

西山豊「笹子トンネル事故の数理」『現代数学』（投稿中）を読まれた本多弘司さまのご質問とご意見（黒字）に対する、西山の回答（青字）です。

1 西洋の石の文化・石積みは木造と違い、窓枠などアーチで組まれているなどと紹介されています。それは上からの圧力を上手く分散し、柱、壁に伝える技術だと思います。そのことと今回のトンネルの構造との関連が不明です。名古屋大学の研究会の時に、どなたかトンネルのコンクリートに山の圧力は加わらない、落下物の防止が主な役割などと言われていました。

天端がネックになっていることの説明

(1)

西洋建築の門や窓がアーチ状になっているのはご存じのとおりです。

天端に大きめの石（要石）がはめられているのもご存知かと思います。

要石がない門や窓が、天端から崩れ始めている光景を私は何度も見てきました。

アーチ状にせずに、水平にレンガを組んでいる窓で、中央から崩れ出す写真もあります。

(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』1991年12月 第1巻、223-228

この論文の図一9は、天端が内側に開く例です。落下物によるためです。

以下、私設サイトをご覧ください。すべての資料が入っています。

<http://www.geocities.jp/ma85003/index.html>

(3)

2月22日の名古屋大学での会合では、天端が開くのは外側であり（側壁部の岩圧）、落下物を防止さえすれば、通常はこのようなことは起こらないとコメントを受けました。

(4)

天端が開くのは、天端の内側か外側かを小林芳正さまとしばらく議論しました。

小林さまよりヴァチカン美術館のタイロッドを教えてくださいました。

<http://www.geocities.jp/ma85003/elegant/img1.jpg>

これは天端が内側に開くのを防止する工夫と思われます。

(5)

土木学会・トンネル工学委員会「新潟県中越沖地震調査特別小委員会報告書」委員長・朝倉俊弘 2008年1月 25ページ 中越沖地震（2007年7月16日）

ここには、天端の外側が開く例があります。地震の横揺れにより、側壁部の岩圧によりアーチ部の天端の外側が開き、内側の覆工コンクリートの破片が落下したと思われます。

(6)

どちらにしても天端が、損傷が起こりやすいと考えていいのではないのでしょうか？
アーチ状は何も吊るさない状態で安定しています。
安定しているから、どこに何をぶらさげてもいいということにはならないと思います。
アーチ状でなくても、梁のたわみは中央部がいちばん大きく、中央に何かをぶら下げるのは構造上問題があると思うのです。

2 設計から施工まで、発注者から請負者と流れがあります。姉齒構造計算偽装の件で、半田市にあるホテルが建築確認を審査する愛知県を訴えましたが敗訴しました。私は県、設計者、施工者にそれぞれ過失責任があるという考えでした。背景にはアメリカからの規制緩和があります。

さて、本件では①施工に欠陥があったことも事実だと思います。

そう思います。

しかし、すべて施工に責任があると決めつけるのも間違っていると思います。
設計ミスがあって、施工がカバーした例を示します。

（上り線）甲府側の坑口から 802m の L 型断面区間で、当初 M16（16 ミリ）のアンカーボルトを指示されていたところ、実際に天井板を設置しようとしたところ、これでは保たないと判断して M20（20 ミリ）のアンカーボルトに変更しています。これは施工担当者の判断で設計変更をさせたのだと思います。

・資料 2－3 笹子トンネル（上り線）のアンカーボルトの補修履歴

<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/tunnel/pdf/25.pdf>

トンネルのコンクリートが上手く打設できていなかった、定着長さが取れなかったことが考えられます。

天端のコンクリート巻き厚が不足でアンカーの打ち込み不足も考えられます。打ち込み深さは強度に大きく影響します。

覆工コンクリートと大断面の関係

会計検査院はトンネル完成後の 1976 年に、笹子トンネル（西工事）に、覆工コンクリートの巻き厚不足があったことを指摘しています。

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」 昭和 51 年 11 月 29 日（1976 年） 51 検第 458 号 日本道路公団総裁あて

