

笹子トンネル上り線と同様の  
天井構造で不具合

17

60 トンネル

ジェットファンなどの  
付属物で不具合

22

1420 トンネル

特集

# 笹子の衝撃 七つの教訓

## 独自の検証で浮かび上がった維持管理の盲点

9人の犠牲者を出した笹子トンネルの事故は、土木界に大きな衝撃を与えた。事故原因はまだ明らかになっていないが、その衝撃の大きさゆえに、事故からは様々な疑問点や問題点が浮かび上がる。そこで本誌は、注目が集まる接着系アンカーの耐力計算や使用方法に着目して、独自に検証を試みた。検証結果や専門家の知見から、設計思想を踏まえた点検や維持管理のしやすさを念頭に置いた改修など、これからの維持管理に必要な教訓が浮かび上がった。(真鍋 政彦)

### CONTENTS

#### 広がる事故の波紋

上り線で1000カ所超の不具合 ..... ▶26

#### 当時の設計に迫る

定着部アンカーの当初耐力は十分 ..... ▶28

#### あと施工アンカーの常識

建築設備以外は吊り下げ制限なし ..... ▶32

#### 事故からみえた七つの教訓

設計思想を踏まえた維持管理を ..... ▶35

笹子トンネル下り線は天井板を撤去して2012年12月29日に対面通行で開通した。下り線は12月2日に発生した上り線の事故で、通行止めになっていた。12月30日に撮影。上の数字は、事故後に国土交通省が全国のトンネルで緊急点検を実施した結果、不具合が見つかった箇所(写真:山崎 一邦)

広がる  
事故の波紋

# 上り線で1000カ所超の不具合

笹子トンネル上り線の事故以降、全国のトンネルでの緊急調査や事故現場での引き抜き抵抗試験の実施、下り線の開通など、様々な動きが見られた。上り線の接着系アンカーには、事故の原因と推測される「緩み」が1000カ所以上も発見された。

年末年始、中央自動車道で発生した笹子トンネルの天井板崩落事故を巡って新たな動きがあった。

国土交通省は、笹子トンネルと同様の天井構造を持つトンネルと、トンネル内にあるジェットファンなどの重量構造物を全国一斉に緊急点検することを決定。道路管理者に

2012年内の報告を求めた(24ページに結果を掲載)。

中日本高速道路会社は、大動脈である中央自動車道の一刻も早い開通に向けて、緊急点検が済んだ下り線で12年12月9日から天井板撤去に取り掛かった。

撤去には、道路をまたぐ跨道橋な

どの桁の設置に使う大型の自走式台車を使用。各坑口から2台ずつトンネル内に搬入して、天井板を撤去し、その上に乗せて運び出した。24時間体制で工事を進めたことで、下り線は12月29日に対面通行で開通することができた。

## 下り線は最大で25%の不具合

事故原因の解明につながる資料も続々と出てきた。年末に開かれた「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会」(委員長：今田徹・東京都立大学名誉教授)の第2回会合で、下り線の接着系あと施工アンカーの不具合分布が明らかになった。

延長4717mの下り線で、不具合数は約630カ所に上った。60mごとに区切って、各区间で接着系アンカーの損傷状況をまとめたところ、最も不具合が集中している区間で、25%が損傷していたことが分かった。

さらに詳細にみていくと、一つの

上部CT鋼にある16本の接着系アンカーのうち、半数以上の9本で損傷が見つかった箇所もあった。

事故のあった上り線は下り線のすぐ横に位置し、天井構造の形式も同じであることを考えると、不具合数はそれほど変わらないはずだと考えられていた。

しかし、年明けの1月9日に国土交通省が発表した上り線の不具合数は下り線のそれを大きく上回るものだった。崩落しなかった区間の天井構造で約1030カ所のアンカーの不具合を発見。下り線の約1.6倍に当たる。

1月17日時点で、上り線の不具合分布は明らかになっていない。ただ、下り線で最も不具合が集中している区間の損傷数から考えると、単純に1.6倍すれば、上り線では約40%が損傷している区間があることになる。接着系アンカーの損傷が事故の要因である可能性が一段と高まった。

