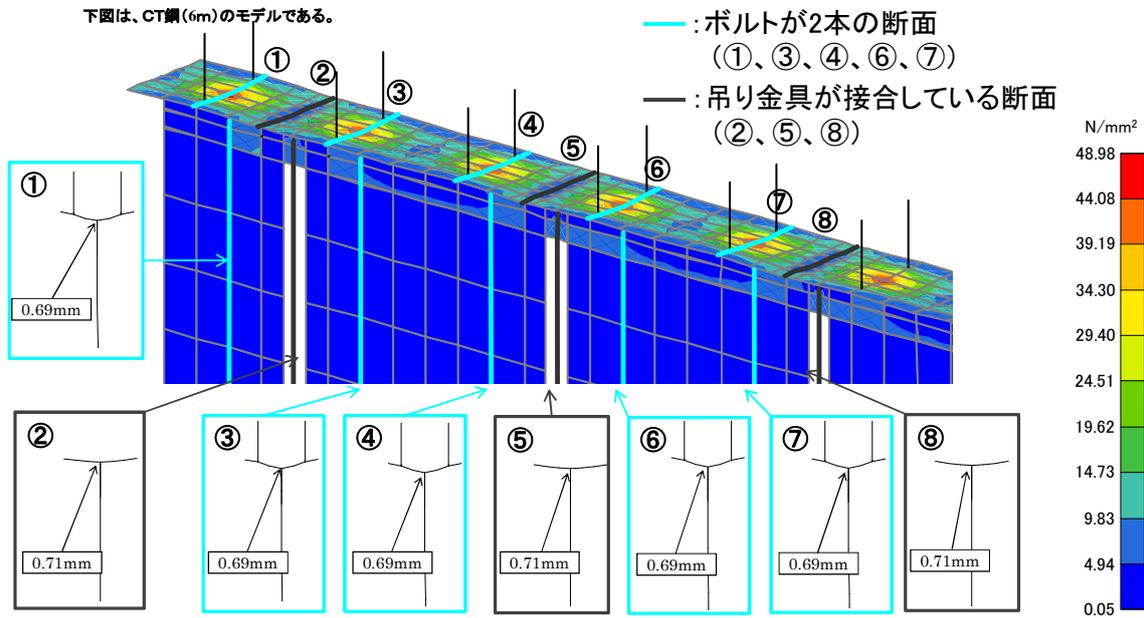
【参考 20本ボルト対称配置の場合】

< L断面 CT鋼の変形 ($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm]) >

変形を強調（変形倍率50倍）した変形図に Von Mises 応力コンターを重ねた図



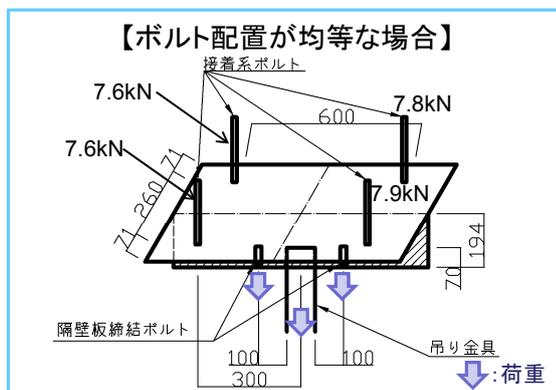
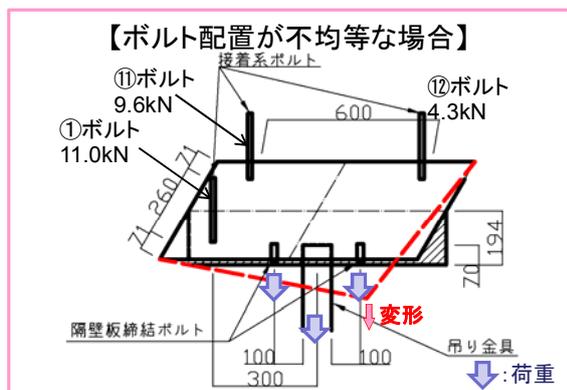
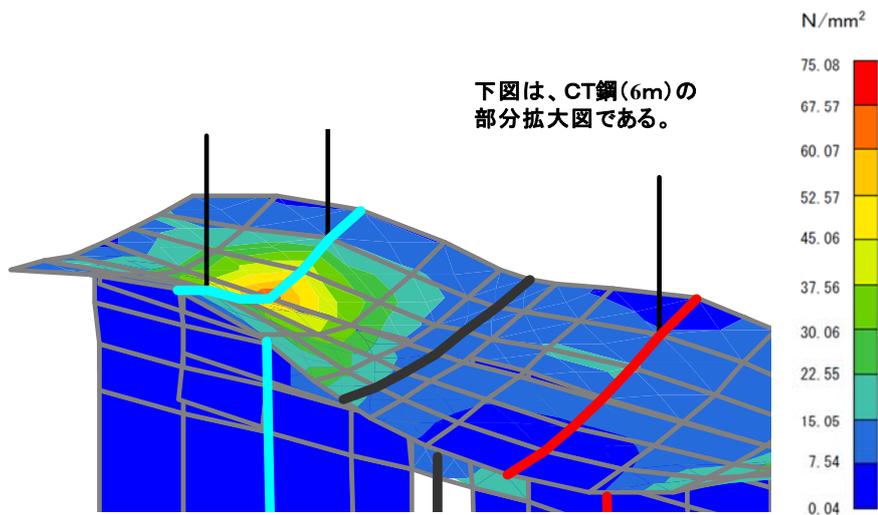
< L断面 CT鋼の変形 ($K3=1.00 \times 10^8$ [N/mm]) >



<接着系ボルト作用力分布について>

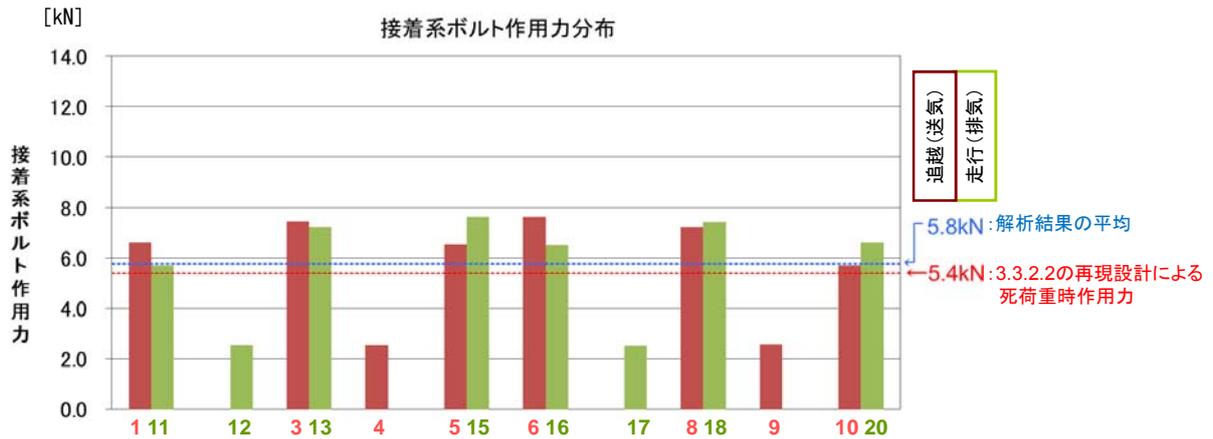
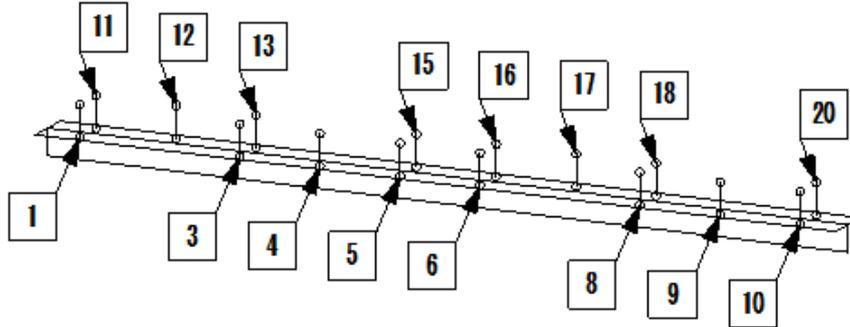
ボルト配置の不均衡により、中央に死荷重を載荷すると下図のように変形し、①及び①のボルト方向に力が流れ、⑫ボルトの作用力が小さくなる。

ケース 1-1-1 (L 断面) CT 鋼の変形拡大図 (変形倍率 200 倍)
($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm])



(4)解析結果[3]

1)ケース1-2(M断面)接着系ボルト作用力 (K1=1.00×10⁸[N/mm])

