

天井板落下に関する調査・検討委員会 報告書(骨子案)

はじめに	1
1. 事故概要と調査検討委員会の検討	1
2. 筐子トンネルの基本諸元・設計・施工・維持管理状況について	2
2.1 基本諸元・設計	
2.2 施工（トンネル本体、天井板）	
2.3 維持管理	
3. 調査・試験結果の概要	4
3.1 事故区間の観察	
3.2 天頂部接着系ボルトの設計	
3.3 天頂部接着系ボルトの製品使用説明書や品質保証範囲	
3.4 天頂部接着系ボルトの施工出来形調査	
3.5 天頂部接着系ボルトの引抜試験	
3.6 経年変化の影響に関する調査	
(1) 経年の荷重作用に関する調査	
(2) 長期耐久性(材料劣化)に関する調査(化学分析)	
(3) 接着剤内部の状態に関する顕微鏡観察	
3.7 天井板吊り構造の維持管理に関する調査	
3.8 打音試験	
3.9 その他の調査結果	
4. 落下メカニズムの推定及び事故発生要因の整理	13
4.1 落下メカニズムの推定	
4.2 事故発生要因の整理	
(1) 設計に係わる事項	
(2) 材料・製品に係わる事項	
(3) 施工にかかわる事項	
(4) 点検方法・点検実施体制にかかわる事項	
5. 再発防止策	17
5.1 「接着系ボルトにより天井板を吊す構造」の既設トンネル	
5.2 常時引張り力を受ける接着系ボルトによる吊り構造で固定された既設重量構造物 (ジェットファン、道路標識等)への対応	
5.3 今後の接着系ボルトの使用	
6. 道路構造物の今後の設計、施工、維持管理等のあり方について	18
6.1 設計のあり方について	
6.2 施工のあり方について	
6.3 点検・維持管理のあり方について	
まとめ	20

天井板落下に関する調査・検討委員会 報告書(骨子案)

はじめに

委員会が実施する調査は、平成24年12月2日に発生した中央自動車道笹子トンネル(以下、笹子トンネルという)天井板の落下事故を受けて、落下の発生原因の把握や、同種の事故の再発防止策について専門的見地から検討することを目的として行うものであり、事故の責任の所在を明らかにすることを目的に行うものではない。

本事故は、道路構造物そのものが通常の供用状態下において落下し、死亡者・負傷者が生じた、我が国において例を見ない重大な事故であり、これについては再発防止策等の検討が早急に必要であると考えられる。そのため、委員会規約第2条の目的を達成するべく、委員会としての本事故に関するこれまでの調査結果と現時点での再発防止策の考え方について、下記のとおり報告する。

1. 事故概要と調査検討委員会の検討

- 平成24年12月2日午前8時03分頃、笹子トンネル(上り線)内82.6kp付近で、トンネル換気のために設置されている天井板及び隔壁板が約140mに渡り落下する事故が発生。
- 車両3台が天井板の下敷きになるなどにより巻き込まれ、うち2台で火災が発生し焼損。人的被害は死者9人、負傷者2人。
- 今回の事故を受け、平成24年12月4日に「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)」第1回委員会を開催。以来、2回の現地調査、5回の委員会を実施し、落下の発生原因の把握と再発防止策について専門的見地より検討。
- なお、中央自動車道(下り線)大月JCT～勝沼IC間においては、事故直後から通行止めとなり、平成24年12月29日午後1時に対面通行開始。中央自動車道(上り線)一宮御坂IC～大月JCT間においては、事故直後から通行止めとなり、平成25年2月8日午後4時に上り線通行止め解除により上下線各2車線通行が復旧。

2. 管子トンネルの基本諸元・設計・施工・維持管理状況について

2.1 基本諸元・設計

- 昭和51年トンネル本体完成、昭和52年天井板工事完成、同年供用開始。
- 当該地域の地質は中生代白亜紀の小仏層の頁岩、砂岩、チャートの堆積層とこれに第三紀に貫入した花崗閃緑岩から構成。
- 換気方式は、約4.4kmの延長から横流換気方式を採用。送排気ダクトはトンネル断面を活用する天井板構造を採用し、設計速度、計画交通量等と条件とし、煤煙透過率、車道内最大風速、ダクト終端風速等の規定値を満たすものとして、寸法の異なるL, M, Sの3断面構造を採用。

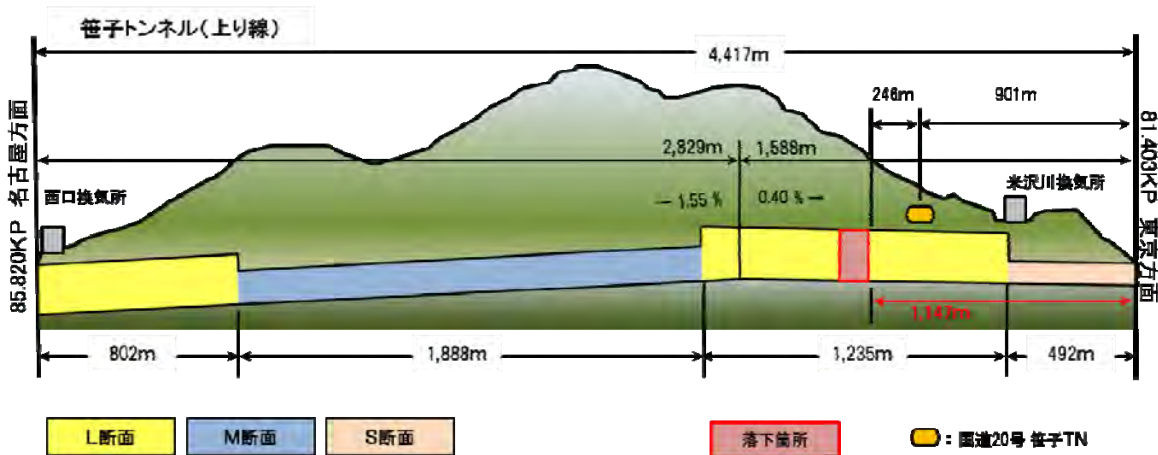


図1

- 天井板は6mのCT鋼毎に、隔壁・天井板等を16本のトンネル天頂部接着系アンカーボルト※（以下、天頂部接着系ボルトという）と両端の受け台で支える設計。16本のボルトをCT鋼軸線に対して非対称に配置。

