

レビュー

R

E

V

I

E

W

笹子トンネル事故を考える

—科学者の社会的責任から

中央自動車道の笹子トンネル事故の原因はアンカーボルトの施工ミスではないかとの報道があるが、覆工コンクリート、断層、フェールセーフ、偏心構造物、大断面トンネル、横流換気方式などの観点から精査し、これが単なる施工ミスではなく設計ミスであることを指摘するとともに、古くなった実験装置は大惨事に至る以前に早急に撤去すべきと著者は主張する。



西山 豊

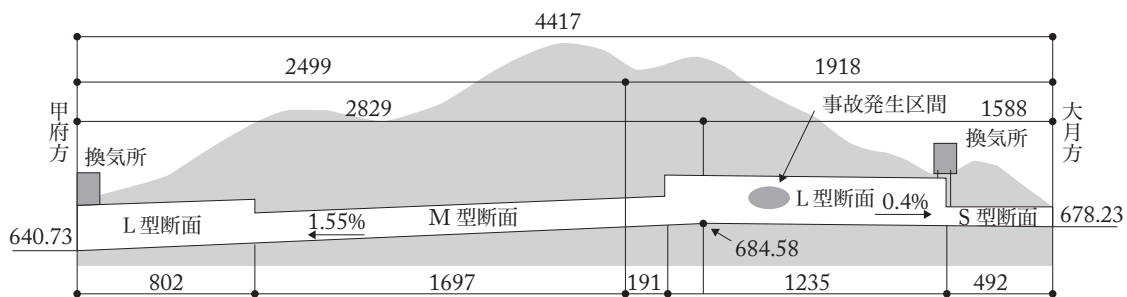


図1 縦断面図(上り線)(国土交通省の資料を元に作成)

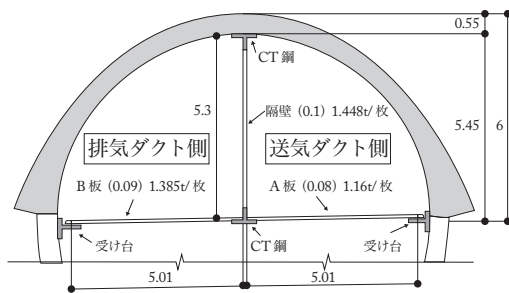


図2 横断面図(国土交通省の資料を元に作成)

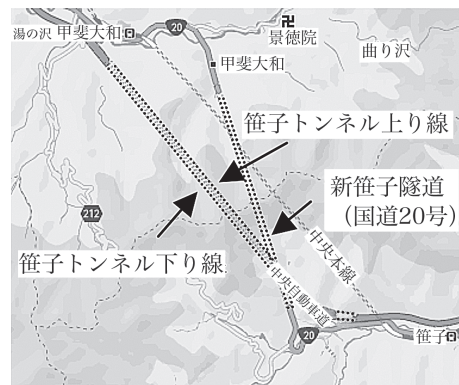


図3 笹子トンネル(Google マップより)

はじめに

2012年12月2日、山梨県大月市笹子町の中央自動車道上り線笹子トンネルで、天井板のコンクリート板345枚が約130mの区間にわたって落下し、走行中の車複数台が巻き込まれて死傷者が出た。

日本の高速道路上での事故としては、1979年に発生した日本坂トンネル火災事故や、2012年

4月29日に発生した関越自動車道高速バス居眠り運転事故を死亡者数で上回り、最も死亡者数の多い事故となった。

西洋建築における門や窓の形がアーチ状になるのは石造によるため、この場合、天端が力学的に弱くなるため要石などが用いられている¹⁾。同様にしてトンネルの断面もアーチ状が力学的に安定

キーワード：トンネル工学 (tunnel engineering), 換気 (ventilation), 災害 (disaster), アンカーボルト (anchor bolt), フェールセーフ (fail safe)