巻き厚不足は、アンカーボルトを施工する場合の、深さ（定着長）に関係します。会計検査院の指摘は、巻き厚不足が見つかったというだけで、どの箇所で、どの程度巻き厚不足があったかの報告がありません。これは、今後の原因を解明していく点で重要な柱となります。

覆工コンクリートの巻き厚不足がなぜ起こったのか。
単純に考えれば、覆工コンクリートの施工ミスであり、施工を担当した業者が悪い、それを監督すべき道路公団（当時）が悪い、ということになるでしょう。
おそらく、生コンに加水して作業をはやく終わらせたのでしょう。または、生コン以外にゴミやがらくたを掘りこんだのかもしれません。このあたりの話しは、
小林一輔 『コンクリートが危ない』 岩波新書 1999 年 230 ページ
に詳しく載っていました。

しかし、生コンの施工業者に責任をすべて負わせることができるでしょうか？

笹子トンネルに特有な L 型断面の寸法を提示します。
道路面から天井板までの距離は 4.7m です。天井板から天端までの距離は 5.3m です。
天井板の幅（道路幅）は、左右ともに 5.1m です。

天井板が撤去されるまでは、天井板の上にまさかこんな大きな空間（断面）があったとは、誰も信じられなかったと思います。道路延長が 8489m で笹子トンネルの 2 倍もある恵那山トンネルの場合は、天井板から天端までは 2.1m です。天端までの距離が 5m を超えるのは笹子トンネルだけです。5.3m という距離がすべてに関連していると、私は考えています。

覆工コンクリートは既製のものを搬入するのではなく現場でコンクリートを打設しているようです。「12m のスライドセントルを使用し」とありますので、12m 単位で生コンの注入作業が行われたと思われます。

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」 1974 年 10 月 No. 296, 26-31
29 ページ、左側、上から 10 行目

それで、半径が 5.3m のアーチ部で、設計の巻き厚 0.55m の生コンを打設する状態を考えてください。（恵那山トンネルほかの半径や巻き厚は、笹子トンネルの約半分です。）
打設する生コンの量は普通の 3～4 倍になるのではないのでしょうか？

この巻き厚で均一なアーチ部を作ることは相当難しかったのではないのでしょうか。打設の時間もかかるし、固まるのにも時間がかかるし、重力の関係で、天端にあった生コンが左右に流れ、頂上部の巻き厚が設計を満たしてなかった、ということは十分に想像が付きまします。

笹子トンネルのアーチ部の覆工コンクリートの巻き厚を国土交通省に明らかにさせる必要がありますが、“恐ろしくて”出せないのではないのでしょうか？道路公団は知っているはずですが。ただ公表しないだけです。

施工時に巻き厚不足があっても、コンクリートは乾いてしまえば修理が効かないので、巻き厚不足のままの現在があると考えられます。

覆工コンクリートのアーチ部をコンクリートだけではなく、鉄筋にすればトンネルがもっと強固になるのではと考えられますが、トンネル内は湧水が多く、湧水が鉄筋を酸化させコンクリート崩壊につながるので、鉄筋はつかわずコンクリートだけでアーチ部を作っているようです。石組による西洋のトンネルと比べると、コンクリート製の日本のトンネルは強固さにおいては雲泥の差があります。

覆工コンクリートの施工ミスを防ぐために、外でしっかりした設計通りの覆工を作っておいて、トンネル内に搬入すればよいのでは、という考えもありますが、重くて搬入が難しいうえ、また、トンネルの掘削は場所により、山の状況により一律ではないので、現場での生コンの打設になっているようです。海底トンネルのように掘削がともなわない場合は、別の場所で作っておいて搬入されているようです。

アンカーはトンネルの吊り下げのため後追い工事しかできません。住宅建築の基礎工事の場合は、コンクリート打設後にL型のアンカーをいれます。その時は引き抜きの力を考慮し、コンクリートとの定着長さを検討します。また、腐食防止のための被り厚さが計算外の規定であります。