※ 管子トンネルで用いられた接着系アンカーボルトは、母材に予め穿孔した孔に樹脂・硬化剤・骨材からなる接着剤カプセルを装填したうえで孔内にボルトを打設することで、ボルトと母材の間を接着剤にて物理的に固着するもの。

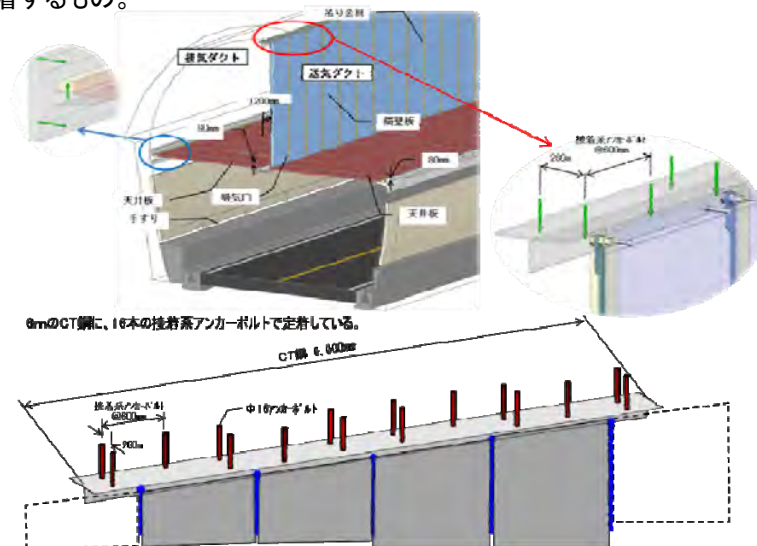


図2

2.2 施 工(トンネル本体、天井板)

- 覆工コンクリートは、圧縮空気コンクリートを天頂部から流し込む施工方法を採用して打設された。
- 天井板・隔壁板の設置に用いる接着系ボルト製品は、昭和51年に元請の現場代理人より「工事材料承認願」が提出されており、監督員がこれを承認。
- 埋込み長は、特記仕様書で、内径の11倍以上(約152mm以上)と規定。定着長は、設計報告書で、130mmと設定。ただし、埋込み長、定着長の定義は確認できなかった。
- 完成図では、ボルトが埋め込まれた状態が図示され、「130mm」と旗揚げ。しかし、130mmが埋込み長であるのか、削孔深さであるのかは記載されていない。
- 建設当時の工事関係書類によれば、トンネル延長約100mごとに試験用の接着系ボルト3本、計156本を天頂部周辺に別途設置し、引抜試験を実施し、ボルト鋼材の降伏に相当する引張り力に対して抵抗できるだけの引抜強度を有することを確認。また、別途、天頂部接着系ボルト54本についても同様の確認を実施。
- 建設当時の工事関係書類及び事故後の緊急点検の観察結果によれば、東京側L断面の国道20号との交差部及び米沢川換気所の下方にあたる区間を「偏荷重の影響を受ける特殊区間」であると位置づけ、施工段階において、1本のCT鋼当たり16本のボルトに加えて4箇所、合計で243箇所にて、直径24mm、長さ2550mmのロックボルト※が追加されている。
※ ロックボルトとは、一般に、トンネル掘削や岩盤の切り取り施工に際して、岩盤壁面の崩落を防ぐための支保に用いられる鋼製のロッド。岩盤に掘削した孔の中にモルタル及びロックボルトを注入・挿入した後、ナット締めを行い、ロックボルトと岩盤を一体化する。

2.3 維持管理

- 中日本高速は、「保全点検要領」に基づき構造物の点検を実施。
- この保全点検要領では、点検の種別、方法、頻度等を定めている。主要構造物の健全性を把握するための点検には詳細点検がある。
- 詳細点検で用いる点検方法は、近接目視または打音等とされている。しかし、同じ要領のなかで、打音や触診が可能な距離まで対象物に接近して目視することも、双眼鏡による目視もいずれも近接目視として扱われ、点検において構造物にどれだけ接近する必要があるのかが明確でない。
- 詳細点検頻度は、過去の点検結果や構造物の状況、環境条件、使用条件等を勘案のうえ設定するものとされている。標準的な詳細点検の頻度は、5～10年に1回とされている一方、安全な道路交通又は第三者に対して支障の恐れのある箇所は5年に1回とされている。
- 安全な道路交通又は第三者に対して支障の恐れのある箇所として以下が例示されている。

1. 本線・ランプ交差箇所、2. 鉄道交差箇所、3. 一般道交差箇所、4. 高架下占有箇所
および第三者の出入りが容易な箇所、5. その他コンクリート片等構造物からの落下により、安全な道路交通または第三者に対して支障となる恐れのある箇所

3. 調査・試験結果の概要

調査・検討委員会では、事故原因の把握のために幅広い視点から調査・試験を実施した。

3.1 事故区間の観察

- 事故区間(天井板が落下したCT鋼23本分(138m))において、天井板や隔壁板とともに天井板を吊るしていた天頂部接着系ボルトやCT鋼も落下していた。なお、一部の天頂部接着系ボルトはナット部で破断またはナットが抜ける等により覆工コンクリートに留まっていた。
- 事故区間の天頂部接着系ボルト孔の位置と覆工コンクリートのひびわれの位置を照合したところ、ボルト孔を跨いでひびわれが横切っていたものは一本であった。なお、その位置は、事故区間において東京側1番目のCT鋼内であった。