した形となる。トンネル覆工のひび割れ調査では、天端付近に亀裂が集中するという報告がある²⁾。側壁部の岩圧によって天端の外側に亀裂が生じることが主であるが、どちらにしても天端はトンネル構造の一番のネックになっている。

この天端に1トン以上の天井板をアンカーボルト1本で支えているというニュースを知ったとき、これは力学的にあり得ない構造だと私は直観した。事故の解明はまだされていないが、国土交通省³⁾および同省の「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会」^{4,6)}の公開された資料を中心にして一科学者の立場として検討を加えてみる。

1 いくつかの論点

(1) アンカーボルトだけが原因ではない

調査・検討委員会の「資料3-2：引抜き抵抗力試験結果」⁶⁾の4ページ目には、183箇所の試験で「十分な強度を有するアンカーボルトもある一方で、強度が不足しているものも確認された」として、引き抜けたアンカーボルトの写真を公開している。それを受けて新聞各紙は、「構造上は13センチ差し込まれているはずなのに、半分以下の5センチしか入っていないものがあった」と施工不良を報道している（共同ニュース、2013年3月5日）。

確かに天井板が崩落した直接の原因はアンカーボルトであるが、なぜアンカーボルトの施工ミスが起こったのか、すべての責任をアンカーボルトに負わせようとしていないか、もしアンカーボルトの施工が万全であったなら問題なかったのか、トンネル設計に問題はなかったのだろうか。

なお、国土交通省の「あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針」（2006年）によれば、「本指針では、あと施工アンカーを、長期荷重を負担するような補強に用いることを適用対象外とした」（ページ1～3）とあるように、笹子トンネルのようなアンカーボルトの使用方法は、現在は認められていない⁷⁾。

(2) 覆工コンクリート

会計検査院は、1976年、笹子トンネル西工事ほか13工事において、アーチ部覆工コンクリートの施工が設計と相違していたので改善を求めている⁸⁾。これによると、設計の巻き厚55～90cmに対して、施工の巻き厚不足が2分の1を超えるものが15箇所、3分の1を超えるものが142箇所、4分の1を超えるものが182箇所あったという。図4では左が設計の巻き厚、右が施工後の巻き厚である。なぜ、このような施工ミスが起こったのか、現場監督の不適正だったのか、後述するように笹子トンネルは大断面トンネルであるため、コンクリート打設の施工ミスだけでなく、トンネル設計との関連で議論しなければならない。

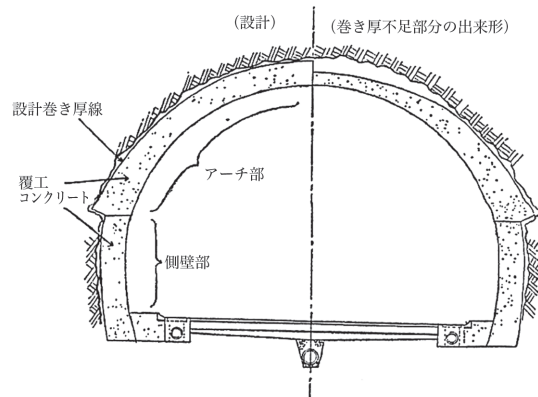


図4 アーチ部覆工コンクリートの施工ミス
会計検査院（1976年11月29日）

(3) 直下に断層

国土交通省の資料によれば、事故の区間の東京から82.5 kmと82.7 kmの間には断層がある⁴⁾。図5では右が頁岩で左が花崗閃緑岩である。

「笹子トンネル地域の地質は中生代白亜紀と推定される小仏層の頁岩、砂岩、チャートの堆積層と、これに第三期に貫入した花崗閃緑岩から成り立っている。そして花崗閃緑岩と接しているところはホルンフェルス化している。大月側の東坑口より米沢川を経て約2 kmの区域は頁岩層であり、一般に割れ目が多く、粘土をかみ、脆弱、中央部の砂岩層は安定した岩盤である。甲府側の西坑口一帯は花崗岩地域であり、深部は硬岩であるが、