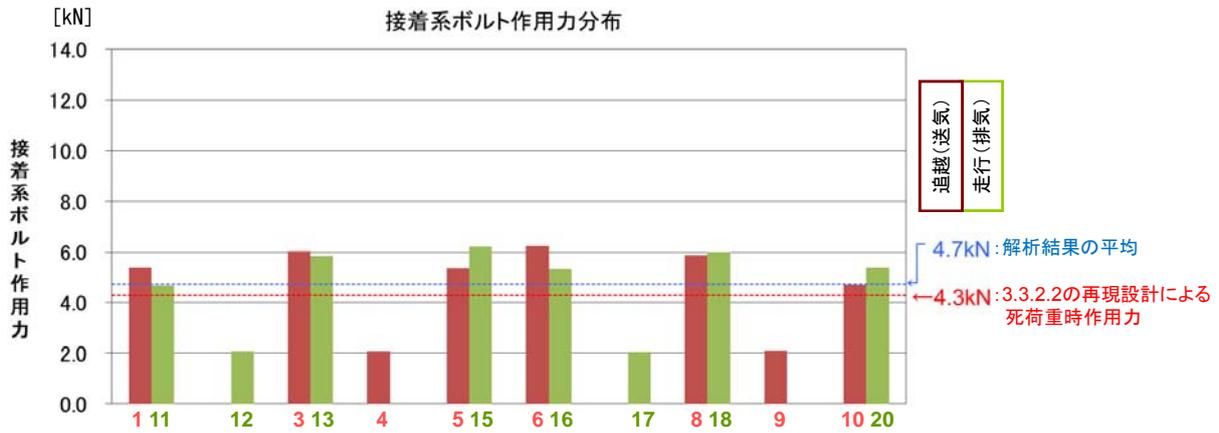
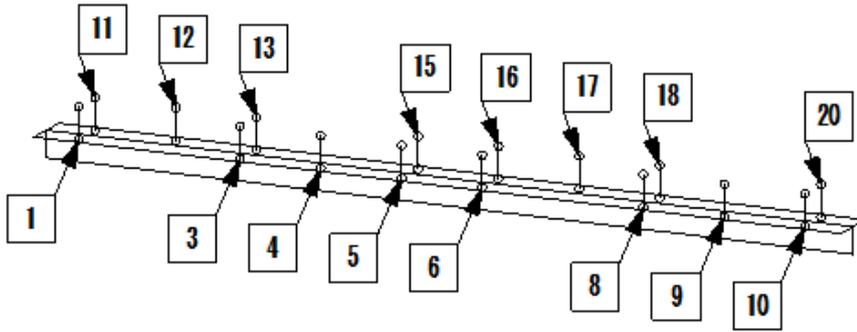


接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	6.62	7.88	11	5.71	9.15
-	-	-	12	2.56	20.40
3	7.43	7.02	13	7.23	7.22
4	2.54	20.58	-	-	-
5	6.53	8.00	15	7.63	6.85
6	7.63	6.84	16	6.52	8.01
-	-	-	17	2.53	20.67
8	7.23	7.22	18	7.43	7.03
9	2.57	20.32	-	-	-
10	5.71	9.14	20	6.62	7.89

■は、反対側にボルトがない位置

2) ケース1-3(S断面)接着系ボルト作用力 ($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm])



接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	5.40	9.67	11	4.66	11.20
-	-	-	12	2.08	25.12
3	6.03	8.66	13	5.84	8.94
4	2.09	25.02	-	-	-
5	5.36	9.74	15	6.22	8.39
6	6.25	8.35	16	5.34	9.78
-	-	-	17	2.05	25.43
8	5.86	8.90	18	6.00	8.70
9	2.11	24.75	-	-	-
10	4.68	11.15	20	5.38	9.71

は、反対側にボルトがない位置

(5)死荷重の影響解析のまとめ

接着系ボルト1本あたり作用力に関する解析値と再現設計値の比較(ばね定数をK1とし、断面別に整理)

位置	解析値/設計値			位置	解析値/設計値		
	L	M	S		L	M	S
1	1.18	1.23	1.26	11	1.03	1.06	1.08
-	-	-	-	12	0.47	0.47	0.48
3	1.33	1.38	1.40	13	1.28	1.34	1.36
4	0.47	0.47	0.49	-	-	-	-
5	1.18	1.21	1.25	15	1.37	1.41	1.45
6	1.37	1.41	1.45	16	1.18	1.21	1.24
-	-	-	-	17	0.47	0.47	0.48
8	1.29	1.34	1.36	18	1.32	1.38	1.40
9	0.47	0.48	0.49	-	-	-	-
10	1.03	1.06	1.09	20	1.18	1.23	1.25

接着系ボルト1本あたり作用力に関する解析値と再現設計値の比較(L断面を対象とし、ばね定数別に整理)

位置	解析値/設計値			位置	解析値/設計値		
	K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	1.18	1.19	1.19	11	1.03	1.03	1.00
-	-	-	-	12	0.47	0.51	0.78
3	1.33	1.30	1.16	13	1.28	1.26	1.11
4	0.47	0.51	0.79	-	-	-	-
5	1.18	1.15	1.05	15	1.37	1.36	1.22
6	1.37	1.36	1.22	16	1.18	1.15	1.04
-	-	-	-	17	0.47	0.51	0.79
8	1.29	1.26	1.12	18	1.32	1.30	1.16
9	0.47	0.51	0.79	-	-	-	-
10	1.03	1.03	1.00	20	1.18	1.19	1.18

は、反対側にボルトがない位置

- ・K1=1.00×10⁹[N/mm]、K2=2.41×10⁵[N/mm]、K3=1.42×10⁴[N/mm]
- ・3.3.2.2の再現設計による死荷重時作用力:9.3kN(L断面)、5.4kN(M断面)、4.3kN(S断面)

接着系ボルト1本あたりの引抜強度の計算値と接着系ボルト1本あたりのボルト作用力の解析値の比較(ばね定数をK1とし、断面別に整理)

位置	引抜強度/解析値			位置	引抜強度/解析値		
	L	M	S		L	M	S
1	4.76	7.88	9.67	11	5.45	9.15	11.20
-	-	-	-	12	12.06	20.40	25.12
3	4.24	7.02	8.66	13	4.37	7.22	8.94
4	11.95	20.58	25.02	-	-	-	-
5	4.76	8.00	9.74	15	4.09	6.85	8.39
6	4.09	6.84	8.35	16	4.77	8.01	9.78
-	-	-	-	17	12.03	20.67	25.43
8	4.36	7.22	8.90	18	4.24	7.03	8.70
9	12.01	20.32	24.75	-	-	-	-
10	5.44	9.14	11.15	20	4.77	7.89	9.71

接着系ボルト1本あたりの引抜強度の計算値と接着系ボルト1本あたりのボルト作用力の解析値の比較(L断面を対象とし、ばね定数別に整理)

位置	引抜強度/解析値			位置	引抜強度/解析値		
	K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	4.76	4.72	4.73	11	5.45	5.48	5.64
-	-	-	-	12	12.06	10.99	7.16
3	4.24	4.32	4.85	13	4.37	4.47	5.04
4	11.95	10.94	7.08	-	-	-	-
5	4.76	4.86	5.37	15	4.09	4.14	4.60
6	4.09	4.14	4.60	16	4.77	4.87	5.38
-	-	-	-	17	12.03	11.00	7.10
8	4.36	4.46	5.03	18	4.24	4.33	4.85
9	12.01	10.94	7.14	-	-	-	-
10	5.44	5.47	5.63	20	4.77	4.72	4.74

は、反対側にボルトがない位置

- ・接着系ボルト引抜強度:52.2kN/本

3.3.4.5 風荷重(鉛直+水平)の影響解析

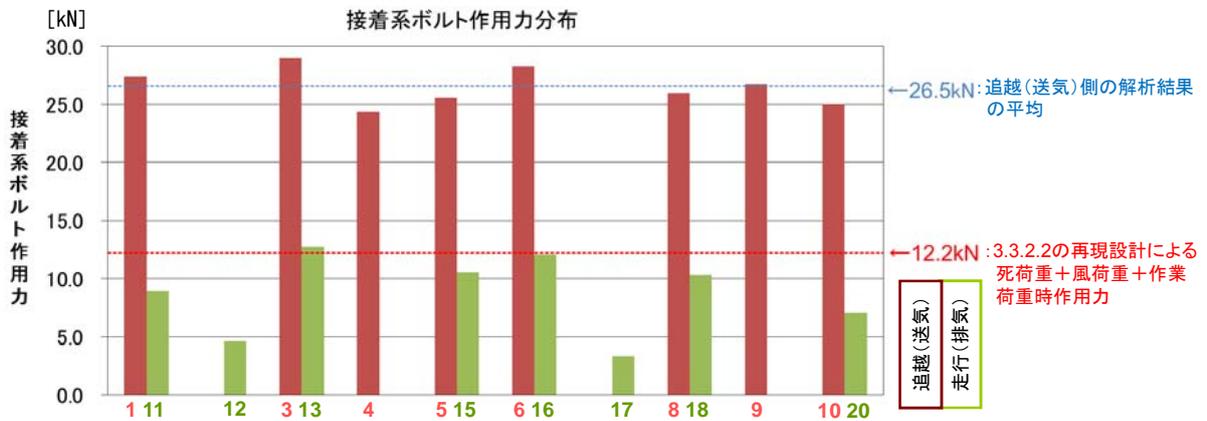
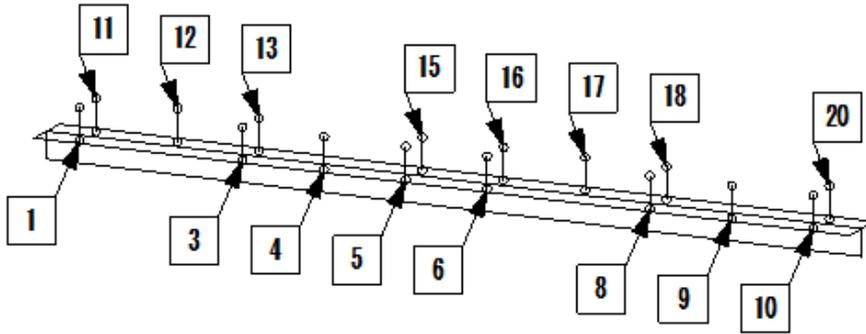
(1)検討ケース