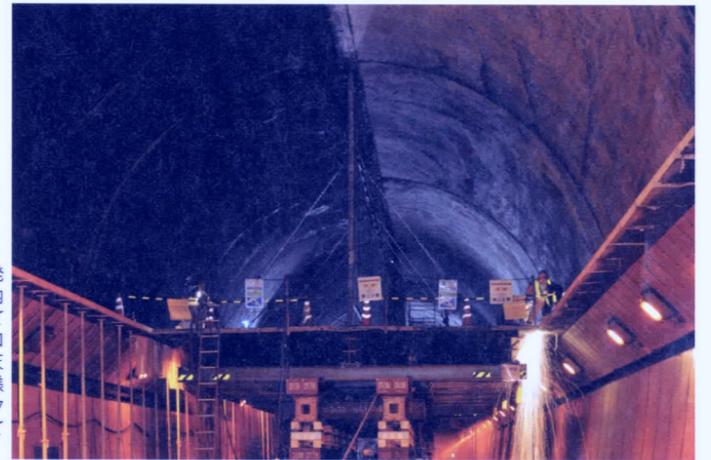
## 試験結果は「そろってから発表」

国土交通省の調査・検討委員会も接着系アンカーが事故を引き起こした可能性があるとして、上り線のアンカーの引き抜き試験や接着剤の分析を開始した。引き抜き抵抗力の数値については「結果がそろってから発

## ■ 笹子トンネル上り線の緊急点検結果

不具合のあった箇所	不具合の種類	箇所数	不具合の割合	下り線の不具合の割合(参考値)
アンカーボルト	欠落	5	8.9%	5.3%
	脱落	3		
	緩み	1004		
	腐食による断面欠損	16		
吊り金具	欠落	18	0.1%	0.02%
	脱落	14		
	破損・変形	20		
受け台ボルト	欠落	4	0.04%	0.06%
	脱落	1		
	破損・変形	1		
覆工コンクリート	アンカーをまたぐひび割れ	125	—	—

上り線の数値は崩落しなかった区間のもの(資料:国土交通省)



1月15日には事故が発生した上り線のトンネル内部が報道機関に初めて公開された。甲府側坑口から260m付近にある天井板の撤去工事の様子。天井板の端をコンクリートカッターで切断していた(写真:大村 拓也)

表する」(今田委員長)としている。

崩落事故は多くの技術者に衝撃を与えた。事故の原因を解明すればそれで終わりではなく、事故から浮かび上がる疑問点や問題点から多くの

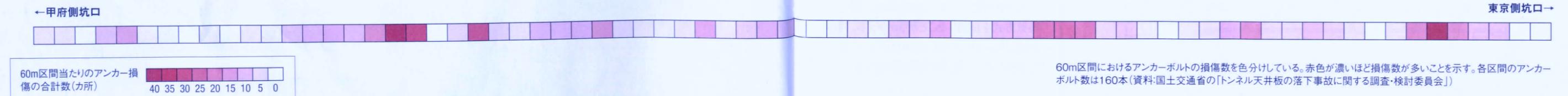
ことを学び取らなければならない。

次ページからは、多くの技術者が注目する当初設計の考え方や接着系アンカーの使用方法について独自に検証していく。



笹子トンネル下り線の天井板を東京側坑口に運び出し、撤去している様子。年内の交通開放のため、約4.4kmにわたる天井板計1万1200枚を約2週間で撤去した。2012年12月18日の午前中に撮影(写真:本誌)

## ■ 笹子トンネル下り線の60m区間ごとのアンカーボルト損傷図



60m区間におけるアンカーボルトの損傷数を色分けしている。赤色が濃いほど損傷数が多いことを示す。各区間のアンカーボルト数は160本(資料:国土交通省の「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会」)

# 定着部アンカーの当初耐力は十分

本誌は当時の設計思想を明らかにするため、過去の文献や図面を探った。さらに、国土交通省の資料や技術指針をもとに、天井板定着部のアンカーの応力計算を再現。現行の安全率をみても、計算上は「十分」な耐力を持っていたことが分かった。

「天井部が高すぎて、アンカーの不具合を発見できなかった」、「天井板が重厚で、しかもそれらを連結した構造形式が事故を拡大させた」、「アンカーの安全率不足が事故の起因になった」――。日経BP社の建設・不動産総合サイト「ケンプラッ