地表部は割れ目も多く、かつ風化も進んでおり、湧水も多い。特に問題となるのは棚小屋西沢に沿う断層で、破碎帯の規模は150 mに及んでいる。また、全般に粘土をかんだ破碎帯が競合して30～150 m²の落盤を誘発し、工事進捗上支障となっている⁹⁾。

工事が難航した棚小屋西沢は西工事であり、今回の事故とは反対側であるが、笹子トンネルは、断層や断層破碎帯が多い地域である。また、フォッサマグナが走る場所であり、地震の誘発地帯でもある。1975年以降では1976年、1983年、1996年、2011年、2012年に大きな地震があった¹⁰⁾。特に、2011年3月11日の東日本大震災、2012年1月28日の山梨県東部・富士五湖地震とトンネル事故との関連性も否定できない。それなのに、笹子トンネルは2000年から10年以上も点検がされていない。

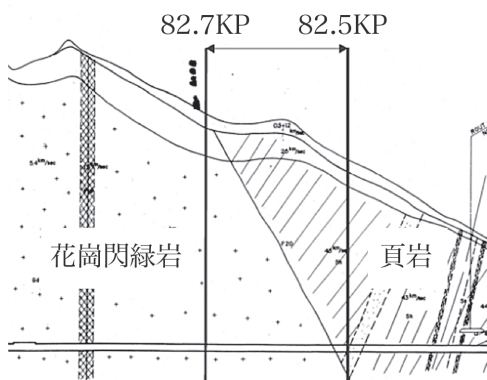


図5 断層(82.5KPと82.7KP) 資料: 国土交通省

(4) 頂上付近、新笹子隧道との交差

事故が起こった区間はトンネルの頂上部(大月側から1588 m)に近い。笹子トンネル上り線は、甲府側から1.55%の勾配で上昇し0.4%の勾配で下降する。道路勾配は頂上で“不連続”となる。頂上付近では、坂を上る自動車の排気ガスや振動に影響されないだろうか。

また、事故の区間は、M型断面からL型断面に変化した後の地点でもある。後述するが、笹子トンネルは、トンネルの横断面がL型、M型、S型の3種類の断面を持つ特殊なトンネルである。LはLarge, MはMiddle, SはSmallの意味であ

る。M型からL型への断面の移行は不連続であり、トンネル構造的に、かつ地震応答に対して問題ないのだろうか。

さらに、笹子トンネルは、新笹子隧道(国道20号)と事故現場から100 mの至近距離で交差している(図3)。これらの問題は別の機会に論じてみたい。

(5) フェールセーフ

笹子トンネルがはたして安全性を配慮した設計をしたのだろうかと疑わせるデータとして次がある。国土交通省が実施した緊急点検結果³⁾から、天井板を保有する全国の61トンネルを対象にして、天井板の吊金具支持形式についてまとめたのが表1である。

天井板を何本のアンカーボルトで支えているかという調査であるが、1本で支えているというのが14トンネルで約2割である。この中に笹子トンネルの上り線と下り線が含まれている。2本で支えているのが14トンネル、3本で支えているのが27トンネルである。

2～5本で支えるという形式はフェールセーフの考え方が反映している。1本のアンカーボルトが駄目になっても、他のアンカーボルトが保険として働くのだ。

また、天井板から定着部までの距離をまとめると表2になる。定着部はアーチ部の中央(天端)になることが多いが、そうでない場合もある。1 m以上2 m未満が21トンネル、2 m以上3 m未満が28トンネルであり、両者を合わせると約8割がこの範囲におさまっている。5 mを超えるトンネルは笹子トンネルだけであり、5.3 mは道路から天井板までの距離4.7 mより長い。

天端までの距離が大きくなればなるほど隔壁が大きくなり、分厚く、重くなり、アンカーボルトへの負担も大きくなる。また5.3 mという距離は定期点検には適さない。足場を組む必要があり、費用のことを考えて点検が見送られた可能性がある。