ケース No	1-1-1	1-1-2	1-1-3	1-2	1-3	2-1-1	2-1-2	2-1-3	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	
ケース	死荷重の影響解析					風荷重(鉛直+水平)の影響解析					接着系ボルトが対称配置であった場合の解析						
接着系ボルト本数	15本											20本					
荷重の組合せ	死荷重時 (①~③)					風荷重時 (①~⑥)					死荷重時 (①~③)			風荷重時 (①~⑥)			
ダクト断面	L断面	L断面	L断面	M断面	S断面	L断面	L断面	L断面	M断面	S断面	L断面	M断面	S断面	L断面	M断面	S断面	
接着系ボルトのばね定数※	K1	K2	K3	K1			K2	K3			K1						

: 本節の検討範囲

(2)解析結果[1]

1)ケース2-1-1(L断面)接着系ボルト作用力 (K1=1.00×10⁸ [N/mm])

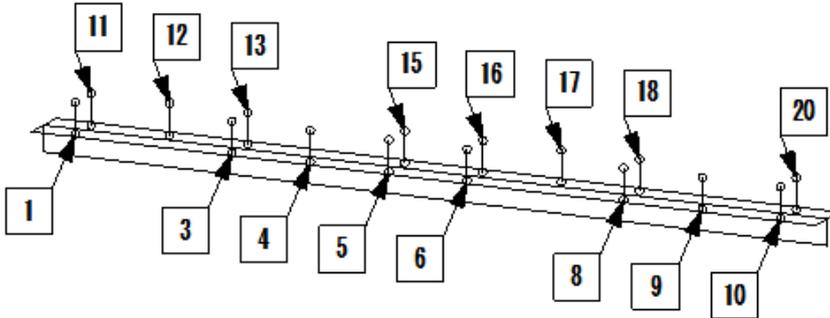


接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	27.41	1.90	11	8.98	5.81
-	-	-	12	4.60	11.35
3	29.01	1.80	13	12.72	4.10
4	24.37	2.14	-	-	-
5	25.57	2.04	15	10.59	4.93
6	28.27	1.85	16	12.10	4.31
-	-	-	17	3.32	15.72
8	25.96	2.01	18	10.33	5.05
9	26.72	1.95	-	-	-
10	25.00	2.09	20	7.10	7.35

は、反対側にボルトがない位置

2)ケース2-1-2(L断面)接着系ボルト作用力 ($K_2=2.41 \times 10^5$ [N/mm])

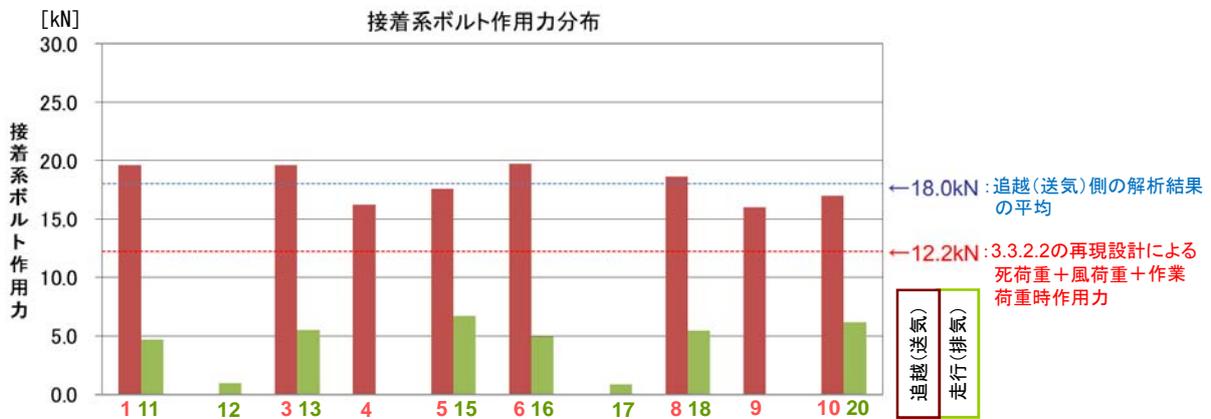
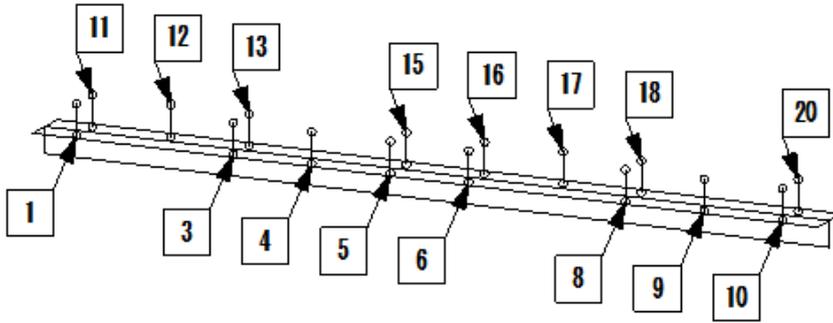


接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) /作用力(b)
1	22.96	2.27	11	6.59	7.92
-	-	-	12	2.37	21.99
3	25.33	2.06	13	7.96	6.56
4	22.20	2.35	-	-	-
5	22.83	2.29	15	7.10	7.35
6	24.67	2.12	16	7.52	6.94
-	-	-	17	2.01	26.00
8	23.13	2.26	18	6.83	7.64
9	21.96	2.38	-	-	-
10	21.40	2.44	20	5.61	9.31

は、反対側にボルトがない位置

3) ケース2-1-3(L断面)接着系ボルト作用力 ($K3=1.42 \times 10^4$ [N/mm])



接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	19.56	2.67	11	4.70	11.11
-	-	-	12	0.98	53.28
3	19.59	2.66	13	5.48	9.53
4	16.20	3.22	-	-	-
5	17.57	2.97	15	6.67	7.83
6	19.70	2.65	16	4.97	10.51
-	-	-	17	0.88	59.06
8	18.64	2.80	18	5.43	9.62
9	16.01	3.26	-	-	-
10	16.93	3.08	20	6.19	8.43

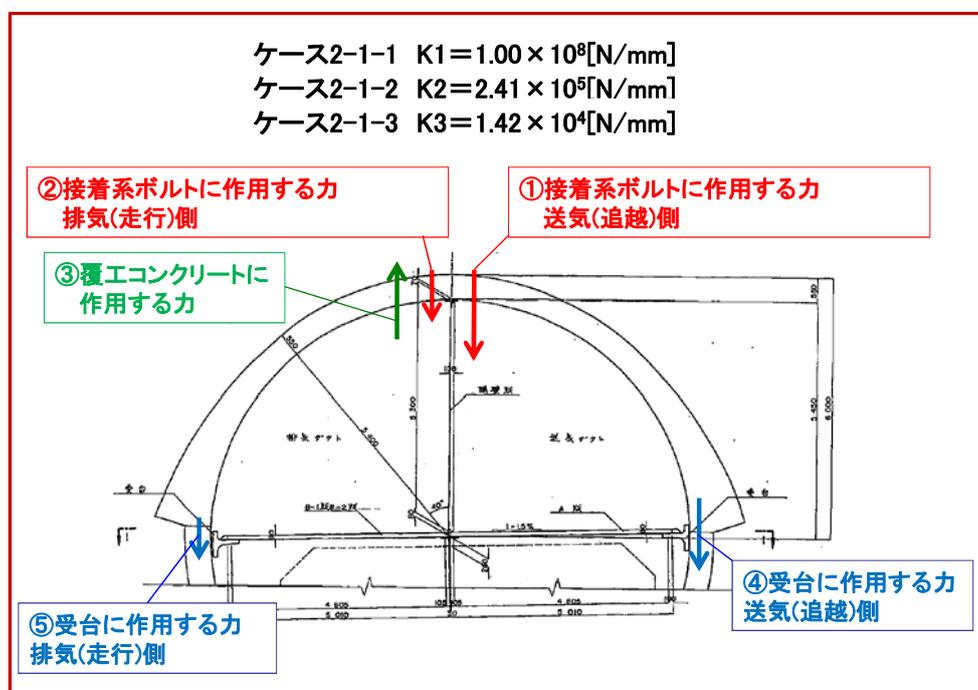
は、反対側にボルトがない位置

<ケース 2-1-1~2-1-3 の解析で接着系ボルトの作用力合計が異なる理由>

風荷重時に CT 鋼+隔壁板+天井板で構成される構造物が受台、接着系ボルト、及び覆工コンクリートから受ける作用力の分布を下表に示す。表中の数値は解析モデルにおいて支点としている節点の作用力を、受台、接着系ボルト、及び覆工コンクリートごとに合計した値である。

作用力を集計した結果から、以下のことが分かった。

- ・ばね定数が K1 または K2 の時には、死荷重分による CT 鋼の鉛直下向きの変位量が小さいため、これに水平方向の風荷重の影響を考慮したとき、CT 鋼と覆工コンクリートが接触し、覆工コンクリートに上向きの作用力が発生する。
- ・一方、ばね定数が K3 の時には、死荷重分による CT 鋼の鉛直下向きの変位量が相対的に大きく、水平方向の風荷重の影響を考慮してもなお、CT 鋼と覆工コンクリートが接触せず、覆工コンクリートに上向きの作用力が発生しない。
- ・ばね定数が高いほど、CT 鋼と覆工コンクリートの接触面における作用力が大きくなる。