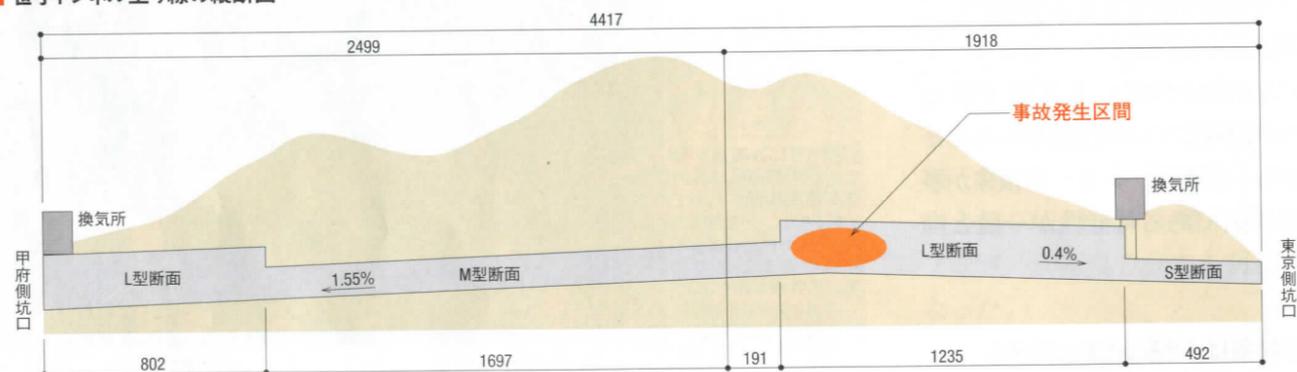
ツ」(<http://kenplatz.nikkeibp.co.jp>)には、笹子トンネルの当初設計に問題があったのではないかという意見が多く寄せられた。

そこで、同時期に設計された恵那山トンネル(長野県～岐阜県)の設計思想などを参考にしつつ、笹子ト

ンネルの天井部の設計思想を探り、当時の設計に明らかな不備があったのかどうかを検証してみたい。

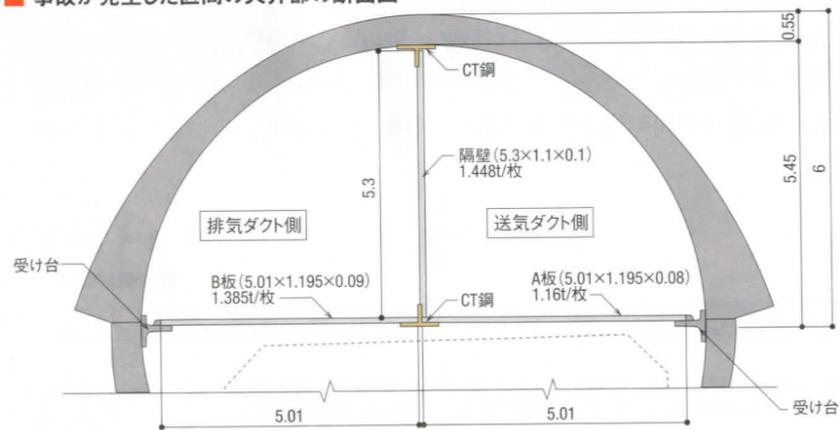
中日本高速道路会社によると、事故のあった上り線の天井部の設計資料は見つかっていない。ただし、過去の雑誌に掲載された笹子トンネル

■ 笹子トンネル上り線の縦断面図



(資料:右ページまで国土交通省の「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会」)

■ 事故が発生した区間の天井部の断面図



## 大断面の天井部

日本建設機械化協会が1974年10月に発行した「建設の機械化」に寄稿された施工概要によると、約4.4kmの長大トンネルの換気に安全性を持たせ、火災時に効果的に排煙できることや、トンネル内の人々が避難しやすいことを理由に横流換気方式を採用したことがうかがえる。同方式はトンネル内部に送排気ダクトを包含するので、天井部が大断面になった。