アンカーボルトと大断面の関係

アンカーボルトの施工ミスとして、つぎのようなことが考えられます。
L字のアンカーを埋め込むか、鉛直方向ではなく斜めに差し込んでいたなら、抜けおちなかったのではないか。
まず、トンネル本体が完成したあとに。天井板の設置の工事が始まるという流れになっているので、L字のアンカーを埋め込むということはできません。

また、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対象外にしている」ので、笹子トンネルのような使い方は現在、禁止されています。

L字アンカーを埋め込めないなら、せめて斜めに打ち込めばよかったのにと考えられますが、どうして鉛直方向に打ち込むように設計したのか、私にはわかりません。

このようにして、L型断面（天井板から 5.3m の距離）の天端にケミカル・アンカー（M16、半径が 16 ミリ）を鉛直方向に埋め込む作業を施工担当者は指示されたことになります。

アンカーボルトは下方向、あるいは水平方向に埋め込むのはよく聞きますが、鉛直上方向（真上に）埋め込むのは、無理な作業体勢であるので、作業が困難であることが予想されます。また、ケミカル・アンカーは十分に試験結果が出されたものではなく、施工担当者の国家試験もなかったと思います。

施工担当者はいわれるままにアンカーの埋め込み作業を行ったことでしょう。コンクリートのことから、やり直しはききません。ケミカルは鉛直上方向に充填したとしても重力の関係で垂れ下がってきます。埋め込み部分の寸法不足が起こることは私のように工学に素人なものでも十分想像が付きまします。

これらの事情を考慮して、施工担当者の施工ミスだけで済ませるのは、どうでしょうか。私は、無理な施工を担当者に要求した、設計者にも責任があるのではと考えています。

アメリカで橋が落下したように、日本の建築物・構築物の点検は必要だと思います。建築については耐震が騒がれていますが、消防法のように耐震基準を遡及適用させ、車のように車検制度を義務付ける必要があると考えます。中古マンションの販売も耐震診断証明書を義務付けるべきだと思います。

④コンクリートは劣化します。ひびが入ると水が浸入し、中の鉄筋が爆裂で破壊されることもあります。これらの点検は日常的に行われるべきで、黙視ではすまされません。点検マニュアルがどうなっているかも問題です。

点検に向かない大断面構造

管理点検ミスは明らかだと思います。

笹子トンネルと同じ天井板の構造を持つ 61 トンネルの他のトンネルは 2 年または 1 年の定期点検が実施されています。笹子トンネルだけが 2000 年に定期点検が実施されて以降、事故の起こる 2012 年まで、10 年以上に渡って点検がされていません。点検マニュアルもあ

りません。

では、なぜ管理点検ミスを引き起こしたのでしょうか。中日本自動車道路の管理者が管理マニュアルも作らず、怠慢だったということですが、私は別の見方もしています。

大断面トンネルであるため、点検には天井板設置時と同様の大掛かりな足場を組む必要があります、そのためには多くの時間と人が必要なので、点検コストの面から点検が見送られた可能性があるのではないのでしょうか。

大断面トンネルは定期点検に向かない構造であったということで、これも設計ミスのひとつに考えています。

アンカーボルトの安全計算は、②設計時に計算がされているのでしょうか？

コンクリートパネルの荷重が約 1 t とありますが、全てアンカーに負担させたのでしょうか。パネルの両端で固定支持されているのでそこに負担過重が伝わると思います。大スパンのためたわみ防止など、補強的にアンカーをとったことも考えられます。

アンカーの強度計算はどのようにされたのでしょうか？偏心荷重は考慮されていないのでしょうか。安全率をどの程度とったのでしょうか。

アンカーボルトにかかる力と安全率

「1 トンの天井板を 1 本のアンカーボルトが支えている。アンカーボルトは 4 トンに耐えられるから 4 倍の安全設計である」とするのは話をわかりやすくしているためであり、実際は以下のようになっています。ちょっと複雑です。

「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 5.01m、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 1.448t、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。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 1t の荷重となる。一方、アンカーボルト 1 本は 4t 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。」