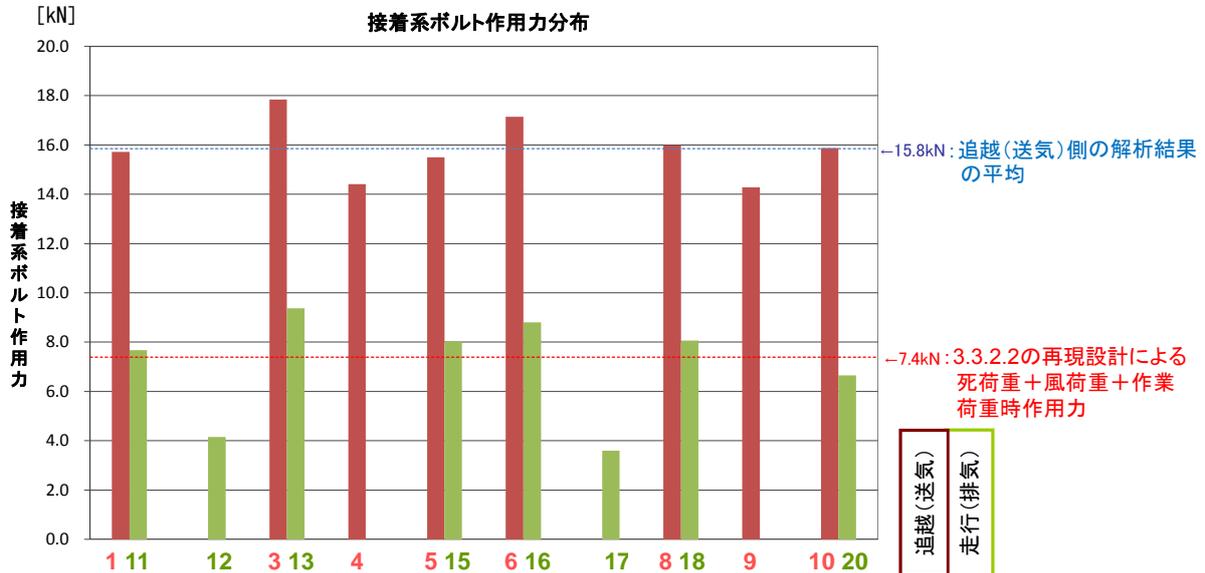
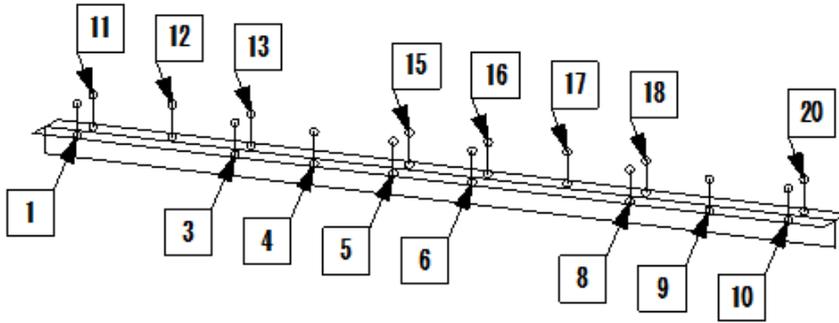


CT 鋼 1 スパン (6m) 分の作用力合計 (作用力は下向きを正とする)

作用力 (kN)		ばね定数		
		K 1	K 2	K 3
接着系ボルト作用力	①送気(追越)側	212.3	184.5	144.2
	②排気(走行)側	69.7	46.0	35.3
	小計	282.0	230.5	179.5
覆工コンクリート作用力③		-102.2	-50.7	0.0
受台作用力	④送気(追越)側	68.8	68.8	68.9
	⑤排気(走行)側	1.5	1.5	1.7
作用力合計		250.1	250.1	250.1

(3)解析結果[2]

1)ケース2-2(M断面)接着系ボルト作用力 (K1=1.00×10⁸ [N/mm])

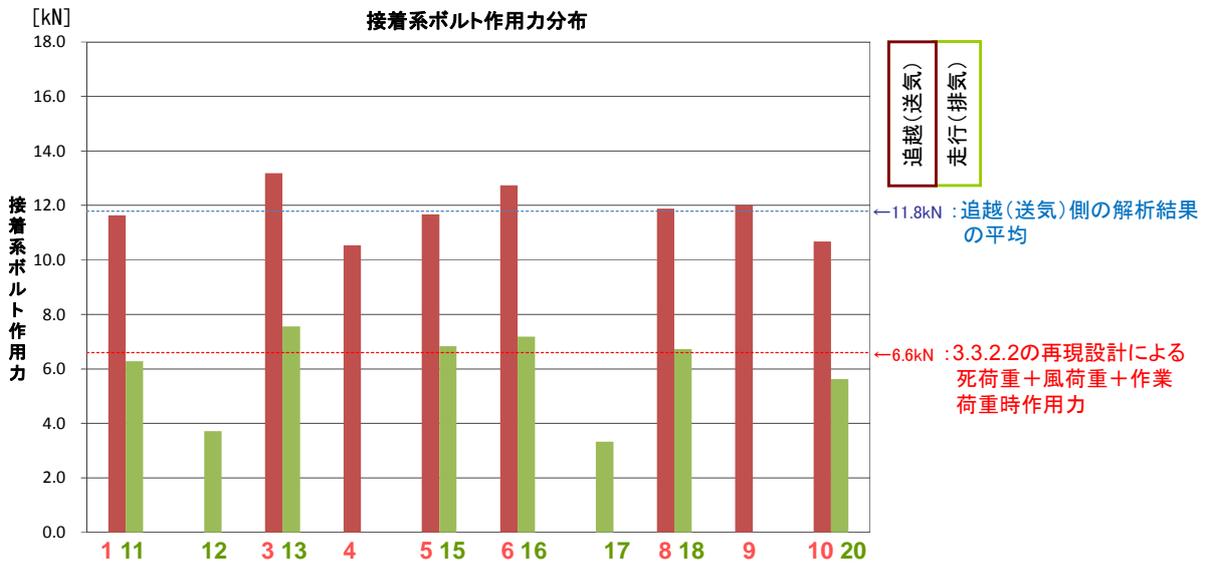
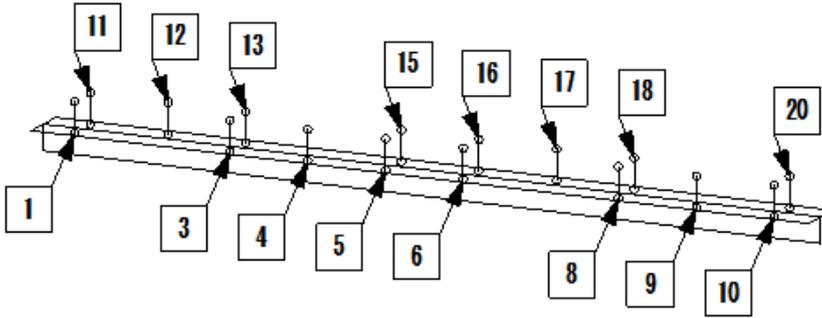


接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) /作用力(b)
1	15.72	3.32	11	7.68	6.80
-	-	-	12	4.16	12.55
3	17.84	2.93	13	9.37	5.57
4	14.41	3.62	-	-	-
5	15.50	3.37	15	8.03	6.50
6	17.14	3.05	16	8.80	5.94
-	-	-	17	3.60	14.48
8	15.99	3.26	18	8.06	6.48
9	14.28	3.65	-	-	-
10	15.87	3.29	20	6.66	7.84

は、反対側にボルトがない位置

2) ケース2-3 (S断面) 接着系ボルト作用力 ($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm])



接着系ボルト引抜強度(a): 52.2kN/本

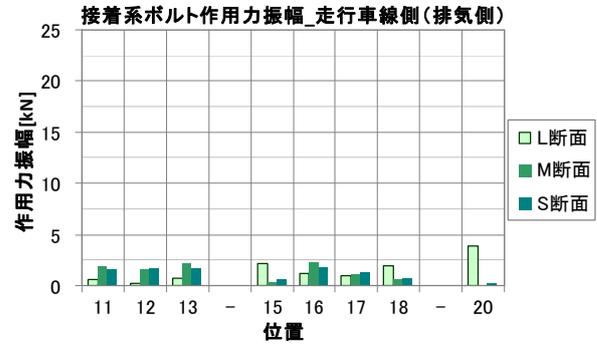
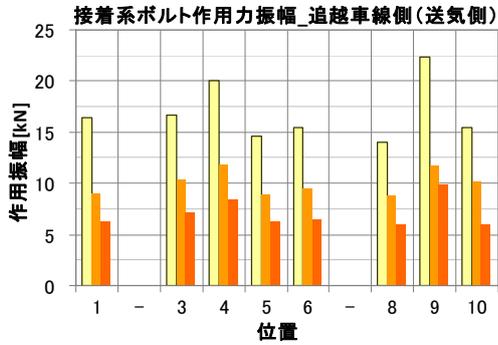
追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)
1	11.64	4.49	11	6.28	8.31
-	-	-	12	3.72	14.03
3	13.18	3.96	13	7.56	6.91
4	10.53	4.96	-	-	-
5	11.67	4.47	15	6.83	7.65
6	12.74	4.10	16	7.18	7.27
-	-	-	17	3.33	15.69
8	11.88	4.39	18	6.72	7.76
9	12.01	4.35	-	-	-
10	10.67	4.89	20	5.63	9.27

