



西山 豊

数学を楽しむ

笹子トンネル事故の数理 (2)

(5) フェールセーフ

国土交通省は、天井板を保有する全国の61トンネルについて緊急点検を実施した[2]。このデータを表計算ソフトに入力して分析するとつぎのことが分かった。

天井板を何本のアンカーボルトで支えているかという質問項目については、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本～5本で支えているというのは約8割で、ここに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、天井板からアンカーボルトの定着部までの距離についての質問項目では、1m以上2m未満が21トンネル、2m以上3m未満が29トンネルであり、50トンネル(約8割)が3m未満におさまっている。笹子トンネルのL型断面区間では5.3mもあり、5mを超えるトンネルは笹子トンネルだけであった。天井板から天端までの距離5.3mは、道路から天井板までの距離4.7mを超えていて、計11mの超大断面となっている(図4)。

天端までの距離が大きくなればなるほど隔壁が大きく、分厚く、重くなっていく。それだけアンカーボルトへの負担も大きくなっていく。また5.3mという距離は定期点検には適さない距離でもある。天井板の上部は暗闇であり、5.3m離れた天端に懐中電灯を照らして目視検査が十分にできるだろうか。きちんと点検するためには足場

を組む必要があり、費用のことを考えて定期点検が見送られたのではと想像できる。

さらに、天井板が連結されている構造は無視できない。天井板2枚と隔壁1枚の合計3枚は、下部CT鋼と上部CT鋼で連結されている。この3枚は道路延長方向に5組が連結されている[3]。笹子トンネル上り線のアンカーボルト11,613本のすべてが同時に抜け落ちることはない。かならず時間差があるはずだ。もし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する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枚の天井板がドミノ方式で落下したのは、フェールセーフの設計思想がなかったためとも考えられる。

(6) 偏心構造物

事故となったトンネル横断面図を注意深く見つめると面白いことがわかる(図4)。右側に天井板A板が、左側に天井板B板が、中央に隔壁がある。A板は長さが5.01m、厚さが0.08m、重さが1.16tであり、B板は長さが5.01m、厚さが0.09m、重さが1.385tであり、隔壁は長さが5.3m、厚さが0.1m、重さが1.448tである。天井板のA板とB板は重さが違うのである。どうして違うのだろうか。どうして違う必要があるのだろうか。

この理由を知るためには、M型またはS型の断面での天井板の規格を知るとよい。M型、S型は天井板A板とB板の区別がなく左右同じものを使っている。M型の場合は、天井板の長さが4.6m、厚さが0.07m、重さが1.0tであり、

隔壁は長さが3.6m、厚さが0.06m、重さが0.6tであり、計2.5t(概算)である。S型の場合は、天井板の長さが4m、厚さが0.07m、重さが0.8tであり、隔壁は長さが2.4m、厚さが0.06m、重さが0.4tであり、計2.1t(概算)である。

L型の場合は、天井板の長さが5.01m、隔壁の長さが5.3mとM型に比べて大きくなるため、強度を保つため厚みが0.09m～0.1mの必要があり、結果として全体の総重量が大きくなってしまふ。コンクリート板の厚さは0.07m、0.08m、0.09mと規格で決まっているのだろう。0.085mなどのものは作れない。それで苦肉の策として、送気ダクト側のA板の厚さを0.08mと薄くし、重さを1.16t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計算してみると図8のような偏心構造物となる。重心のずれはB板側に12センチ程度であるが、このずれはアンカーボルトや受け台に負荷となっているはずだ。アンカーボルトには反時計回りのトルク(ねじりモーメント)がかかるのではないだろうか。1975年から37年間、偏心構造物を支え続けていたことになる。

また、換気による風荷重が問題となる。送気ダクト側には1枚あたり1.8tの荷重が、排気ダクト側にはマイナス1.8tの荷重がかかり、換気機器が稼働するたびに時計回りのトルクが働いて、それがアンカーボルトへの負荷になっている。

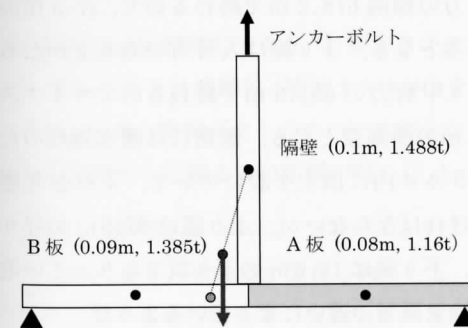


図8. 偏心構造物(重心がずれる)

3. なぜ上り線で事故が起こったのか

笹子トンネルの上り線と下り線について、損傷を比較してみた。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と少ないことに気づく。アンカーボルトのゆるみは、上り線の1004箇所に対して下り線の608箇所であり、吊金具ボルトの不具合は、上り線の52箇所に対して下り線の10箇所である。

道路延長は上り線が4417m、下り線が4414mでほぼ同じで、上り線と下り線は道路中心線で30mの距離を並行して走っている。同程度の損傷となってもいいはずなのに、損傷は上り線に集中している。30mずれるだけで地層が変化し、トンネルの受ける影響が違ってくるだろう。

笹子トンネルの上り線と下り線の道路延長をL型、M型、S型の区間で分類すると表1となる。この表から上り線は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。

そこでアンカーボルトの損傷がトンネルの横断面(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)60mスパン別アンカーボルトのゆるみ等分布図」[3]にトンネル縦断面図(図3)を重ねてみる。天井板崩落の区間(大月側から1147m、長さ138m)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802m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。

資料を詳しく見ると「甲府側坑口から約800m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」ということだった[3]。設計では直径が16ミリ(M16)のアンカーボルトを指示していたが、施工担当者は16ミリでは重い天井板は保たないと判断して、直径が20ミリ(M20)のアンカーボルトに変えて施工していたようである。この事実は、事

故後の緊急点検で初めて明らかになったのとことである[3].

