

アンカー群への信頼性評価に基づくトンネル天井板のモデル提案

中央大学 学生員 ○山田 浩隆
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

2012年12月、山梨県に位置する中央自動車道上り線笹子トンネルにおいて、天井板の落下事故が発生した。トンネル内では345枚の天井板が138mにわたって落下し、死亡者が9名、重軽傷者が2名となる大惨事となった。同様の事故が2006年7月にアメリカ、ボストンのレッド・ウィリアムズトンネルにおいて発生したが、こちらは10枚の天井板が落下し、死亡者が1名のみであった。

このような対照的な結果になった原因の1つとして、天井板の設計に問題があったとされている。笹子トンネルは図-1¹⁾(1)にあるように天井板をまたいで隔壁を設置し、すべての天井板が連結された設計になっていた。対して、レッド・ウィリアムズトンネルは図-1(3)のように天井板をまたいで隔壁が設置されていない。つまり、笹子トンネルの設計ではどこか1ヶ所でも破壊した場合、天井板が連結されているため、続けざまに破壊していく。それに対し、レッド・ウィリアムズトンネルの設計は1ヶ所が破壊しても、天井板が連結されている小規模の範囲のみで破壊を収められる。このような設計の違いにより、結果的に笹子トンネルの事故はレッド・ウィリアムズトンネルの事故より被害が大きくなったとされている。

本研究では、笹子トンネルにおいて事故発生きっかけとみられているアンカーの接着の劣化をもとに図-1(3)のひとユニットの天井板が、崩落するまでの挙動を追うためのモデルを提案することを試みた。

2. 笹子トンネルの構造

笹子トンネルの構造は図-2²⁾のように、掃気側・排気側の天井板5枚ずつ、計10枚と上部の空間を隔壁板5枚で掃気側・排気側に分割しており、これを上下ともに6mのCT鋼で連結している。この6m当たりのCT鋼を16本の接着系アンカーで吊り、これらを隣り合う隔壁板で連結している構造である。また、その施工方法はコンクリート壁に孔を作りその中に接着剤カプセルを装填し、そこにボルトをねじ込むことでカプセル内の樹脂がボルトのねじ部や削孔面に接着して硬化し、ボルトとコンクリートを物理的に固着するというものであった。

3. 研究手法

天井板の力学挙動を考えるにあたり、本研究では接着剤の強度と天井板の死荷重に焦点を当てることにした。時間の経過による劣化と共に変化する力の挙動はダニエルズモデルを用い、接着剤が破壊し、

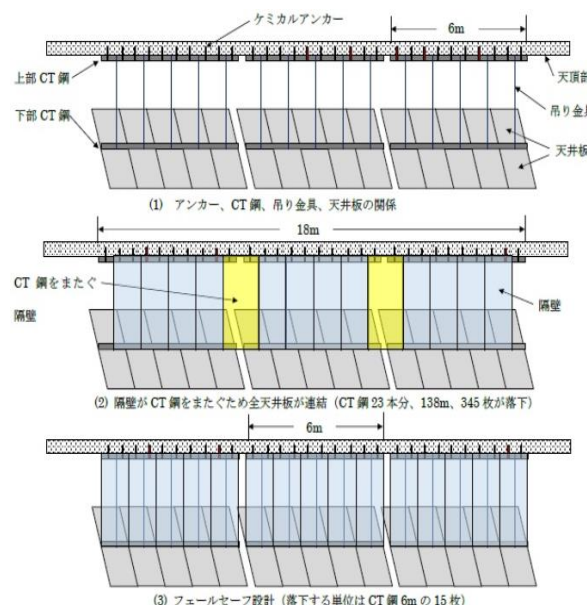


図-1 天井板トンネルの構成部材 (1)

笹子トンネルの天井板の構造 (2)

レッド・ウィリアムズトンネルの天井板の構造 (3)

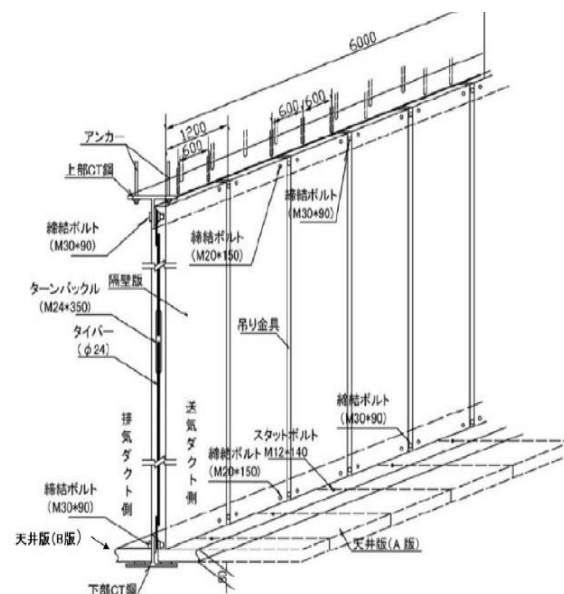


図-2 笹子トンネルの構造

天井板全体が崩落するまでをモンテカルロ法によりシミュレーションを行うことにした。仮に16本のアンカーの中に極端に劣化の進んだものがあり、これ

キーワード トンネル天井板, 接着系あと施工アンカー, クリープ, モンテカルロシミュレーション

連絡先 〒251-0042 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 TEL:03-3817-1816 E-mail:a14.xhk5@g.chuo-u.ac.jp