は、反対側にボルトがない位置

(4)断面別の接着系ボルト作用力の振幅

接着系ボルト作用力の風荷重時と死荷重時の差(「振幅」と呼ぶ)に着目して、L、M、S断面による比較を行った。

※接着系ボルトのばね定数は $K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm]



単位 : kN

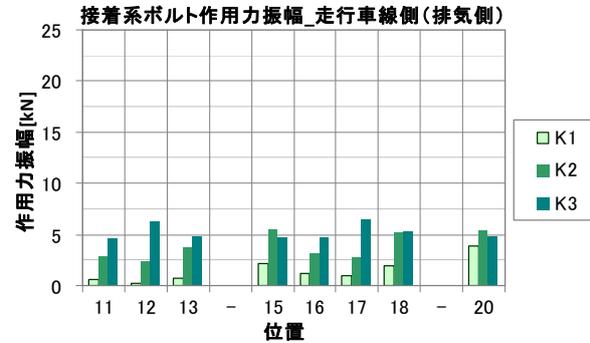
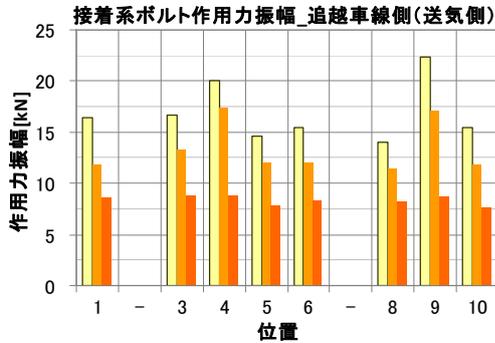
位置	L断面			M断面			S断面		
	死荷重時	風荷重時	振幅	死荷重時	風荷重時	振幅	死荷重時	風荷重時	振幅
1	10.97	27.41	16.44	6.62	15.72	9.10	5.40	11.64	6.24
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	12.33	29.01	16.69	7.43	17.84	10.41	6.03	13.18	7.15
4	4.37	24.37	20.00	2.54	14.41	11.87	2.09	10.53	8.44
5	10.96	25.57	14.61	6.53	15.50	8.97	5.36	11.67	6.31
6	12.78	28.27	15.49	7.63	17.14	9.51	6.25	12.74	6.49
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	11.97	25.96	13.99	7.23	15.99	8.76	5.86	11.88	6.02
9	4.35	26.72	22.37	2.57	14.28	11.71	2.11	12.01	9.90
10	9.60	25.00	15.41	5.71	15.87	10.16	4.68	10.67	5.99

位置	L断面			M断面			S断面		
	死荷重時	風荷重時	振幅	死荷重時	風荷重時	振幅	死荷重時	風荷重時	振幅
11	9.58	8.98	0.60	5.71	7.68	1.97	4.66	6.28	1.62
12	4.33	4.60	0.27	2.56	4.16	1.60	2.08	3.72	1.64
13	11.95	12.72	0.77	7.23	9.37	2.14	5.84	7.56	1.72
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	12.76	10.59	2.17	7.63	8.03	0.40	6.22	6.83	0.61
16	10.94	12.10	1.15	6.52	8.80	2.28	5.34	7.18	1.84
17	4.34	3.32	1.02	2.53	3.60	1.07	2.05	3.33	1.28
18	12.30	10.33	1.98	7.43	8.06	0.63	6.00	6.72	0.72
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	10.95	7.10	3.85	6.62	6.66	0.04	5.38	5.63	0.25

(5)ばね定数別の接着系ボルト作用力の振幅

接着系ボルト作用力の風荷重時と死荷重時の差(「振幅」と呼ぶ)に着目して、ばね定数 K1、K2、K3 による比較を行った。

※L 断面で比較



単位 : kN

位置	K1 (ケース1-1-1) (ケース2-1-1) ※			K2 (ケース1-1-2) (ケース2-1-2) ※			K3 (ケース1-1-3) (ケース2-1-3) ※		
	死荷重時	風荷重時	振幅	死荷重時	風荷重時	振幅	死荷重時	風荷重時	振幅
1	10.97	27.41	16.44	11.07	22.96	11.89	11.03	19.56	8.54
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	12.33	29.01	16.69	12.08	25.33	13.25	10.77	19.59	8.83
4	4.37	24.37	20.00	4.77	22.20	17.43	7.37	16.20	8.83
5	10.96	25.57	14.61	10.73	22.83	12.10	9.72	17.57	7.85
6	12.78	28.27	15.49	12.62	24.67	12.05	11.36	19.70	8.34
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	11.97	25.96	13.99	11.70	23.13	11.43	10.38	18.64	8.27
9	4.35	26.72	22.37	4.77	21.96	17.19	7.31	16.01	8.70
10	9.60	25.00	15.41	9.55	21.40	11.85	9.27	16.93	7.67

※ K1=1.00×10⁸[N/mm]、K2=2.41×10⁵[N/mm]、K3=1.42×10⁴[N/mm]

位置	K1 (ケース1-1-1) (ケース2-1-1) ※			K2 (ケース1-1-2) (ケース2-1-2) ※			K3 (ケース1-1-3) (ケース2-1-3) ※		
	死荷重時	風荷重時	振幅	死荷重時	風荷重時	振幅	死荷重時	風荷重時	振幅
11	9.58	8.98	0.60	9.53	6.59	2.95	9.26	4.70	4.56
12	4.33	4.60	0.27	4.75	2.37	2.38	7.30	0.98	6.32
13	11.95	12.72	0.77	11.69	7.96	3.73	10.36	5.48	4.89
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	12.76	10.59	2.17	12.60	7.10	5.50	11.35	6.67	4.68
16	10.94	12.10	1.15	10.72	7.52	3.19	9.71	4.97	4.74
17	4.34	3.32	1.02	4.74	2.01	2.74	7.35	0.88	6.47
18	12.30	10.33	1.98	12.06	6.83	5.23	10.75	5.43	5.33
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	10.95	7.10	3.85	11.06	5.61	5.45	11.01	6.19	4.82

※ K1=1.00×10⁸[N/mm]、K2=2.41×10⁵[N/mm]、K3=1.42×10⁴[N/mm]

(6)風荷重の影響のまとめ

接着系ボルト1本あたり作用力に関する解析値と再現設計値の比較(ばね定数をK1とし、断面別に整理)

位置	解析値/設計値			位置	解析値/設計値		
	L	M	S		L	M	S
1	2.25	2.12	1.76	11	0.74	1.04	0.95
-	-	-	-	12	0.38	0.56	0.56
3	2.38	2.41	2.00	13	1.04	1.27	1.15
4	2.00	1.95	1.60	-	-	-	-
5	2.10	2.09	1.77	15	0.87	1.08	1.03
6	2.32	2.32	1.93	16	0.99	1.19	1.09
-	-	-	-	17	0.27	0.49	0.50
8	2.13	2.16	1.80	18	0.85	1.09	1.02
9	2.19	1.93	1.82	-	-	-	-
10	2.05	2.14	1.62	20	0.58	0.90	0.85

は、反対側にボルトがない位置

- ・K1=1.00×10⁹[N/mm]、K2=2.41×10⁵[N/mm]、K3=1.42×10⁴[N/mm]
- ・3.3.2.2の再現設計による死荷重時作用力:9.3kN(L断面)、5.4kN(M断面)、4.3kN(S断面)

接着系ボルト1本あたりの引抜強度の計算値と接着系ボルト1本あたりのボルト作用力の解析値の比較(ばね定数をK1とし、断面別に整理)

位置	引抜強度/解析値			位置	引抜強度/解析値		
	L	M	S		L	M	S
1	1.90	3.32	4.49	11	5.81	6.80	8.31
-	-	-	-	12	11.34	12.55	14.03
3	1.80	2.93	3.96	13	4.10	5.57	6.91
4	2.14	3.62	4.96	-	-	-	-
5	2.04	3.37	4.47	15	4.93	6.50	7.65
6	1.85	3.05	4.10	16	4.31	5.94	7.27
-	-	-	-	17	15.73	14.48	15.69
8	2.01	3.26	4.39	18	5.05	6.48	7.76
9	1.95	3.65	4.35	-	-	-	-
10	2.09	3.29	4.89	20	7.35	7.84	9.27

は、反対側にボルトがない位置

- ・接着系ボルト引抜強度:52.2kN/本

「3.3.3.2 換気運転による天頂部接着系ボルトの作用力の増加量の計算」では、隔壁板へ作用する水平風荷重を当初設計の手法において考慮した場合、接着系ボルト1本あたりL断面(米沢川換気所)で5.6kNの作用力が増加し、合計で17.8kNとなることを示した。本節の隔壁板に水平方向の風荷重を考慮した影響解析においても、同等の大きさの作用力が発生していることが確認された。

接着系ボルト1本あたり作用力に関する解析値と再現設計値の比較(ばね定数をK1とし、断面別に整理)

位置	再現設計/解析値			位置	再現設計/解析値		
	L	M	S		L	M	S
1	0.65	1.13	1.53	11	1.98	2.32	2.83
-	-	-	-	12	3.87	4.28	4.78
3	0.61	1.00	1.35	13	1.40	1.90	2.35
4	0.73	1.24	1.69	-	-	-	-
5	0.70	1.15	1.53	15	1.68	2.22	2.61
6	0.63	1.04	1.40	16	1.47	2.02	2.48
-	-	-	-	17	5.36	4.94	5.35
8	0.69	1.11	1.50	18	1.72	2.21	2.65
9	0.67	1.25	1.48	-	-	-	-
10	0.71	1.12	1.67	20	2.51	2.67	3.16