さらに、笹子トンネルの場合、天井板が連結される構造となっている^{4,5)}。左右2枚の天井板と隔壁は下部CT鋼と上部CT鋼によって連結さ

表 1. 天井板を支持する本数

吊金具支持	トンネル数
なし	1
1 本 (*)	14
2 本	14
3 本	27
4 本	3
5 本	2
合計	61

表 2. 天井板から定着部（天端）までの距離

天端までの距離	トンネル数
1 m 未満	3
1 m 以上 2 m 未満	21
2 m 以上 3 m 未満	28
3 m 以上 4 m 未満	6
4 m 以上 5 m 未満	1
5 m 以上 (*)	1
合計	61

れ、さらにこの 3 枚が道路延長方向に 5 組が連結されるようになっている。1 万 1613 本のアンカーボルトが同時に抜け落ちることはない。必ず時間差があるはずだ。天井板が連結されていなかったら、抜け落ちた 1 本のアンカーボルトに対して 1 枚の天井板が落下するだけで済んだはずだ。

今回のように 345 枚の天井板が落下したのは、フェールセーフの設計思想がなかったためではないだろうか。

この件に関しては、『日経コンストラクション』の特集記事に以下の記述がある¹¹⁾。

「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はずだ。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」

(6) 偏心構造物

調査・検討委員会の資料⁴⁾をもとに事故となったトンネル横断面を図 2 に作成した。天井の上は右側が送気ダクト、左側が排気ダクトに 2 分割されている。そして右側に天井板 A 板、左側に天井板 B 板があり、中央に隔壁がある。A 板は長さが 5.01 m、厚さが 0.08 m、重さが 1.16 t であり、B 板は長さが 5.01 m、厚さが 0.09 m、重さが 1.385 t であり、隔壁は長さが 5.3 m、厚さが 0.1 m、重さが 1.448 t である。

天端に固定されたアンカーボルトにかかる荷重は、隔壁の 1.448 t、A 板 1.16 t の半分と B 板 1.385 t の半分とすると、合計 2.72 t となる。これら 3 枚を道路延長方向に 3 本のアンカーボルトで支えているから、1 本あたり約 1 t の荷重となる。一方、アンカーボルト 1 本は 4 t に耐えられるというから 4 倍の安全設計ということになる。

さて、天井板の A 板と B 板の厚さと重さが異なっていることに疑問を持たれないだろうか。これは L 型に特有な規格であり、M 型、S 型の場合は A 板と B 板は同一のものを使っている (表 3)。

表 3. 天井板の寸法と重量 (概算)

	L 型	M 型	S 型
板長 (m)	5.01	4.6	4
隔壁 (m)	5.3	3.6	2.4
A 板 (t)	1.2	1.0	0.8
B 板 (t)	1.3	1.0	0.8
隔壁 (t)	1.5	0.6	0.4
合計 (t)	4.0	2.5	2.1

天井板から天端までの距離は M 型が 3.6 m、S 型が 2.4 m であり、A 板、B 板、隔壁の重さは L 型に比べて軽い。L 型の天井板を軽くするために送気ダクト側の A 板の厚さを 0.08 m と薄くし、重さを 1.16 t と軽くしたのではないだろうか。これは私の想像である。

このように重さの違う天井板を持つ構造はどう

なるのだろうか。3枚のコンクリート板はCT鋼で固く連結されているので、剛体とみなして重心を計算してみると図6のような偏心構造物となる。重心のずれはB板側に12 cm程度であるが、このずれはアンカーボルトや台座に負荷となっているはずだ。1975年から37年間、アンカーボルトは偏心構造物を支え続けていたことになる。

忘れてならないのは換気による風荷重である。送気ダクト側のA板には1枚あたり1.8 tの荷重が、排気ダクト側のB板にはマイナス1.8 tの荷重がかかり、換気運転のたびにトルク(ねじりモーメント)が働いて、それがアンカーボルトへの負荷になっていないだろうか。