アンカーボルトにかかる荷重は、隔壁の1.448t, A板1.16tの半分とB板1.385tの半分とすると、合計2.72tとなる。3枚のコンクリート板が約3tであるとする、1枚あたり1tの重さとなる。直径16ミリのアンカーボルト1本は4tに耐えられるから4倍の安全設計ということになるが、16ミリのアンカーボルトが引き抜かれたのであるから、これは明らかに設計ミスである。

表1. 断面区分による道路延長

	断面積(m ²)	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

4. なぜ大断面トンネルが必要だったのか

では、なぜL型という超大断面のトンネルを作る必要があったのだろうか。周佐ほかによる笹子トンネルの施工概要にはつぎのような説明がある[4].

「本トンネルでは種々比較検討し、4420m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」

「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140m²の大きな断面となっている」

「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26000台/日)に対するものを考え、上り線965m³/sec、下り線716m³/secの換気風量を計画している」

ここで、換気方式の縦流式と横流式について説明しておこう。縦流式は、トンネル坑口や中

間部で直接車道に新鮮な空気を供給したり、排気したりする方法で、車道内の空気はトンネル内を縦断方向に流れる。換気ダクトが不要なためトンネル断面を小さくでき、コスト面で有利となるが、交通量や自然風の変動を受けやすい。

横流式は、新鮮な空気を換気ダクトから車道に一樣に供給するとともに排気する方法である。送気と排気の両方のトンネルダクトを有し、車道内空気はトンネル断面を横断方向に流れる。換気ダクトを必要とするためコスト面で不利となるが、交通量や自然風に影響されない最も安定した換気方式である。

1975年当時は横流換気方式が主流であったが、1985年に改訂された「道路トンネル技術基準」では、換気ダクト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、そして縦流換気方式の拡大を図ることを推奨している。現在のトンネルのほとんどは、縦流式が採用されていて、笹子トンネルの横流式は過去の換気方式となっている。

上り線と下り線の換気風量の違いは、L型区間の道路延長の違いとなる。上り線が下り線に対してL型の区間が長く、事故の可能性が大きい理由はここにある。では、換気風量の違い(965m³/secと716m³/sec)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、甲府方と大月方の標高差の違いのようである。

上り線は甲府方の標高640.7mから始まり、大月方の標高678.2mで終わるので、37.5mの標高差となる。下り線は大月方の668.2mから始まり甲府方の651.6mで終わるのでマイナス16.6mの標高差となる。厳密には湧水処理のためトンネル内に頂上を設けていて、それを考慮しなければならないが、上り線は37.5mの昇り坂で、下り線は16.6mの下り坂であり、この違いが換気風量の違いになっているようだ。

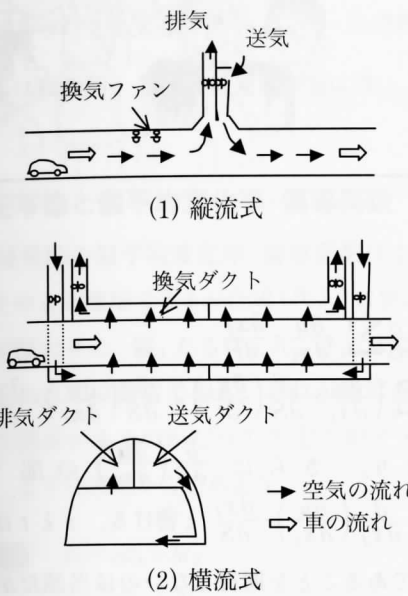


図9. 換気方式(縦流式と横流式)

5. 恵那山トンネル、関門トンネルでは

なぜ事故が起こらなかったのか

天井板の構造を持つ61トンネルのうち横流換気方式を採用しているトンネルに、恵那山トンネル(1975年, 8489m)と関門トンネル(1957年, 3351m)がある。国土交通省の緊急点検結果では、恵那山トンネルの損傷は8箇所のみであり、関門トンネルは異常なしであった。笹子トンネルと同様な事故が起こらなかった理由として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、

- (1) 断面が全区間同じであり、L型がない。
- (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) 天井板から天端までの距離が短い(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。

- (1) アンカーボルトは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6センチ)。

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。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あるとされているが、施工ミスだけでなく設計ミスであったと思う。設計ミスでなかったとしても、横流換気方式の大実験装置であったわけで、排気ガス規制法により自動車が改良され公害が少なくなった現在、このような装置は必要でなくなっている。古くなった実験装置は事故の起こる前に撤去すべきであった。

第5回事務調査委員会(5月28日)の配布資料12によると、事故の区間は建設時から「特殊区間」として位置づけていたようで、243箇所直径24ミリ、長さ2550ミリのロックボルトが追加されていたという記述がある。ロックボルトとは、岩盤壁面の崩落を防ぐためのもので、天井板だけでなく覆工コンクリートも崩落の危険があったと思われる。

また、資料4では、天井板を支えるアンカーボルトの直径が、設計時と施工時で異なっている。直径12ミリを直径16ミリに、直径16ミリを直径20ミリに変更して補強しているが、事故の区間だけが変更されていず、それが事故につながったとも考えられる。

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] 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
- [3] トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会「配布資料」第1回(2012年12月4日); 第2回(12月21日); 第3回(2013年2月1日); 第4回(3月27日); 第5回(5月28日)
- [4] 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)

(にしやま ゆたか/大阪経済大学)