は、反対側にボルトがない位置

- ・3.3.3.2の水平方向の風荷重を考慮した再現設計値:17.8kN/本

接着系ボルト1本あたり作用力に関する解析値と再現設計値の比較(L断面を対象とし、ばね定数別に整理)

位置	解析値/設計値			位置	解析値/設計値		
	K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	2.25	2.47	2.10	11	0.74	0.71	0.51
-	-	-	-	12	0.38	0.26	0.11
3	2.38	2.72	2.11	13	1.04	0.86	0.59
4	2.00	2.39	1.74	-	-	-	-
5	2.10	2.46	1.89	15	0.87	0.76	0.72
6	2.32	2.65	2.12	16	0.99	0.81	0.53
-	-	-	-	17	0.27	0.22	0.10
8	2.13	2.49	2.00	18	0.85	0.73	0.58
9	2.19	2.36	1.72	-	-	-	-
10	2.05	2.30	1.82	20	0.58	0.60	0.67

接着系ボルト1本あたりの引抜強度の計算値と接着系ボルト1本あたりのボルト作用力の解析値の比較(L断面を対象とし、ばね定数別に整理)

位置	引抜強度/解析値			位置	引抜強度/解析値		
	K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	1.90	2.27	2.67	11	5.81	7.92	11.11
-	-	-	-	12	11.34	21.99	53.28
3	1.80	2.06	2.66	13	4.10	6.56	9.53
4	2.14	2.35	3.22	-	-	-	-
5	2.04	2.29	2.97	15	4.93	7.35	7.83
6	1.85	2.12	2.65	16	4.31	6.94	10.51
-	-	-	-	17	15.73	26.00	59.06
8	2.01	2.26	2.80	18	5.05	7.64	9.62
9	1.95	2.38	3.26	-	-	-	-
10	2.09	2.44	3.08	20	7.35	9.31	8.43

3.3.4.6 ボルトが対称配置であった場合

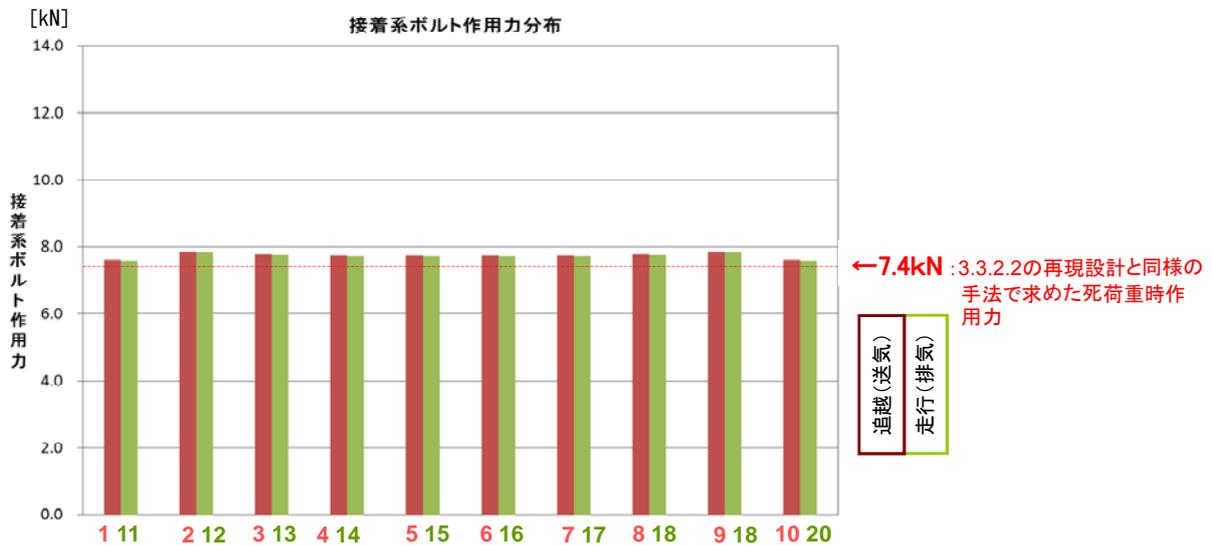
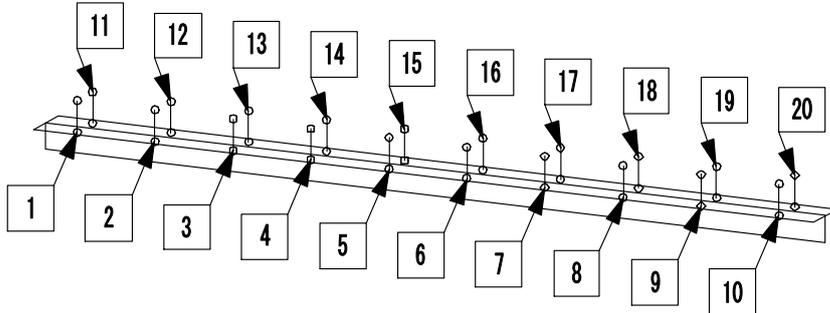
(1) 検討ケース

ケース No	1-1-1	1-1-2	1-1-3	1-2	1-3	2-1-1	2-1-2	2-1-3	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6
ケース	死荷重の影響解析					風荷重(鉛直+水平)の影響解析					接着系ボルトが対称配置であった場合の解析					
接着系ボルト本数	16本										20本					
荷重の組合せ	死荷重時 (①~③)					風荷重時 (①~⑥)					死荷重時 (①~③)			風荷重時 (①~⑥)		
ダクト断面	L断面	L断面	L断面	M断面	S断面	L断面	L断面	L断面	M断面	S断面	L断面	M断面	S断面	L断面	M断面	S断面
接着系ボルトのばね定数※	K1	K2	K3	K1		K2	K3				K1					

 : 本節の検討範囲

(2)解析結果(死荷重)

1)ケース3-1(L断面)接着系ボルト作用力 ($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm])

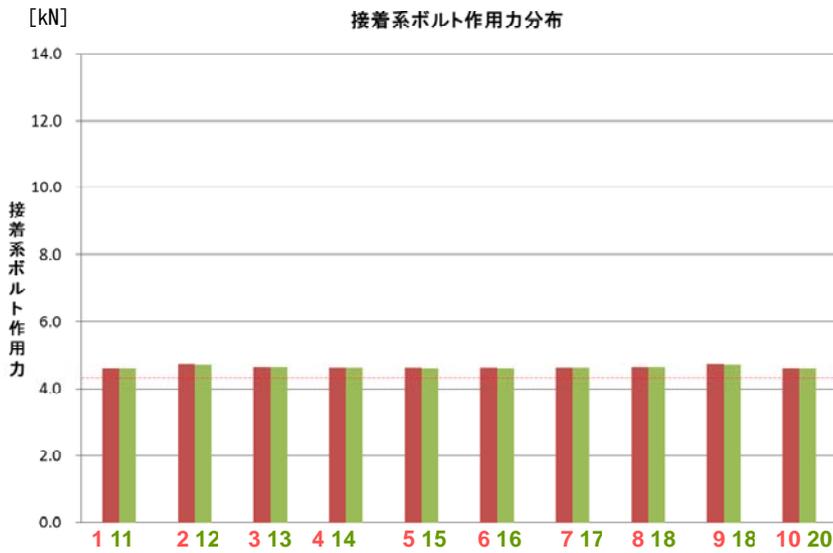
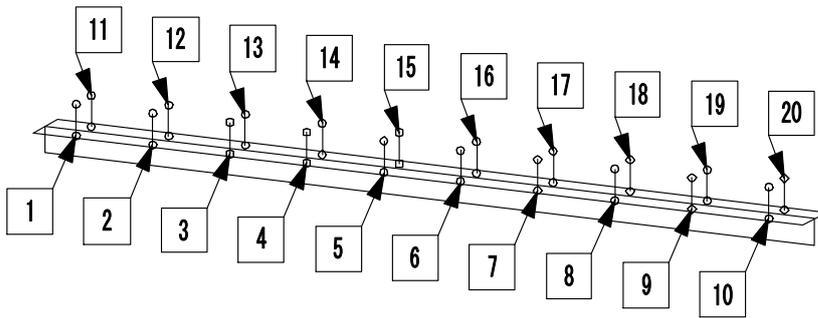


接着系ボルト引抜強度(a): 41.8kN/本※

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)
1	7.60	5.49	11	7.59	5.50
2	7.85	5.32	12	7.83	5.33
3	7.76	5.38	13	7.74	5.39
4	7.73	5.40	14	7.71	5.41
5	7.72	5.41	15	7.71	5.42
6	7.72	5.41	16	7.71	5.42
7	7.73	5.40	17	7.71	5.41
8	7.76	5.38	18	7.74	5.39
9	7.85	5.32	19	7.83	5.33
10	7.60	5.49	20	7.59	5.50

※ボルト16本配置換算とするため、
引抜強度(a)を $52.2 \times 16 / 20 = 41.8$ kNで計算

2) ケース3-2(M断面) 接着系ボルト作用力 ($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm])