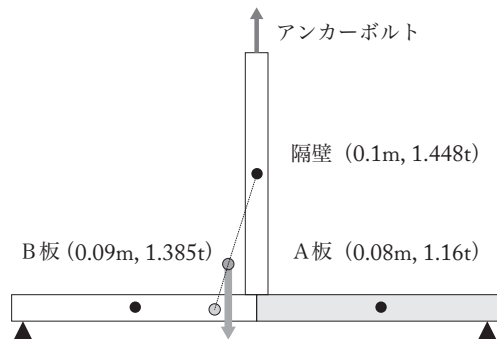


図6 偏心構造物 (重心がずれる)

2 なぜ上り線で事故が起こったのか

国土交通省の緊急点検結果³⁾をもとに笹子トンネルの上り線と下り線について、損傷を比較したのが表4である。点検項目の①アンカーボルトの欠落、脱落、ゆるみ、腐食による断面欠損、②吊金具ボルトの欠損、脱落・ゆるみ、破損・変形、③受台ボルトの欠落、脱落、破損・変形、④覆工コンクリートのアンカーを跨ぐひび割れ、について比較した。

損傷はアンカーボルトに集中していることがわかるが、下り線は上り線に対して損傷が意外に少ないことに気づく。道路延長は上り線が4417 m、下り線が4414 mでほぼ同じ、道路中心線で30 mの距離を並行して走っているのに、同程度の損傷となっていない。30 mずれるだけで地層が急激に変化しているのだろうか。

笹子トンネルはL型、M型、S型の3種類のトンネル断面の連結として設計されている。調査・検討委員会の資料⁵⁾および周佐ほかの論文⁹⁾より、道路延長をこの分類でまとめ、上り線と下り線を比較したのが表5である。この表では、上り線はL型の区間が多く、下り線はM型の区間が多いことがわかる。上り線で大月側のL型は周佐ほか⁹⁾によると1218 mであるが調査・検討委員会⁵⁾では1235 mと17 m長くなっている(図1)。その理由は何であろうか。

そこでアンカーボルトのゆるみ等がトンネルの

表4. 上り線と下り線の損傷の比較

点検項目	上り線	下り線
①アンカーボルト		
・欠落	5	
・脱落	3	2
・ゆるみ	1004	608
・腐食による断面欠損	16	22
小計	1028	632
点検総数	11613	12002
②吊金具ボルト		
・欠損	18	
・脱落・ゆるみ	14	8
・破損・変形	20	2
小計	52	10
点検総数	48914	51428
③受台ボルト		
・欠落	4	
・脱落	1	
・破損・変形	1	9
小計	6	9
点検総数	14238	15096
④覆工コンクリートのアンカーを跨ぐひび割れ	125	19

表5. 断面区分による道路延長(上り線と下り線)

	断面積 (㎡)	上り線 (m)	下り線 (m)
L型	123	2037	1325
M型	97	1888	2534
S型	84	492	555
計		4417	4414

横断面（L 型、M 型、S 型）に起因するのではという仮説をたててみる。

調査・検討委員会の「笹子トンネル（上り線）60 m スパン別アンカーボルトのゆるみ等分布図」⁶⁾ にトンネル縦断面図（図 1）を重ねてみる。事故が起こった上り線の区間（大月側から 1147 m、長さ 138 m）は L 型の区間であり、アンカーボルトのゆるみ等がもっとも大きく仮説と一致する。しかし甲府方の 802 m は L 型にもかかわらず、アンカーボルトのゆるみがほとんどない。

この仮説が成り立たないのかと気落ちしながら別の資料を調べてみる。「笹子トンネル（上り線）のアンカーボルトの補修履歴」⁶⁾ により謎が氷解した。「甲府側坑口から約 800 m 区間のアンカーボルトには、建設時に通常区間よりも径が太い M20 が使用されている」⁶⁾ ということだった。設計では径が 16 mm（M16）のアンカーボルトで指示していたが、施工担当者はこれでは保たないと判断して径を 20 mm（M20）に変えて施工していたのである。