※CT鋼1本あたり16本のボルト、事故区間は23本のCT鋼で構成、したがって、事故区間の天頂部接着系ボルトは 368本と見積られる。

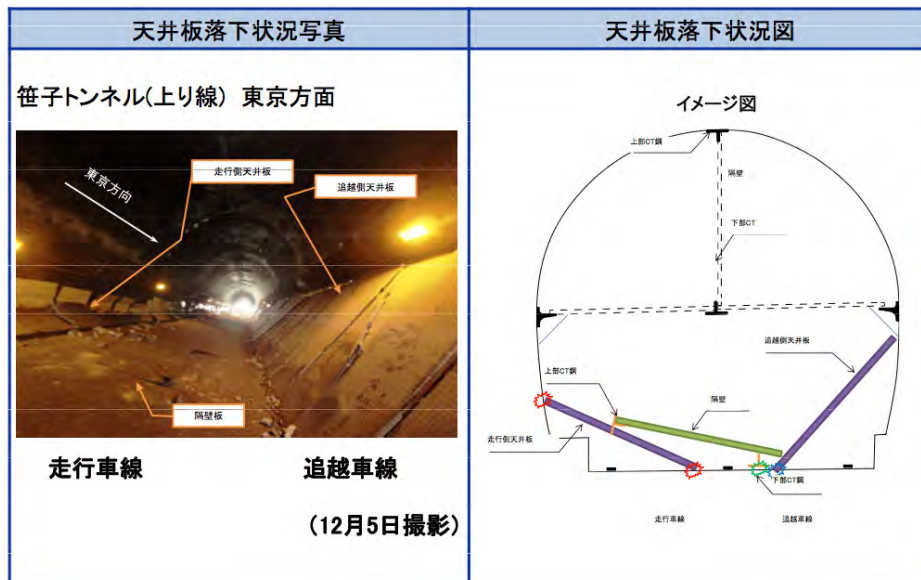


図3

- 隣り合うCT鋼の境界部の天井板の重なりをみると、事故区間において東京側から12番目と13番目のCT鋼の境界部では12番目が下になっており、11番目と12番目の境界部でも12番が下になっていた。
- 抜けずに残った天頂部接着系ボルトの変形、抜け落ちたボルトの孔内における傷の状況及び舗装の落下痕を観察した結果、事故区間東京側から1番から12番のCT鋼部と13番から23番のCT鋼部の間で、ボルトの変形の向きや孔内における傷の向きが逆転していた。また、舗装の落下痕の深さや長さなどの傾向が変化した。
- 以上より、観察で得られた範囲の情報に基づけば、事故区間東京側から11番目から13番目のCT鋼のいずれか、または、いくつかが起点となり、そこから東京方向・名古屋方向の両方向に落下が広がったことが、落下時の挙動の可能性のひとつとして推定される。

3.2 天頂部接着系ボルトの設計

- 当時の資料が残っているS断面における天井板の設計結果及び日本道路公団設計要領第三集トンネル(昭和45年)に基づき、同様の方法で、当時の資料が見つからないL及びM断面の天井板の設計を再現した。
- 再現設計にて見積もられた天頂部接着系ボルトへの引張力は、L断面が最も大きく、S断面の2倍程度あった。これは、天井板・隔壁板の大きさ・重量はL断面が最も大きいこと、L断面における天井板・隔壁板の重量はS断面の重量の2倍以上であったことによる。
 - ※ 天井板や隔壁板等の重量、並びに、天井板に対して鉛直方向に作用する風荷重及び作業員荷重の組み合わせについて見積もられた天頂部接着系ボルトへの引張力は、L断面12.2kN/本、M断面7.4kN/本、S断面6.6kN/本であった。
 - ※ 天井板や隔壁板等の自重について見積もられた天頂部接着系ボルトへの引張力は、L断面9.3kN/本、M断面5.4kN/本、S断面4.3kN/本であった。
- 再現設計の結果、
 - 隔壁板に作用する水平方向の風荷重がCT鋼に伝達され、CT鋼を変形させることにより天頂部接着系ボルトに生じる引張力は、見込まれていなかった
 - 各ボルトの引張力は均等であるとモデル化されていたが分かった。そして、これらの点について、数値シミュレーションに基づき分析を行った結果、以下のことを確認した。
 - 隔壁板に作用する水平方向の風荷重がCT鋼に伝達され、CT鋼を変形させることにより天頂部接着系ボルトに生じる引張力は、天頂部接着系ボルトの設計において考慮すべき大きさであった可能性が高いこと。
 - ※ 仮定した条件のもとでは、隔壁に作用する風荷重(横荷重)等が原因で、L断面の天頂部接着系ボルトには少なくとも20kN/本程度の引張力が作用するという計算結果。
 - 長い天井板・隔壁板を有するL断面の天頂部接着系ボルトにはS断面の天頂部接着系ボルトの2倍以上の引張力が発生していたと考えられること。
 - 16本の天頂部接着系ボルトの配置がCT鋼軸線に対して対称配置でないこと(図2参照)から、天井板や隔壁板等の自重に対してもCT鋼に不均等な変形が生じ、各ボルトの引張力が不均等になった可能性があること。
- 一方で、天頂部接着系ボルトについて、施工の段階で、名古屋側L断面ではM20ボルトに変更された他、残りのL、M、S断面では断面によらず基本的にM16ボルトが使用されている。
- なお、M、S断面においてもL断面と同一仕様の天頂部接着系ボルトが用いられたこと、名古屋側L断面においてはM20ボルトが使用されたこと、及び、16本のボルトをCT鋼軸線に対して対称に配置しなかったことについて中日本高速に説明を求めたが、理由を確認できなかった。

3.3 天頂部接着系ボルトの製品使用説明書や品質保証範囲

- 当時の施工承諾書によれば、管子トンネルにて使用された製品は、「ケミカルアンカー、レジ
ンカプセルR-16、日本デコラックス(株)」である。
- 当時の製品カタログによれば、接着剤樹脂は、(旧)西独の会社との技術提携により製造・販
売されていた、カプセル方式のものである。日本建築あと施工アンカー協会が現在公表して
いる認証製品一覧によれば、同社同名製品(ケミカルアンカー・Rタイプ)の樹脂は、不飽和
ポリエステル系である。<<http://www.anchor-jcaa.or.jp/ninsyo/058.pdf>>
- カプセル方式の接着系ボルトは、ボルト孔底までボルト先端を挿入すること、かつ、ボルト孔
壁とボルトの隙間が一定以下になるように削孔径が制御されることで、接着剤カプセル内の
骨材や硬化剤が粉碎、樹脂と攪拌され、それがボルトとボルト孔の間を隙間無く満し、母材
コンクリート削孔面やボルトねじ部に食い込み、その面でのコンクリートやねじ部、あるいは
硬化した接着剤樹脂がせん断抵抗(付着強度)を発揮するという原理である。したがって、
適切な径でボルト孔を削孔すること、孔底とボルト先端を一致させるように打設することは、
製品使用の前提条件と考えられる。
- 当時の製品カタログに示される使用条件では、削孔深さとボルト埋込み長の関係に関して、
ボルト先端とボルト孔底を一致させるように指定する記述は無かった
※ 当時の製品カタログにはボルト孔の削孔径と削孔深さについて使用条件が記載されており、例えば
M16ボルトを用いる場合には、削孔径は19mm、削孔深さは110mm以上、最適深さ130mmとの記載があ
った。