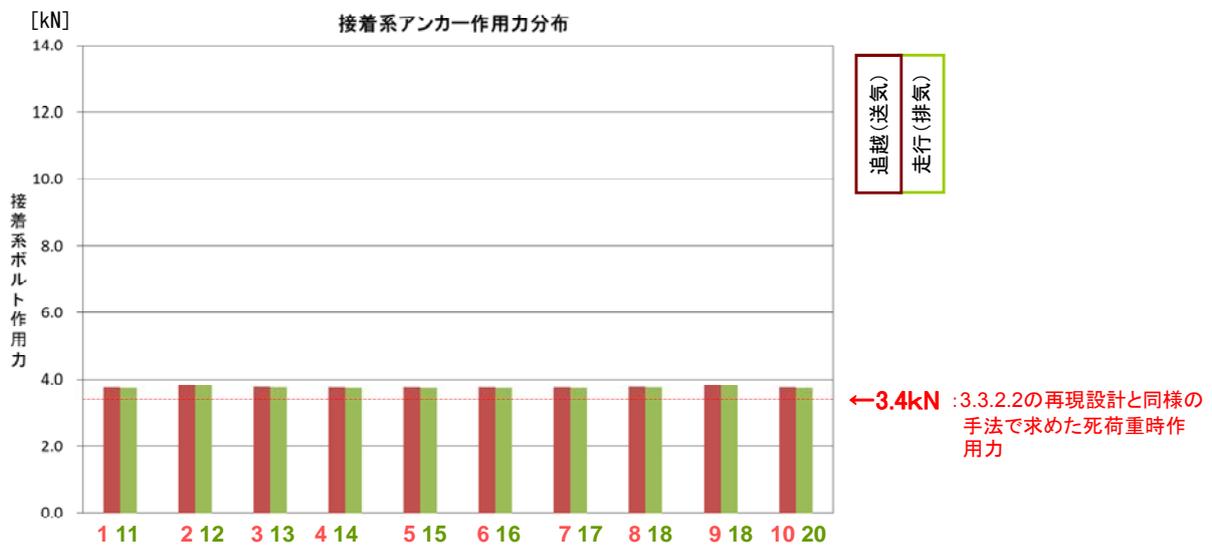
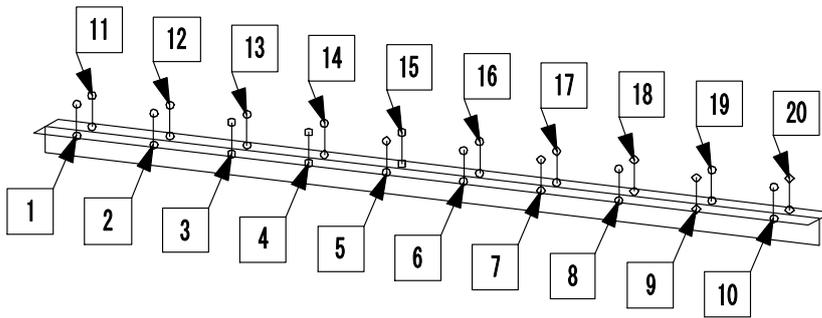
←4.3kN : 3.3.2.2の再現設計と同様の手法で求めた死荷重時作用力

接着系ボルト引抜強度(a): 41.8kN/本※

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)
1	4.60	9.08	11	4.59	9.10
2	4.71	8.88	12	4.70	8.89
3	4.63	9.03	13	4.62	9.04
4	4.61	9.07	14	4.60	9.08
5	4.60	9.08	15	4.60	9.09
6	4.60	9.08	16	4.60	9.09
7	4.61	9.07	17	4.60	9.08
8	4.63	9.03	18	4.62	9.04
9	4.71	8.88	19	4.70	8.89
10	4.60	9.08	20	4.59	9.10

※ボルト16本配置換算とするため、引抜強度(a)を $52.2 \times 16 / 20 = 41.8$ kNで計算

3) ケース3-3(S断面)接着系ボルト作用力 ($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm])



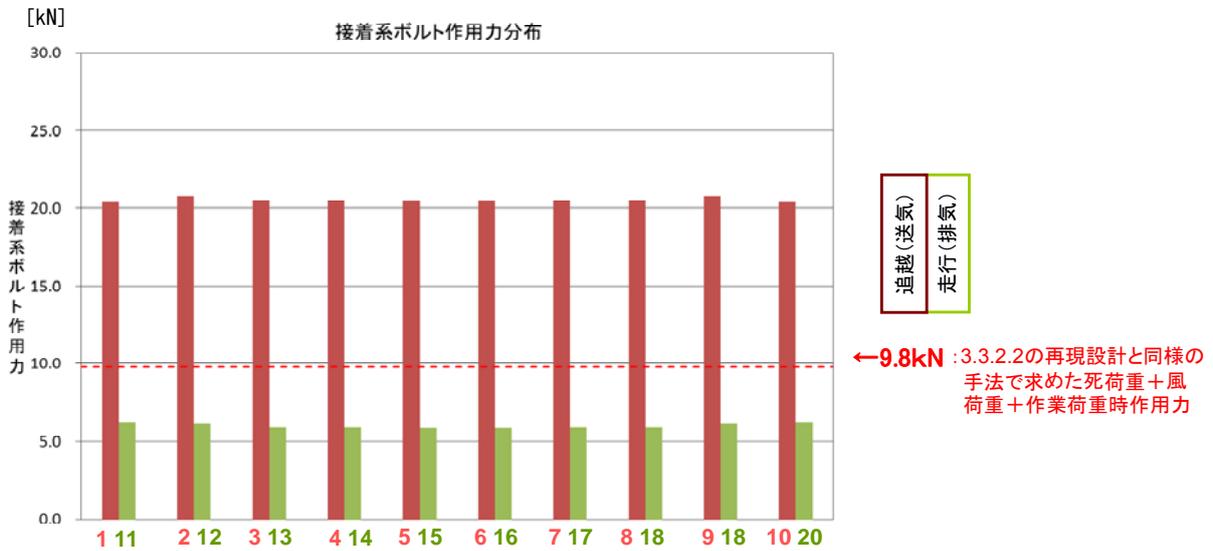
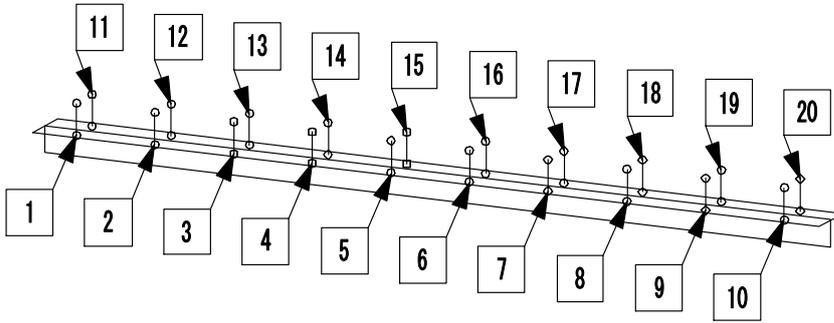
接着系ボルト引抜強度(a): 41.8kN/本※

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	3.75	11.13	11	3.73	11.18
2	3.83	10.90	12	3.81	10.96
3	3.78	11.06	13	3.76	11.12
4	3.77	11.09	14	3.75	11.15
5	3.76	11.09	15	3.74	11.16
6	3.76	11.09	16	3.74	11.16
7	3.77	11.09	17	3.75	11.15
8	3.78	11.06	18	3.76	11.12
9	3.83	10.90	19	3.81	10.96
10	3.75	11.13	20	3.73	11.18

※ボルト16本配置換算とするため、
引抜強度(a)を $52.2 \times 16 / 20 = 41.8$ kNで計算

(3)解析結果(風荷重)

1)ケース3-4(L断面)接着系ボルト作用力 ($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm])

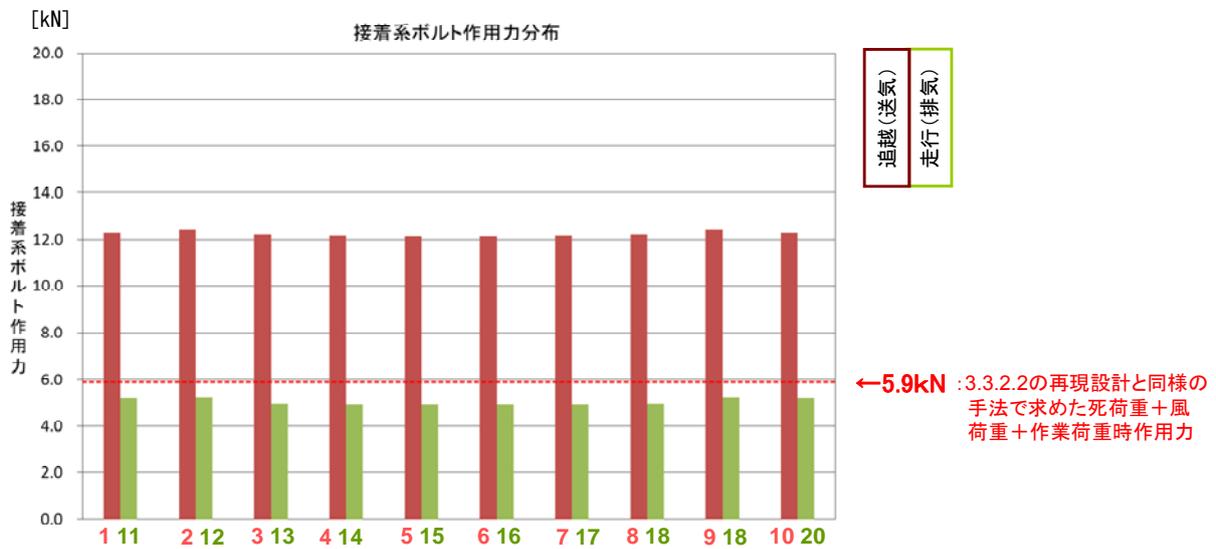
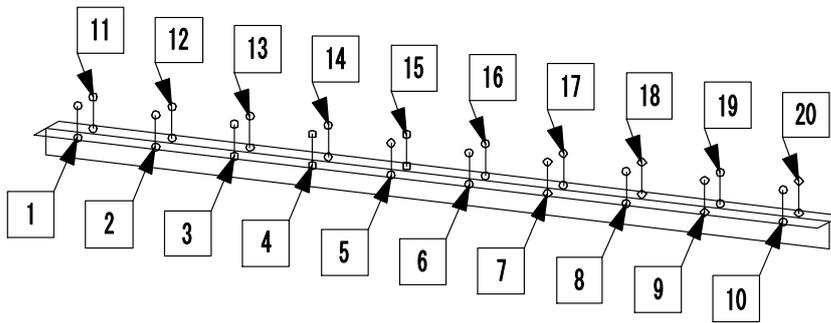