M16 は、明らかに設計ミスであり、現場の正しい判断だったといえよう。

完全な立証はできていないが、アンカーボルトのゆるみ等は L 型断面に起因するという仮説はまだ生きている。

3 なぜ大断面トンネルが必要だったのか

では、なぜ大断面のトンネルを作る必要があったのだろうか。周佐ほか⁹⁾の論文を頼りに設計者の意図を読み取っていかう。

「笹子トンネルは上下線同時施工で、その延長は上り線 4417 m、下り線 4414 m、道路トンネルとしては現在施工中の中央自動車道西宮線のうち、恵那山トンネル（延長 8476 m、2 車線施工）に次ぐもので、その断面は換気上の必要面積より S 断面、M 断面、L 断面の 3 断面に分割し、そのうち L 断面は 140 m² の大きな断面となっている」

「換気方式としては横流換気、横流と半横流の組合せ方式、半横流換気の三つに大別されるが、本トンネルでは種々比較検討し、4,420 m という長大

トンネルの換気にできるだけ安全性をもたせるとともに、火災時の排煙を効果的に行い、トンネル内の人々が避難しやすい横流換気方式が採用された」

「排気能力としては設計交通量 1820 台 / hr（昭和 80 年度推定交通量 2 万 6000 台 / 日）に対するものを考え、上り線 965 m³ / sec、下り線 716 m³ / sec の換気風量を計画している」

長大トンネルの換気方式として横流式を採用したため、換気ダクトの必要性から大断面となったのである。

1975 年当時は横流式が主流であったが、1985 年の「道路トンネル技術基準」では、①換気装置を付属構造物としてとらえるのではなくトンネル全体計画の中に位置づけること、②縦流式の拡大を図ることとなっている¹²⁾。そして、現在のトンネルはほとんどが縦流式である。

上り線と下り線の排気風量の違い 965 m³ / sec、と 716 m³ / sec は、L 型の区間延長に比例している。上り線が下り線に対して L 型の区間が長い理由はここにある。

では、換気風量の違いはどこから来るのだろうか。それは上り線と下り線の交通量の違いというより、西坑口（甲府側）と東坑口（大月側）の標高差の違いのようである。

上り線は甲府側の標高 640.7 m から始まり、大月側の標高 678.2 m で終わるので、37.5 m の上昇となる。下り線は大月側の標高 668.2 m から始まり、甲府側の標高 651.6 m で終わるので、16.6 m の下降となる。やや急な上昇とゆるやかな下降が、換気風量の違いになっているようだ。

4 恵那山トンネル、関門トンネルではなぜ事故が起らなかったのか

ふたたび周佐ほか⁹⁾の論文から引用する。

「わが国で完全横流換気方式を採用しているのは現在日本道路公団で有料道路として営業している関門トンネル（2 号線）と現在建設中の恵那山トンネル、笹子トンネルのみである。恵那山トンネルについては補助トンネルを設け、送排気するものであり、笹子トンネルは関門国道トンネルと送排風

ダクト位置の相違はあるが、相似かよった形式で、立坑により送排気を行い、トンネル本体の上部に仕切板を設け、送排する形式を採用している」

この時代の主流であった横流換気方式を採用した3トンネルのうち、恵那山トンネル（1975年、8489m）と関門トンネル（1957年、3351m）で、なぜ笹子トンネルと同様の事故が起こらなかったのだろうか。

国土交通省の緊急点検結果³⁾では、恵那山トンネルの損傷は、吊金具の保護コンクリートひび割れ（1箇所）、補強部材ベースプレートの浮上がり（1箇所）、受台のコンクリート剥離（4箇所）、覆工コンクリート遊離石灰・ひび割れ（2箇所）の合計8箇所であり、関門トンネルは異常なしであった。損傷が少ない理由は以下のように考えられる。