上の計算は、下記の 30 ページを参考にしました。

編集部「笹子の衝撃・七つの教訓」『日経コンストラクション』 2013 年 1 月 28 日 第 560 号、24-42

天井板 A 板、B 板、隔壁の 3 枚が CT 鋼で固定されていますが、これを支えるのは天端のアンカーボルト、側壁部左右の台座（受け台）です。

原理的にはアンカーボルトなしで、左右の台座だけで持たせるという方法も考えられます。61 トンネルの中には、アンカーボルトなしが 1 トンネルありましたが（国道 13 号、西栗子（にしくりこ）トンネル、両端支持）天井板の長さが 7.1m、重さが 355kg/枚と軽量でした。

<http://www.mlit.go.jp/common/000232680.pdf>

このように、3.993t を半分ずつ（2t）受け持つという考え方も成り立ちますが、天井板の長さが 5.01m X 2 =10.02m にもなりますし、4t もありますので、中央が大きいたわんでしまうのでアンカーボルトが補助ではなく、やはり 2.72t の荷重があると考えた方が正しいです。アンカーボルトは補助的ではありません。

設計のチェック機能はあったのでしょうか。建築の場合は民間の建築物は確認で審査しますが、公的な建築物は所管官庁の責任で素通りとなっています。

③設計指針にも問題があると思います。当時の車の排ガス、火災などから、トンネルは換気が命のように聞いていました。当時の設計時の条件、技術から、当初の工法が止むを得ない面もあるかと思っています。

コンクリートは圧縮には強いですが、引張力や曲げ圧力に弱いです。そこで鉄筋と組み合わせられました。長いスパンの場合はコンクリートの自重が重くなります。従って、パネルなどはプレストレス・コンクリートも使われます。

パネルを隣と接続させたのは、ご指摘のとおり理由がわかりません。コンクリートでなくアルミとか鉄板などのパネルはだめだったのでしょうか。

天井板をもっと軽くできなかったのか

NHK のクローズアップ現代（2012 年 12 月 3 日）を見ると、とにかく当時は高度成長期で作ればよいということで後先を考えていなかったようです。設計者、技術者の反省の弁がありました。

http://www.nhk.or.jp/gendai/kiroku/detail_3282.html

排ガスに対する換気がトンネルの命のようだったようで、それは恵那山トンネルの工事誌にもうかがえます。恵那山トンネルは立派な工事誌が残っているのですが、笹子トンネルは工事誌も技術論文もほとんどありません。

天井板の重さより、とにかく火災に強く、頑丈なものを優先させたようです。

関門トンネルではアンカーが1本から3本に、板を8から6cm（あるいは軽量コンクリート）に改修したとありますが、現工法の非を認めものと思われます。残念ながら事故が起きないと改善されないことも問題です。

そういうことですね。

笹子トンネルにも天井板撤去計画があった

事故調査・検討委員会の資料によれば、天井板を撤去してジェットファンを設置し、横流式から縦流式に換気方法を変える計画があったそうです。

政治の混乱期・空白期、東日本大震災のためにすべてが先送りになってしまったようです。民主党が政権をとろうが、自民党が政権をとろうが、国民生活を守るために、政権や政治と関係なく国土交通省の官僚や職員は国民のために働いてほしいと思います。

当然、事故が起きて死者が出たのですから、結果的に管理責任は大きいと思います。従って、遺族の立場に立てば、まず施工ミスと管理責任を問うのは妥当かと考えられます。それから、設計、施工、管理と原因究明を広げればいいのではないのでしょうか。

本多さまはご遺族（原告）対中日本道路公団、国土交通省（被告）という関係でとらえられているようですが、私は、裁判以前の問題として、国自らが原因究明して国民に説明する義務があると考えています。運動論の違いはあるかもしれませんが、原因解明という点では一致できますので、ひきつづきご議論のほどよろしくお願いします。

まだまだ、説明しなければならないことが多くありますが、『日本の科学者』7月号の拙稿（校正ゲラ）をご覧になり、漠然とではなく、議論すべきところをもう少し絞ればいいのかと思います。

拙文に読みづらい点が多々あるかと思われますが、とにかく議論すべきことが多すぎるので、それに免じてください。

以上