接着系ボルト引抜強度(a): 41.8kN/本※

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)
1	20.38	2.05	11	6.21	6.72
2	20.80	2.01	12	6.14	6.80
3	20.50	2.04	13	5.92	7.05
4	20.45	2.04	14	5.89	7.10
5	20.43	2.04	15	5.87	7.12
6	20.43	2.04	16	5.87	7.12
7	20.45	2.04	17	5.89	7.10
8	20.50	2.04	18	5.92	7.05
9	20.80	2.01	19	6.14	6.80
10	20.38	2.05	20	6.21	6.72

※ボルト16本配置換算とするため、
引抜強度(a)を $52.2 \times 16 / 20 = 41.8$ kNで計算

2) ケース3-5(M断面) 接着系ボルト作用力 ($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm])

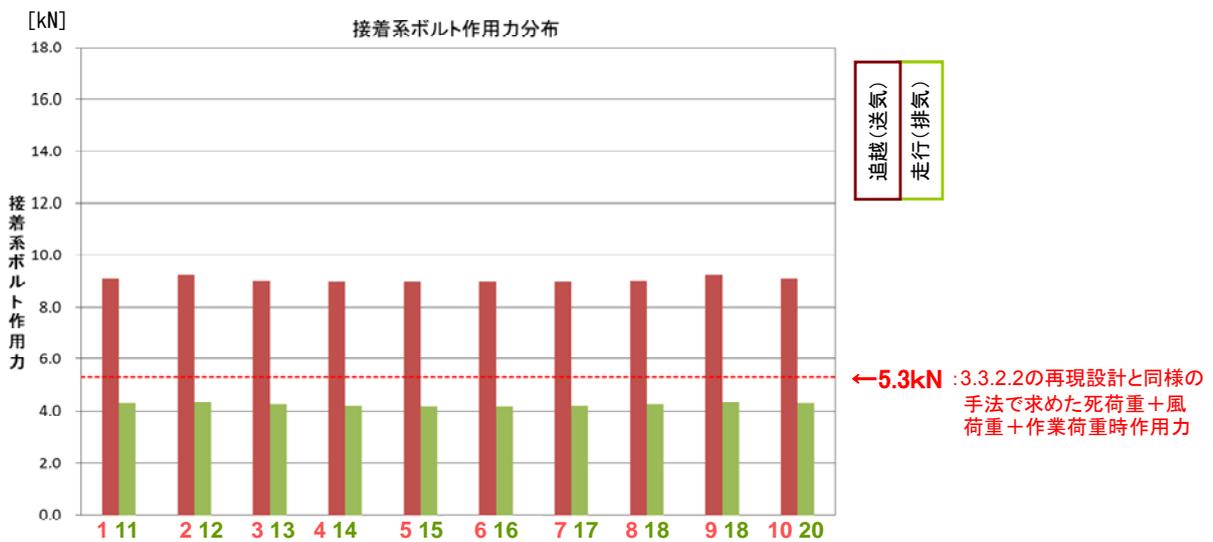
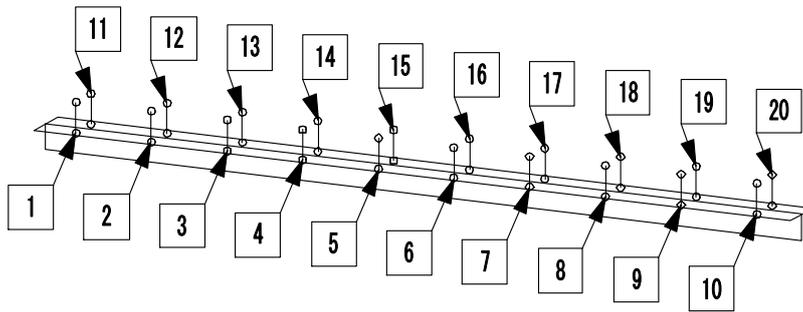


接着系ボルト引抜強度(a): 41.8kN/本※

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	12.27	3.40	11	5.20	8.04
2	12.46	3.35	12	5.22	8.00
3	12.20	3.42	13	4.96	8.42
4	12.16	3.43	14	4.95	8.43
5	12.14	3.44	15	4.94	8.46
6	12.14	3.44	16	4.94	8.46
7	12.16	3.43	17	4.95	8.43
8	12.20	3.42	18	4.96	8.42
9	12.46	3.35	19	5.22	8.00
10	12.27	3.40	20	5.20	8.04

※ボルト16本配置換算とするため、
引抜強度(a)を $52.2 \times 16 / 20 = 41.8$ kNで計算

3) ケース3-6(S断面)接着系ボルト作用力 ($K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm])



接着系ボルト引抜強度(a): 41.8kN/本※

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度(a) / 作用力(b)
1	9.13	4.57	11	4.32	9.67
2	9.23	4.52	12	4.33	9.65
3	9.04	4.62	13	4.27	9.78
4	9.02	4.63	14	4.21	9.93
5	9.01	4.63	15	4.18	9.99
6	9.01	4.63	16	4.18	9.99
7	9.02	4.63	17	4.21	9.93
8	9.04	4.62	18	4.27	9.78
9	9.23	4.52	19	4.33	9.65
10	9.13	4.57	20	4.32	9.67

※ボルト16本配置換算とするため、
引抜強度(a)を $52.2 \times 16 / 20 = 41.8$ kNで計算

(4)対称配置であった場合の解析まとめ

【死荷重時(L断面、ばね定数は $K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm)]】

<20本 対称配置>

<16本 非対称配置>

接着系ボルト引抜強度(a):41.8kN/本※

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	7.60	5.49	11	7.59	5.50
2	7.85	5.32	12	7.83	5.33
3	7.76	5.38	13	7.74	5.39
4	7.73	5.40	14	7.71	5.41
5	7.72	5.41	15	7.71	5.42
6	7.72	5.41	16	7.71	5.42
7	7.73	5.40	17	7.71	5.41
8	7.76	5.38	18	7.74	5.39
9	7.85	5.32	19	7.83	5.33
10	7.60	5.49	20	7.59	5.50

※ボルト16本配置換算とするため、
引抜強度(a)を $52.2 \times 16 / 20 = 41.8$ kNで計算

接着系ボルト引抜強度(a):52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	10.97	4.76	11	9.58	5.45
-	-	-	12	4.33	12.06
3	12.33	4.24	13	11.95	4.37
4	4.37	11.95	-	-	-
5	10.96	4.76	15	12.76	4.09
6	12.78	4.09	16	10.94	4.77
-	-	-	17	4.34	12.03
8	11.97	4.36	18	12.30	4.24
9	4.35	12.01	-	-	-
10	9.60	5.44	20	10.95	4.77

■は、反対側にボルトがない位置

【風荷重時(L断面、ばね定数は $K1=1.00 \times 10^8$ [N/mm)]】

<20本 対称配置>

<16本 非対称配置>

接着系ボルト引抜強度(a):41.8kN/本※

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	20.38	2.05	11	6.21	6.72
2	20.80	2.01	12	6.14	6.80
3	20.50	2.04	13	5.92	7.05
4	20.45	2.04	14	5.89	7.10
5	20.43	2.04	15	5.87	7.12
6	20.43	2.04	16	5.87	7.12
7	20.45	2.04	17	5.89	7.10
8	20.50	2.04	18	5.92	7.05
9	20.80	2.01	19	6.14	6.80
10	20.38	2.05	20	6.21	6.72

※ボルト16本配置換算とするため、
引抜強度(a)を $52.2 \times 16 / 20 = 41.8$ kNで計算

接着系ボルト引抜強度(a):52.2kN/本

追越車線(送気側)			走行車線(排気側)		
位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)	位置	作用力(b) [kN]	引抜強度 (a) /作用力(b)
1	27.41	1.90	11	8.98	5.81
-	-	-	12	4.60	11.35
3	29.01	1.80	13	12.72	4.10
4	24.37	2.14	-	-	-
5	25.57	2.04	15	10.59	4.93
6	28.27	1.85	16	12.10	4.31
-	-	-	17	3.32	15.72
8	25.96	2.01	18	10.33	5.05
9	26.72	1.95	-	-	-
10	25.00	2.09	20	7.10	7.35

■は、反対側にボルトがない位置