3.4 天頂部接着系ボルトの施工出来形調査

- 後述の引抜試験で引抜強度が特に低かったボルト箇所等合計56箇所において、覆工コン
クリートのコア抜きを行い、天頂部接着系ボルトの埋込み状態を観察した。ボルト先端とボ
ルト孔底が一致するように施工されておらず、その結果、ボルト孔の削孔深さがボルト埋込
み長に比べて深いこと、ガラス管、骨材、硬化剤及び樹脂の一部が十分攪拌されないまま
ボルト先端に残留していたものが相当程度あったことを確認した。
- ボルト孔の削孔深さは平均で157mm、ボルト埋込み長は平均129mmと平均的にも削孔深さ
が埋込み長よりも約28mm長かった。

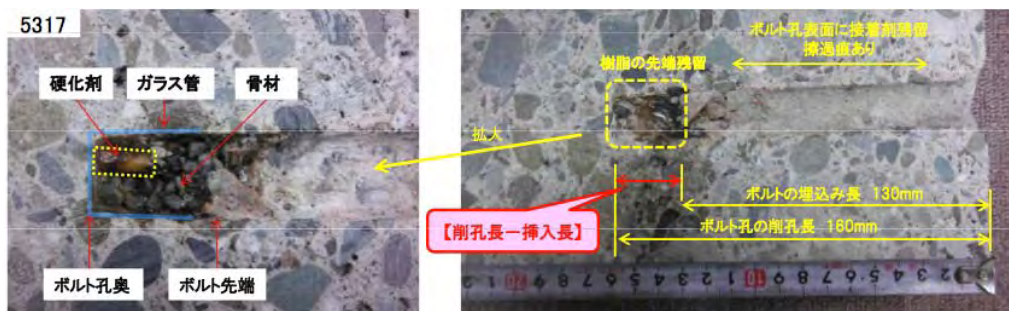


図4

- また、覆工コンクリート内部には空隙の存在が確認され、コア抜きを行ったもののうち一部

1 のボルトは、覆工コンクリート内部にある空隙部へ埋め込まれ、空隙部へ接着剤が流出し
2 ていた(図5参照)。

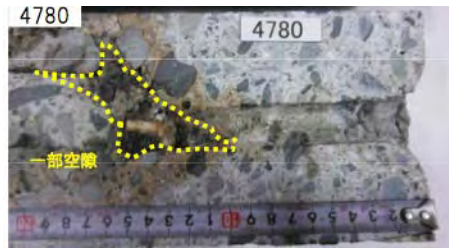


図5

- 3
4
5
6
7
8
- 9 ➤ 天頂部接着系ボルトの削孔深さと埋込み長の設定根拠や両者が一致していない理由並び
10 に施工手順や管理方法について中日本高速に説明を求めたところ、以下のことが報告され
11 た。
 - 12 ~ 工事特記仕様書で埋込み長を「内径の11倍以上」(約152mm以上)を規定する一方で、
13 完成図に旗揚げされていた寸法は130mmであったこと。
 - 14 ~ それぞれの数値の設定根拠や特記仕様書と完成図に記載された寸法が異なった理由
15 は不明であること。
 - 16 ~ 削孔深さと埋込み長について、当時の施工手順や管理方法は不明であること。

17 3.5 天頂部接着系ボルトの引抜試験

- 18
- 19 ➤ 笹子トンネル上り線全線(事故区間を除く)にわたって、L, M, S断面それぞれで天頂部接着
20 系ボルトの引抜試験を実施した。トンネル全体でおおよそ等間隔になるように141箇所、事
21 故区間の前後区間や141箇所のボルトの中で引抜強度が低かったボルトの近傍など44箇
22 所、全185箇所を実施した。
 - 23 ➤ 安全確保のため、CT鋼および隔壁板を存置したまま試験を行った。隔壁板は送気ダクト側
24 のCT鋼ウェブに設置されており、CT鋼位置でのジャッキ設置が困難なため、試験対象のボ
25 ルトは排気側ダクトのものとした。ボルト材料の降伏点応力度相当(約40kN)を目標に載荷
26 し、荷重と変位を記録した。
 - 27 ➤ 試験の結果107本のボルトが引き抜けたが、引抜強度が特に低く、設計上の引張力に満た
28 ない引抜強度(12.2kN未満)の天頂部接着系ボルト16本は、そのほとんどが、東京側 L 断
29 面にて観察された。また、その中でもいくつかの天頂部接着系ボルトは、試験前に触診した
30 とき引き抜けたり、ジャッキによる載荷に対してほとんど抵抗を示さなかった。
 - 31 ➤ 観察された荷重変位曲線において、最大荷重に達するときの変位は数ミリであった。
 - 32 ➤ 引き抜けたボルトに対して、排気ガスによると思われるボルトの黒ずみがない範囲が接着
33 剤の付着長であったと仮定したときには(以後、「接着剤付着長」という)、接着剤付着長は
34 60mm~140mmの間でばらついた。
 - 35 ➤ 引抜強度と接着剤付着長の関係は、ばらつきが大きかった。

- 1 ➤ 付着長のばらつきをL, M, S断面間で比べたとき、断面間では顕著な差がなかった。

3.6 経年変化の影響に関する調査

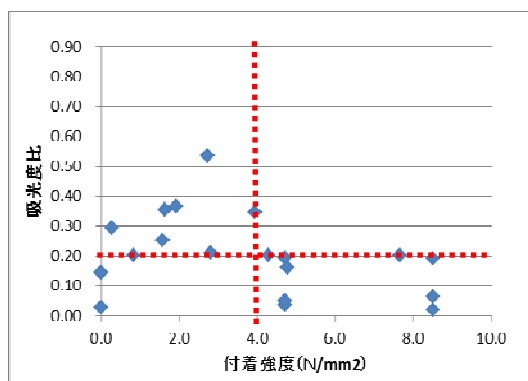
(1) 経年の荷重作用に関する調査

- 6 ➤ 経年の持続荷重(天井板や隔壁板等の自重による常時引張り力)と代表的な繰返し荷重である風荷重が特に大きいのはL断面であった。
- 8 ➤ 現存する範囲の換気運転記録から、供用開始から事故発生までの間に20万回以上の換気装置の稼働・停止とそれに伴う風荷重による発生・停止による繰返し応力振幅があったと推計される。
- 11 ➤ さらに、経年の繰返し荷重の影響として、換気装置稼働時の風の振動による繰返し引張り力振幅、大型車通過時に天井板に与える風圧と負圧作用による繰返し引張り力振幅もあったと考えられる。そして、風荷重の変動や大型車通過時の風圧は、CT鋼と隔壁板を締結するボルトの緩みにつながる可能性がある。一旦緩みが生じると、風荷重の変動や大型車通過時の風圧に伴うCT鋼と隔壁板の締結部のがたつきと繰返しの衝撃力に転じる可能性もある。