## 天井板の使用材料

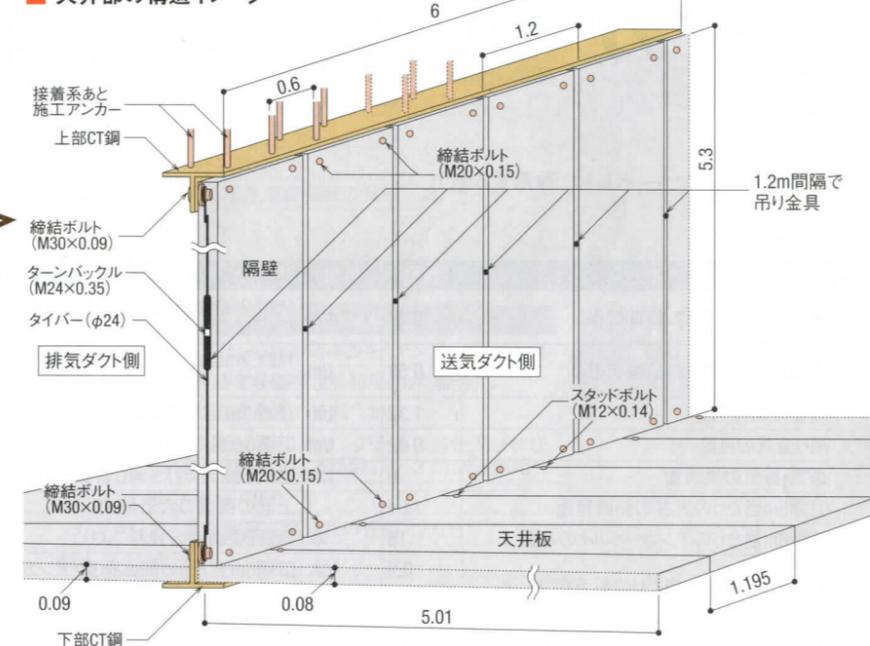
トンネルの換気用ダクトとして天井板にはかなりの風荷重が掛かる。例えば、恵那山トンネルでは風荷重300kg/m<sup>2</sup>を設計荷重として見込んでいる。これを笹子トンネルに当てはめると、天井板(1.2m×5m)1枚当たり1.8tの荷重が掛かる計算になる。所定の強度を持たせるためには、比重が大きく、さらに曲げモーメントに耐えられるPC板が有効とされた。

の施工概要や図面などから、天井部の計画や設計思想がうかがえる。

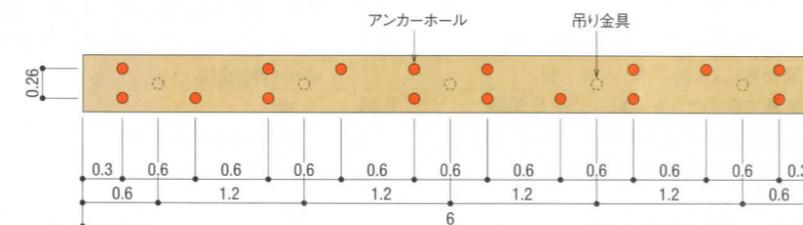
笹子トンネルは非常に大きな断面が特徴的だ。特に天井部の高さは5.3mと、車道部よりも高い。足場を組まないと最頂部を点検できないほどの高さがあったと打音検査を怠り、十分な目視点検もせず、不具合が見過ごされた可能性がある。

これほどの高さが必要だったのは、完全な横流換気方式を採用したからだ。坑口付近のたて坑からトンネル内に直接、送排気するため、トンネルの天井部にダクトを設けている。換気量に応じて、天井部の断面を3種類に変えた経済的な工法を採用した。事故が発生したのはそのうち、最も大きな断面の区間だった。天井の高さを抑える方法がなかったわけではない。恵那山トンネルも同様の横流換気方式だが、天井構造の高さは約2mしかない。恵那山は別途、補助トンネルを設けて送気しているため、ダクトの断面積を抑えることができた。

■ 天井部の構造イメージ



■ 上部CT鋼のアンカーホルルの位置図



## 天井板にALCも検討していた

続いて、天井板の材料選定について考える。同時期に設計された恵那山トンネルの設計思想を参考にしたい。1977年に当時の日本道路公団名古屋建設局が発行した「恵那山トンネル工事誌」には、天井板材料の選定の過程が掲載されている。