が抜け落ちたとしても、他のアンカーの耐力に余裕が残されていれば荷重再分配が可能である。ダニエルズモデルはこうした荷重分配プロセスを追うのに適した方法である。

3.1 接着剤の強度

接着系アンカーの強度は初期強度と経年劣化により影響を与えるもののほかに、接着剤樹脂の加水分解による劣化などが考えられる。しかし、日本では長期的なアンカー強度の変化や接着剤の化学変化に関する知見は確認できず、すべての劣化を考慮することは難しい。そのため、本研究では持続荷重による経年劣化のみを考えていくものとする。

持続荷重による経年劣化を考えるに当たり、接着剤アンカーのクリープ試験を行った論文³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾を収集し、これらに紹介される実験データを抽出した。集めたデータをまとめたものが図-3である。横軸はアンカーが破壊に至るまでの予想時間であり、縦軸が荷重レベルである。ここで、荷重レベルとは作用荷重を静的耐力で除した値である。

この抽出されたデータから、荷重レベルの範囲ごとに平均・分散・標準偏差を求めた。(表-1)

3.2 ダニエルズモデル

ダニエルズモデルとは、あるシステムの要素にかかる力の挙動を追っていく力学モデルである。適用するに当たり前提となる仮定を以下のように設定する。

- ・各要素の破壊強度は独立で、同一の確率密度関数に従うランダム量である。
- ・システムにかかる荷重は各要素が均等に負担し、破壊が生じた時は、残る健在の要素に応力再配分が行われる。

これを天井板を支えるアンカー群に適用していく。構造上、1つの要素を天井板1枚と考えるのではなく、図-2のような天井板10枚・隔壁板5枚を6mのCT鋼で固定し、16本の接着剤で吊っているものを1つの要素と考える。

3.3 モンテカルロシミュレーション

以上より論文から得られたデータを用い、ダニエルズモデルを適用することで、モンテカルロ法による天井板の崩落シミュレーションを行う。具体的には、論文から得られた各荷重レベル毎の平均・分散・標準偏差を用いる。ばらつきは正規分布すると仮定し、この正規分布に従った乱数を発生させる。これにより求めた破壊予想時間(t_b)を天井板トンネルが造られてからの経過年数(T)と比較する。 $t_b < T$ となればそのアンカーは破壊せず、 $t_b > T$ となれば破壊となる。破壊した場合、破壊したアンカーにかかっていた荷重を他のアンカーに均等に配分する。この作業をシステム全体が破壊に至る、すなわち16本のアンカーすべてが破壊に至るまで繰返し行う。現在この計算を実施中である。

4. おわりに

ここまでの研究で、アンカーの持続荷重による経年劣化の必要な論文を収集し、データの抽出とその

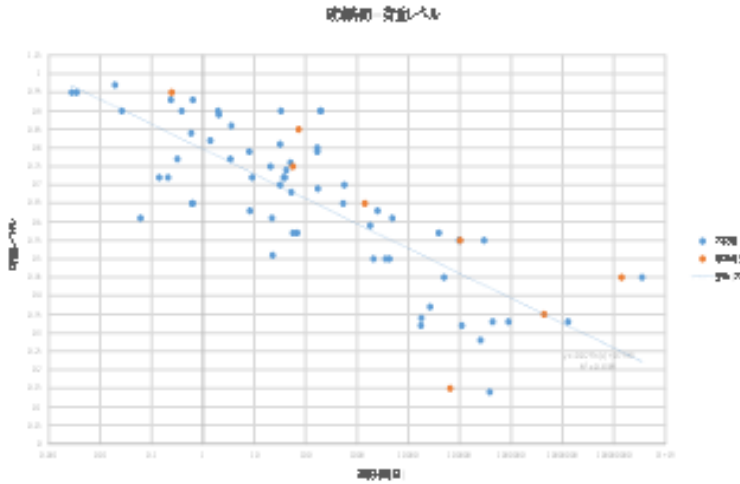


図-3 荷重レベルと破壊時間(日) まとめ

範囲	回帰平均	分散	標準偏差
0から0.3	4.87261E+09	2.37393E+19	4872295288
0.3から0.4	4.92751E+06	2.76582E+13	5259104.602
0.4から0.5	1.56697E+05	2.48782E+16	157728151.4
0.5から0.6	4.98303E+03	1.36552E+10	116855.287
0.6から0.7	1.58462E+02	2.34619E+06	1531.72784
0.7から0.8	5.03917E+00	4.54657E+03	67.42828145
0.8から0.9	1.60248E-01	7.16377E+03	84.63903529
0.9から1.0	5.09600E-03	9.04699E-02	0.300782066

表-1 各荷重レベルの平均・分散・標準偏差

た。また、このデータを用い、モンテカルロ法によるシミュレーションのおおまかな流れを決定した。

今後の課題としては、実際にプログラムを組み、天井板トンネルがどの程度の時間で破壊まで至るかをシミュレーションしていく。

参考文献

- 1) 西山豊 天井板の連結が重大事故をまねいた 災害問題分科会 2016年
- 2) 国土交通省 吊り天井板の構造設計
- 3) 濱崎仁 他3人 接着系あと施工アンカーのクリープ特性 特別教育・研究報告書 2014年
- 4) 矢野明義 他4人 機器配管用支持構造物(埋込金物)の耐力に関する実験研究その8 日本建築学会大会学術講演 1981年
- 5) 井口重信 接着系あと施工アンカーの耐久性に関する評価方法の検討 2016年
- 6) 安藤重裕 他4人 あと施工アンカーの引張クリープ試験方法の基礎的評価 日本建築学会技術報告集 2015年
- 7) 安藤重裕 他3人 あと施工アンカーのばね式引張クリープ試験方法およびクリープ特性の評価に関する検討 あと施工アンカーの耐久性評価と設計方法の高度化に関するシンポジウム
- 8) 中野克彦 他2人 接着系あと施工アンカーのクリープ変形評価方法に関する研究 日本建築学会構造論系論文集 2017年