(2) 長期耐久性(材料劣化)に関する調査(化学分析)

- 18 ➤ 不飽和ポリエステル樹脂は、一般に、アルカリ環境下で加水分解を起こす性質を有している。
- 20 ➤ そこで、引抜試験後、接着剤樹脂をサンプリングするなどし、X線マイクロアナライザ分析や赤外線分光分析による化学分析を行った。
- 22 ➤ X線マイクロアナライザ分析では、天頂部接着系ボルトを残したまま覆工コンクリートから採取したコアを用いて、コア断面方向の元素分布を調べた。結果は、以下のとおりであった。
- 24 • 樹脂に相当する部分からカルシウム元素が検出された。
 - 25 • その分布性状から、コンクリートの細孔溶液の成分であるカルシウムイオン等のアルカリが、接着剤樹脂と覆工コンクリートとの界面から、接着剤樹脂内部へ浸入したと考えられる。
- 28 ➤ 赤外線分光分析では、試料採取した接着剤樹脂に対して、接着剤種類の照合及び樹脂の劣化の程度を調べた。
- 30 ➤ 接着剤樹脂試料の採取は、天頂部接着系ボルトに付着した接着剤樹脂と、ボルト孔内に付着していた接着剤樹脂とから、それぞれ行った。
- 32 ➤ 天頂部接着系ボルトに付着した接着剤樹脂においては、表面(覆工コンクリートとの界面付近)、及び、内部(ボルトとの界面付近)にて試料採取した。
- 34 ➤ ボルト孔内に付着していた接着剤樹脂においては、孔内表面にて試料採取した。
- 35 ➤ 分析結果は、以下のとおりであった。

- 赤外線吸収スペクトルは、 1730cm^{-1} 付近と 1270cm^{-1} 付近にエステル結合によると思われる強い吸収ピークがあり、不飽和ポリエステル樹脂であると照合。
 - ボルトに付着した接着剤樹脂のうち、覆工コンクリート界面付近からサンプリングした樹脂(ボルト表面試料)については、エステル結合の分解によると考えられる 1730cm^{-1} 付近の吸収ピークの減少と、他方カルボン酸塩の生成によると考えられる 1570cm^{-1} の吸収ピークの出現・増大傾向が見られた。これは、加水分解の進行を示すものである。
 - そこで、 1570cm^{-1} 付近の吸収ピークと 1730cm^{-1} 付近の吸収ピークの比(以下、「吸光度比」という)を指標とし、これが大きいほど加水分解が進行していると見なすことにすれば、以下の分析結果が整理される。
 - ✓ ボルトに付着した接着剤樹脂のうち、覆工コンクリート界面付近からサンプリングした樹脂(ボルト表面試料)については多くの試料で加水分解の進展がある。
 - ✓ ボルトに付着した接着剤樹脂のうち、ボルト界面付近からサンプリングした樹脂(ボルト内部試料)については、加水分解の進展はほとんど生じていない。
 - ✓ ボルト孔内からサンプリングした樹脂(孔内試料)については、一部の試料では加水分解の進展があるものの、ほとんど進展していないものもあるなど、ばらつきが大きい。
 - ✓ 加水分解の進展がみられたサンプルにおいても、絶対的な程度は大きくない(※エステル基が完全に分解されていない)。
- 覆工コンクリートと接着剤樹脂間の付着強度に対して加水分解が与えた影響を調べるため、ボルト表面試料について、引抜試験結果と合わせてデータを分析した。その結果、以下のことを確認した(図6参照)。
- 付着強度が $4.0\text{N}/\text{mm}^2$ よりも大きい場合には、一部のデータを除けば加水分解の進展程度のばらつきは相対的に小さく、吸光度比は最大でも0.2程度であること。
 - 付着強度が $4.0\text{N}/\text{mm}^2$ よりも小さい場合には、試料採取を行ったボルトによっては、吸光度比が0.2を超えるデータも複数見られたこと。

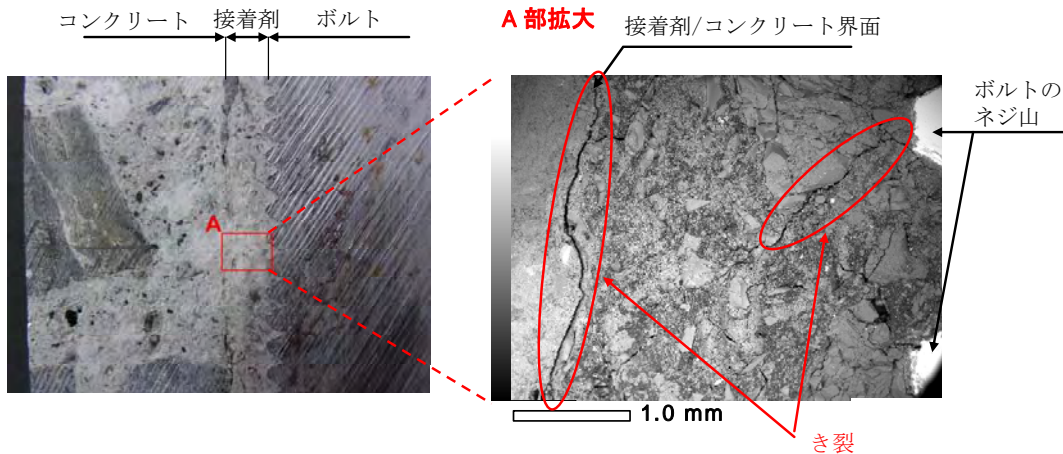


ボルトの付着強度と $1570\text{cm}^{-1}/1730\text{cm}^{-1}$ 吸光度比(ボルト表面試料)