ALC(軽量気泡コンクリート)板とPC(プレストレスト・コンクリート)板などを検討したうえで、ALC板の厚さ150mmに対して、PC板

は80mmとなって、ダクト断面が大きく取れる点や経済性などを考慮してPC板を採用した。

天井板同士を連結した構造についても、恵那山トンネルの設計思想から考えてみる。天井部のダクトに気密性を持たせる必要があったとみられ、天井板同士の目地部は差し筋を溶接して無収縮モルタルで被覆している。隔壁の間も無収縮モルタルで覆っている。

ただ、隣り合うCT鋼をまたぐよ

# アンカーの作用荷重と耐力を再現

## ■ 定着部のアンカーボルトに作用する応力

### 【鉛直荷重】

諸元	数量	単位	備考
送気ダクト側の板の鉛直荷重	0.48	t/m	1枚1.2m当たり1.16t、側壁の受け台と反力を2分する
排気ダクト側の板の鉛直荷重	0.58	t/m	1枚1.2m当たり1.385t、側壁の受け台と反力を2分する
隔壁の鉛直荷重	1.32	t/m	1枚1.1m当たり1.448t
吊り金具の自重	0.02	t/m	CT鋼6m当たり5カ所(0.021t/カ所)
送気・排気の風荷重	0	t/m	送気と排気で打ち消し合うと仮定
CT鋼6m当たりの天井の鉛直荷重	14.4	t	上記の荷重の合計値×6
CT鋼6m当たりのアンカーボルトの本数	16	本	第2回委員会の資料*1より
アンカーボルト1本当たりの鉛直荷重 $P_v$	0.9	t/本	CT鋼6m当たりの鉛直荷重/アンカー本数
	8.8	kN/本	SI単位に換算

### 【隔壁に作用する風荷重の偶力】

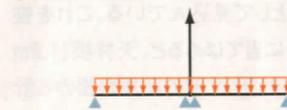
諸元	数量	単位	備考
隔壁の壁高 $h$	5.37	m	5.3+0.07
風荷重 $W$	2.9	kN/m <sup>2</sup>	同時期に設計された恵那山トンネルの風荷重約300kg/m <sup>2</sup> (約2.9kN/m <sup>2</sup> )を採用
上部CT鋼6mに作用する風荷重 $W_1$	46.7	kN	$6 \times h \times W \times 1/2$ (下部CT鋼と荷重を2分)
風荷重による曲げモーメント $M$	7	kN・m	$W_1 \times 0.15$
横断方向のアンカーボルトの平均間隔	0.26	m	
上部CT鋼6mの送気側のアンカーの本数	8	本	1列8本で2列縦隊
アンカーボルト1本当たりの偶力 $N$	3.4	kN/本	$(M/0.26)/8$

### 【アンカーボルトに作用する応力】

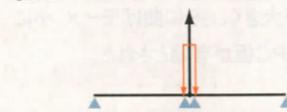
諸元	数量	単位	備考
アンカーボルト1本当たりに作用する応力 $P$	12.2	kN/本	$P_v + N$

\*1:国土交通省の「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会」の第2回会合の配布資料  
図は右ページまで国土交通省の調査・検討委員会の第2回会合の配布資料をもとに本誌が作成

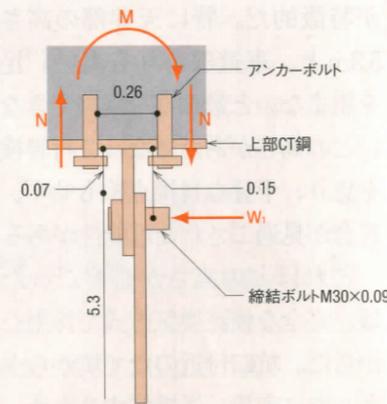
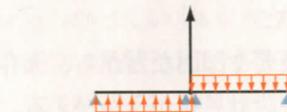
【天井板の自重イメージ】



【隔壁の鉛直荷重+吊り金具の自重のイメージ】



【送気・排気の風荷重イメージ】



## ■ 接着系アンカーボルトの許容引張耐力の計算

### 【アンカー鋼材の許容引張耐力 $T_{as}$ 】

諸元	数量	単位	備考
アンカー鋼材の降伏点 $\sigma_y$	245	N/mm <sup>2</sup>	SS400、第2回委員会の資料*1より
引張力に抵抗するアンカー鋼材の最小断面積 $A_s$	157	mm <sup>2</sup>	ねじの呼び径M16
引張耐力 $T_{us}$	38.5	kN	$\sigma_y \times A_s / 1000$
安全率(常時) $v_s$	1.7		首都高速道路会社の資料*2より
許容引張耐力 $T_{as}$	22.6	kN	$T_{us} / v_s$