恵那山トンネルは、笹子トンネルと同様に天井板に1枚1トン以上の重いCO板を使用し、吊金具は1本で支持しているが、次の点で異なる¹³⁾。

- (1) 断面が全区間同じであり、L型断面がない。
- (2) 送気ダクトに補助坑（補助トンネル）を用いているため、換気ダクトのスペースが少ない。
- (3) 吊金具の取り付け位置が天端を外している。
- (4) 天井板から天端（アンカーボルトの定着場所）までの距離が短い（2.1m）。

また、関門トンネルは、2009年のリフレッシュ工事により、次の点が改良されている¹⁴⁾。

- (1) 吊金具は3本で支持している。
- (2) 天井板から天端までの距離が短い（1.5m）。
- (3) 軽量のCO板を使用（板厚6cm）。

おわりに

周佐ほか⁹⁾は、論文の最後に「しかし、わが国の山は地質的に非常にもまれていたため、今後このような大断面の施工は問題があると思う」と述べている。設計者自身が「問題があると思う」と述べているところが興味深い。

小林一輔は『コンクリートが危ない』¹⁵⁾で、『日経コンストラクション』の投書記事「橋が一斉に壊れる日がくる」を引用しながら「コンクリート構造物の破壊は2005～2010年」と予測してい

る。今回の笹子トンネル事故を予測していたかのようである。このような実感は、施工担当者、技術者、設計者は誰も持っていると思われるが、大多数の国民は知らない。

笹子トンネルの天井板は事故以来すべて撤去され、ジェットファンによる縦流換気方式となった。恵那山トンネルは、6月20日から天井板を撤去する予定である。横流換気方式、大断面トンネル、天井板などはいわば大掛かりな実験装置であったわけで、古くなった実験装置をいつまでも実用化せず、早急に撤去すべきであり、実態を一番よく知っている科学者・技術者の発言、ならびに社会的責任は大きいと考える。

謝辞：日本科学者会議の小林芳正氏にお礼を申し上げます。

引用文献

- 1) 西山豊「曲線の文化と直線の文化」『理系への数学』**40** (1), 57-60, (2007)。
- 2) 岩崎好規, 橋本正, 今西肇, 山内淑人「トンネル覆工のひび割れ調査とその発生原因の推定」『トンネル工学研究発表会論文・報告集』第1巻, 223-228, (1991)。
- 3) 国土交通省「中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故を受けた緊急点検結果」2012年12月13日, 2013年1月9日。
- 4) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会「資料1～資料6」第1回会合(2012年12月4日)。
- 5) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会「資料1～資料8」第2回会合(2012年12月21日)。
- 6) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会「資料1～資料4」第3回会合(2013年2月1日)。
- 7) 国土交通省「あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針」平成18年5月, (2006)。
- 8) 会計検査院「高速道路等のトンネル新設工事におけるアーチ部覆工コンクリート等の施工について処置を要求したもの」51検第458号, 昭和51年11月29日(1976)。
- 9) 周佐光衛, 岸寛「中央自動車道西宮線笹子トンネル施工概要」『建設の機械化』No.296, 26-31, (1974)。
- 10) 地震調査研究推進本部「山梨県地震」文部科学省研究開発局地震・防災研究課(2013)。
- 11) 編集部(真鍋政彦)「笹子の衝撃・七つの教訓」『日経コンストラクション』1月28日, 第560号, 24-42, (2013)。
- 12) (社)日本道路協会『道路トンネル技術基準(換気編)・同解説 技術基準』昭和60年12月(1985)。
- 13) 恵那山トンネル工事誌編さん委員会『恵那山トンネル工事誌』日本道路公団名古屋建設局, (1977)。
- 14) 小林康範, 棟安貴治「関門トンネルリフレッシュ工事(天井板更新)」『建設の施工企画』20-23, (Nov. 2009)。
- 15) 小林一輔『コンクリートが危ない』(岩波新書, 1999)。

(にしやま・ゆたか：大阪経済大学, 数学)