図6

1 (3) 接着剤内部の状態に関する顕微鏡観察

- 2 ➤ 出来型の調査を行うため、天頂部接着系ボルトを残したまま覆工コンクリートから採取した
3 コア56本のうち3本について、樹脂内部の状態を走査型電子顕微鏡で観察した。その結果、
4 ボルトねじ山の周辺、骨材の周辺、覆工コンクリートと接着剤樹脂界面周辺において、無数の
5 の微細な内部き裂や空隙が観察された。



16 図7

17 3.7 天井板吊り構造の維持管理に関する調査

- 18 ➤ 供用開始後の点検・補修履歴について中日本高速に説明を求めたところ、以下のことを確
19 認した。
- 20 ~ 2000年以降2回、点検計画を途中変更。結果的にL断面の天頂部接着系ボルトについて
21 は、近接での目視及び打音は12年間未実施であったこと。(表1参照)
 - 22 ~ 2009年には「笹子トンネルリフレッシュ計画」として、天井板撤去を含めた換気方式の変
23 更を検討したが、長期間通行止めなどの社会的影響を考慮し、計画を変更したこと。
 - 24 ~ 点検補修履歴等が、必ずしも、その後の維持管理に反映することを意図しては管理され
25 ていなかったこと。
 - 26 • 2001年に実施したボルトの引抜試験(4本)で定着長不足も確認されたが、原因究
27 明がなされず、またその後の点検・経過観察計画にも反映されていなかった。
 - 28 • 今回の調査で確認した天頂部接着系ボルト652箇所(補修補強)の形跡について、
29 それぞれの補修補強目的や時期については、関係書類が調査当初に速やかに
30 確認できる状態で保存されていなかった。
 - 31 ~ 発見された工事関係書類によれば、天井板工事時に、東京側L断面では、国道20号交
32 差部及び米沢川換気所下方にあたる区間におけるCT鋼では1CT鋼あたり4本の天頂
33 部接着系ボルトをロックボルトに変更すること、また、坑口部付近などで覆工コンクリ
34 ート内部の鉄筋と天頂部接着系ボルトが干渉したときおよび覆工コンクリート打ち継ぎ目
35 においては、ボルト打設位置を変更しL型鋼を当てることとしたことが確認された。平成
24年12月の緊急点検時の写真資料より、建設時のロックボルトは243本、L型鋼補強は

191箇所と推定されるが、残り218箇所の天頂部接着系ボルトの補修補強の目的、設置時期は推定、確認ができない。

＜点検経緯について(2000年(H12)以降)＞

点検年度	点検種別	点検目的	点検内容	点検内容の補足及び変更経緯等
2000 (平成12)	臨時点検	道路構造物総点検(頻発する鉄道や道路構造物での事故を受けて)	ダクト空間の近接目視及び打音点検	
2001 (平成13)	補修工事にて、アンカーボルトの引張試験(4本)、鋼材腐食度、せん断試験、コンクリート現位置試験や強度試験などの調査を実施			
2005 (平成17)	定期点検	前回点検から5年目	路面上から近接目視及び打音点検	第三者被害は天井板下面からのコンクリート片はく落が対象と位置付け天井板上面は対象外
2008 (平成20)	【計画】 定期点検 ↓ 【実施】 臨時点検	【計画】 点検要領に基づき詳細点検 ↓ 【実施】 対象部位の絞込み	【実施】 路面上から近接目視及び打音点検 (タイル面のみ点検)	当初計画より変更 当初計画した天井板の点検を2009年度実施する計画に変更
2009 (平成21)		天井板除去や換気方式の見直し等を具体的に検討する(笹子トンネルリフレッシュ計画補修業務)の中で調査を実施(調査内容:天井板や壁面の取付け状況、露出コンクリート等の代表的な箇所を抽出し、2000年の点検報告書を基にひび割れや劣化の進行を比較。調査は西入口から約1.8km区間で、落下区間は調査していない)。		
…2011 (平成23)		2011年には、天井板除去を前提としない換気方式へ見直しを行ったことから、次年度(2012年)から定期点検を再開することとした。		
2012.9 (平成24)	定期点検	リフレッシュ計画の修正(当面換気設備更新を先行)に伴いトンネル全体の点検計画	路面上からの近接目視及び打音点検 ダクト空間の近接目視及び一部打診	当初計画より変更
2012.12 (平成24)	緊急点検	事故後の緊急点検	天井板に実際に上がって近接目視と打音、触診を行う	

「保全点検要領 構造物編(平成24年4月)」より抜粋
 点検は、「構造物の衰状を含めた現状を把握し、補修などの対策の要否判断を行うとともに、構造物を良好に保つための適切な維持管理計画を策定するために実施するもの。」
 調査は、「点検のみでは評価が十分にできない場合等に、衰状の状況を定量的に解析評価するために実施するもの。」

表 1

3.8 打音試験

- 笹子トンネルにおける打音試験と引抜試験の結果を踏まえると、近接点検(近接目視・打音及び触診)にて、引抜強度をほぼ喪失した天頂部接着系ボルトを把握できることを確認した。
- この結果は笹子トンネルの条件下でのものであるが、同種構造においても、「トンネル天井板の緊急点検(国道保第10号、国道高154号、平成24年12月3日)」による緊急点検と同様、接着系ボルト全数に対して、近接目視、打音及び触診を確実に実施し、引抜強度を喪失したボルトを捕捉することは、適切な措置を取るために有効であることを確認した。
 ※ 前述のとおり、従来の保全点検要領では、接近または双眼鏡での目視または打音等が点検方法として挙げられていた。今回の事故を受けたトンネル天井板の緊急点検では、これらに加えて触診が実施され、現実性が高められている。
- 笹子トンネルにおける打音試験では、付着長や引抜強度が所定の値以上であるかどうかまでは把握できないことを確認した。また、CT 鋼を使用していたことがボルト打音試験の良否判定にばらつきを与えた可能性があることが確認された。
- 別途作成された供試体を用いてセンサー付きの打音試験を実施し、打音(打撃)時の音(振動)や反発力をセンサーにより記録し、分析した結果、打撃時の音(振動)や反発力は、ボルトに作用する張力の影響等様々な条件の影響を受けやすいことを確認した。