### 【コンクリートのコーン破壊による許容引張耐力 $T_{ac}$ 】

諸元	数量	単位	備考
アンカーの有効埋め込み深さ $l_e$	114	mm	アンカーの埋め込み長さ-アンカーボルト直径
有効投影面積 $A_c$	40830	mm <sup>2</sup>	$\pi \times l_e^2$ (コーン角度を45度とした場合)
コンクリートの圧縮強度 $\sigma_{ck}$	20	N/mm <sup>2</sup>	第2回委員会の資料*1より
コンクリートの割裂強度 $\sigma_{tk}$	1.1	N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{ck} / (10 \times \beta)$ $\beta$ :コンクリートの劣化及びひび割れの程度による係数1.5~2で1.75を採用
引張耐力 $T_{uc}$	46.7	kN	$A_c \times \sigma_{tk} / 1000$
安全率(常時) $v_c$	3		首都高速道路会社の資料*2より
許容引張耐力 $T_{ac}$	15.6	kN	$T_{uc} / v_c$

### 【覆工コンクリートと樹脂の付着による許容引張耐力 $T_{ab}$ 】

諸元	数量	単位	備考
覆工コンクリートと樹脂の付着強度 $\tau_0$	8	N/mm <sup>2</sup>	第2回委員会の資料*1より
アンカーの削孔径 $d_s$	19	mm	
引張耐力 $T_{ub}$	54.4	kN	$\pi \times d_s \times l_e \times \tau_0$
安全率(常時) $v_c$	3		首都高速道路会社の資料*2より、コンクリートの破壊に対する安全率を採用
許容引張耐力 $T_{ab}$	18.1	kN	$T_{ub} / v_c$

\*2:1994年に当時の首都高速道路公団が作成した「後打ちアンカーの設計・施工に関する技術資料」

## ■ 各破壊モードにおける判定結果(1以上であれば問題なし)

アンカー鋼材の降伏に対する判定	$22.6 \div 12.2 = 1.85$	全て OK
コンクリートのコーン破壊に対する判定	$15.6 \div 12.2 = 1.28$	
覆工コンクリートと樹脂の付着に対する判定	$18.1 \div 12.2 = 1.48$	

うに隔壁を配置して構造的に連結した設計思想については、過去の文献にも記述がなかった。

気密性を持たせるだけであれば構造的に一体化させる必要はない。CT鋼同士の間で縁切りして、隙間を無収縮モルタルで覆えばよかったです。いくつかのアンカーボルト

に不具合が生じても連結構造で支え合うようにする目的があったのかもしれないが、全てを連結する必要はなかったのではないかと。

### コンクリ3、鋼材1.7の安全率

天井で最も注目されているのが、事故の発端となった可能性のある定

着部の接着系あと施工アンカーだ。

接着系アンカーの使用方法が適切だったかどうかは、32ページ以降での説明に譲るとして、ここでは、アンカーの設計荷重と耐力の計算を再現してみた。上がその計算結果だ。当初設計の基本仕様全てが明らかになったわけではないので、例えば、

数値が不明な風荷重は、恵那山トンネルの設計値を代用した。結果はあくまでも参考値としてみてほしい。

接着系アンカーの許容引張耐力の計算には、1994年に当時の首都高速道路公団が作成した「後打ちアンカーの設計・施工に関する技術資料」を使った。安全率も、そこに記載さ

れている値を使用。鋼材の許容応力度に対する安全率は、降伏応力を基準にして1.7、コンクリートは圧縮強度に対して3をみている。

まず、天井部の自重や風荷重の偶力からアンカーボルトに作用する応力を計算。接着系アンカーの破壊パターンごとに算出した許容引張耐力

が上回っているかどうかを確認する。

接着系アンカーの破壊パターンは、アンカー鋼材の破断とコンクリートのコーン破壊、アンカーの引き抜けの三つに大別できる。

判定結果は、全てが1以上だった。当初設計の耐力計算では問題がなかったことになる。