3.9 その他の調査結果

以下の要因については、得られた調査結果の範囲では、天頂部接着系ボルトへの作用力(荷重)の増加や強度不足・低下に影響を与えた可能性が低いと考えられる。

- 1
- 2 ➤ ボルト孔の削孔径は、カタログ上の推奨値が19mmであったのに対して、天頂部接着系ボルトの出来形調査の結果、平均で19.5mmとカタログ値との乖離が十分に小さく、また、ばらつきも小さかった。したがって、削孔径が原因である接着系ボルトの引抜強度不足が生じた可能性は低い。
- 3
- 4
- 5
- 6 ➤ 覆工コンクリートのシュミットハンマー強度の調査をトンネル全長にわたり行った結果、当初設計で期待した強度(21N/mm²)以上が基本的に確保されていること、上述のように、事故
- 7
- 8 区間においてボルト孔を跨いでひびわれが横切っていたものは1本であったことを確認した。したがって、覆工コンクリートの劣化が原因で天頂部接着系ボルトの引抜強度が低下した可能性は低い。
- 9
- 10
- 11 ➤ 引抜試験で得られた天頂部接着系ボルトについて、ボルト鋼材の破断試験により破断強度を確認するとともに、ボルト鋼材の腐食量を質量減少率を指標にして確認した。その結果、
- 12
- 13 ボルト鋼材の破断試験では十分な強度があること、および、質量減少率も小さいことがわかり、ボルト鋼材の腐食・減肉が原因でボルトが破断した可能性は低いことを確認した。
- 14
- 15 ➤ 排水溝や天井板受け台のゆがみの観察結果並びに事故区間にて事故後に内空変位を計測した結果等によれば、建設当初に比べて、トンネル内空断面形状の変化が生じていない
- 16
- 17 と考えられる。したがって、内空断面形状の変化により天頂部接着系ボルトに作用する荷重が増加した可能性は低い。
- 18
- 19 ➤ 2006年7月に米国マサチューセッツ州ボストンにて発生した天井板落下事故においては、事故区間以外においても、覆工コンクリートに埋め込まれた、速硬性エポキシ樹脂による接着系ボルトが目に見えるほど引き抜け変位が生じた状態で留まった状態が多数観察された[※]と報告されている。一方、笹子トンネル事故後に実施された委員会の現地調査及び緊急点検ではそのような事象があったことは確認されていない。
- 20
- 21
- 22
- 23

24 ※ National Transportation Safety Board. 2007. Ceiling Collapse in the Interstate 90 Connector Tunnel, Boston, Massachusetts, July 10, 2006. Highway Accident Report NTSB/HAR-07/02. Washington, DC.

25

26

4. 落下メカニズムの推定及び事故発生要因の整理

4.1 落下メカニズムの推定

前章までの調査・検討結果を踏まえ、落下メカニズムに関連した事象を推定すると以下のとおりである。

- 天井板落下の原因は、天頂部接着系ボルトの設計・施工も含めた接着部まわりに絞り込むことができる。
- 接着系ボルトの強度発現原理上、工事完成時点で既に、接着剤の攪拌不足・まわり込み不足により、所定の接着剤引抜強度が発揮されないものが一定程度存在したものと考えられる。
 - ※ 所定の接着剤引抜強度とは、強度発現原理上適切な施工がなされ十分な接着剤付着長が確保された場合に得られるであろう接着剤引抜強度を指している。
- 工事完成時点において所定の引抜強度が得られていないボルトはL, M, S断面のいずれでも存在したと考えられるが、経年の繰返し荷重に関して、特にL断面の天頂部接着系ボルトでは、M, S断面の天頂部接着系ボルトに比べて、相対的に大きな、継続的な繰返し引張り力を受けるという点において、接着剤樹脂の疲労（強度低下）や覆工コンクリートと接着剤樹脂界面又は接着剤樹脂とボルト界面に沿ったせん断強度の低下が生じやすい環境下にあった。
 - ※ 疲労とは、構造物や材料が繰返し荷重を受けて強度が減少する現象。材料に多数回の繰返し荷重を作用させた場合、その繰返し荷重によって発生する応力が静的破壊を生じる応力より低い応力であっても、材料が破壊することがある。材料の降伏点以上の応力の繰返しで生じる塑性疲労という現象もある。
- 経年の劣化については、水分およびカルシウムイオン等のアルカリが覆工コンクリート界面側から接着剤樹脂内部に徐々に浸入し、接着剤樹脂の加水分解が進行し得たと考えられる。また、覆工コンクリートとの界面における接着剤の劣化の絶対的な程度は大きくないにも係わらず、引抜強度に一定の影響を与えた可能性を確認した。
- 何らかの要因によるき裂や空隙が発生する等により覆工コンクリートと接着剤樹脂界面又は接着剤樹脂とボルト界面に沿った強度低下が生じたり、接着剤樹脂の強度低下が生じたとき、常時引張り力が大きいほど、また工事完成時点の強度が低いほど、その進展は著しくなると考えられる。
- L断面の天頂部接着系ボルトでは、経年の持続荷重に関して、M, S断面の天頂部接着系ボルトに比べて相対的に大きな常時引張り力を受けており、引抜試験の結果、引抜強度の小さかったボルトは主にL断面にて分布していたことに符合する。

したがって、現在まで得られた情報の範囲では、落下メカニズムは以下のように推定される。

- 天井板に打設された接着系ボルトは、工事完成時点から所定の引抜強度が発揮されないものも含まれるなど、設計施工段階から事故につながる要因を内在していたものと考えられる。

- 1 ➤ 特に L 断面という、最も断面積が大きい、最も重い天井板及び隔壁板を有する、そして最
2 も大きい風荷重を受ける断面において、特に、建設当初から所定の引抜強度が得られな
3 かった天頂部接着系ボルトでは、経年の荷重作用や材料劣化を原因とする引抜強度の低
4 下・喪失が進行したと推定される。
- 5 ➤ 最終的には、いずれか、または、複数の CT 鋼において、天頂部接着系ボルトは、全体とし
6 ては天井板及び隔壁板を吊るすための強度が不足し、その結果、接着剤樹脂と覆工コン
7 クリート、または、接着剤樹脂とボルト接合面に沿ったせん断破壊等、単独または複数の
8 要因により引き抜け、CT 鋼、天井板及び隔壁板の落下が生じたと推定される。
- 9 ➤ さらに、隣り合う天井板が 1 枚の隔壁板を介して連結されていたことで、約 140m の区間
10 にわたり連続して落下したと推定される。

11
12 なお、これらは、得られた範囲の情報に基づく落下メカニズムの推定である。接着剤の加水分解
13 が引抜強度に与える影響や、接着剤の付着長が短く、樹脂・硬化剤・骨材の攪拌不足も疑われ
14 る状況下における接着剤樹脂の疲労等、長期耐久性については十分な知見があるとは言えない
15 ことから、今後の調査・研究の蓄積が望まれる。

16 17 4.2 事故発生要因の整理

18 前章までの調査・検討結果を踏まえて、得られた範囲の情報に基づき、材料・製品に係わる事
19 項、設計に係わる事項、施工管理に係わる事項、点検方法や実施体制に係わる事項という観点
20 から、事故発生に与えた要因を整理する。通常、構造部材はそれぞれ一定の安全率(余裕度)を
21 見込んで設計されているが、本トンネルでは以下の要因が複数作用し、累積された結果、致命的
22 な事故に至ったと考えられる。

23 24 (1) 設計に係わる事項

- 25 ➤ 設計においては無視されていた、隔壁板に作用する水平方向の風荷重が CT 鋼に伝達され、
26 CT 鋼が変形することにより天頂部接着系ボルトに生じる引張力は、天頂部接着系ボルトの
27 設計において無視できない大きさであった可能性がある。
- 28 ➤ 設計計算においては CT 鋼内に配置されたボルトが均等に引張力を負担すると仮定してい
29 たが、それが達成できるような構造的配慮がなされておらず、各ボルトが負担する引張力に
30 ばらつきがあったと考えられる。これと、工事完成時点のボルトの施工状態を併せみると、
31 ボルトによっては、経年の持続荷重に対する強度の余裕が結果として小さくなっていたと考
32 えられる。

33 34 (2) 材料・製品に係わる事項

- 35 ➤ 建設当時の製品カタログでは、施工原理の前提条件となる施工仕様、品質管理規定の記
36 載が明確でなかった。これは、接着系ボルトについて、削孔深さと埋込み長が一致しないま
37 ま施工された理由の一つと考えられる。

- 1 ➤ 当時のカタログには「変質、老化の心配はない」と記載されていた。しかし、たとえば今回の
2 事故に関連するものとして、35年を超えて長期に曝露されたのちの強度試験結果が少なく
3 とも我が国ではこれまでに見られないことや、接着剤樹脂の疲労や加水分解の程度と付着
4 強度の低下の関係の考察に必要な知見が十分に無いことなど、現在まで、長期耐久性に
5 ついて十分な知見が得られているとは言えない。

6 ※ たとえば、「各種合成構造設計指針・同解説(日本建築学会、2010)」p.268に、「経年によるアンカーボ
7 ルト耐力の低下については、その調査検討に長期間を要するため、関連資料は特に十分でない。」との
8 記載がある。

10 (3) 施工に係わる事項

- 11 ➤ 特記仕様書、設計報告書及び完成図における接着系ボルト孔の削孔深さやボルト埋込み
12 長の記載について、矛盾点があった。また、調査の結果、実際に、ボルト孔の削孔深さとボ
13 ルトの埋込み長が異なっているものが相当数存在することを確認した。
- 14 ➤ 天頂部接着系ボルトの施工出来形調査の結果を踏まえ、接着系ボルトの強度発現原理に
15 照らせば、建設当初から、所定の引抜強度が得られていないものが一定程度存在したもの
16 と考えられる。
- 17 ➤ 施工時に、ボルト鋼材の降伏に相当する引抜き力に対する強度を確認するための引抜試
18 験が実施されているが、引抜試験だけでは、ボルト孔底とボルト先端が一致しているかなど、
19 強度発現原理を満足するように施工がなされたかどうかの確認とはならない。本来、施工
20 確認のために引抜試験をサンプリングにより実施するならば、強度発現のために必要な一
21 定の施工手順や削孔深さ等の施工管理項目が明らかにされ、それが各ボルトの施工プロ
22 セスごとに記録され、あとから確認可能であることが前提であるが、笹子トンネルにおいて
23 は当時の施工方法が明らかでない。
- 24 ➤ なお、この点について当時の施工管理項目や方法について発注者と受注者のあいだでど
25 のような協議が行われたのかについては不明との報告であった。

27 (4) 点検方法・点検実施体制に係わる事項

- 28 ➤ 以下の点より、事故が生じたという結果を踏まえれば、中日本高速の笹子トンネル天井板
29 に対する事故前の点検内容や維持管理体制は不十分であったと言わざるを得ない。
- 30 • 点検計画の変更、12年間にわたりL断面天頂部ボルトに対して、ボルトに近接しての
31 目視及び打音が未実施であったことについて、個々にみれば背景があるとしても、天
32 頂部接着系ボルトの状態について明確な裏付けがなく近接での目視及び打音の実施
33 が先送りされていたこと
 - 34 • 膨大な数の補修履歴の保存体制が不備であったこと、工事関係書類についても本来
35 保存されるべき場所とは異なる場所から見つかる等、個々の施工や点検、維持管理
36 にて得られた情報が点検計画等の維持管理に適切に反映できていなかったこと

- 1 なお、工事関係書類が速やかに見つけ出せる状態で保存されていなかったことは、かかる事故原
- 2 因の調査において、少なからず支障を来した。供用後に道路構造物に不具合が生じることも想定し、
- 3 維持管理履歴や補修履歴を管理することが重要であることを付記する。

4

5. 再発防止策

5.1 「接着系ボルトにより天井板を吊す構造」の既設トンネル

常時引張り力を受ける全ての接着系ボルトに対して近接点検(近接目視、打音及び触診)を行うことは、機能を喪失したボルトを把握する上で有効である。またこのような点検を定期的に行うことで異常のあるボルトを事故に至るまでに検出できる可能性が確実に高まるとともに、経年的な傾向を把握して適切な予防保全対策が実施できることに寄与する効果も期待できる。

しかし、接着系ボルトは完成後には打設状態の把握が困難であること、引抜強度に経年変化が生じ得ること、及び、それが建設当初の引抜強度や打設状態及び経年の暴露環境に応じて異なる可能性があること、並びに、近接点検(近接目視、打音及び触診)では個々のボルトの引抜強度の正確な把握はできないことが技術的な限界として確認された。

以上の技術的な限界も踏まえると、少なくとも接着系ボルトで吊られたトンネル天井板に対しては、以下のような、点検とは別途の安全措置を速やかに講じる必要がある。

- 常時引張り力を受ける接着系ボルトで固定された既存の吊り天井板については、換気方式の変更の可否、周辺交通への影響等を考慮し、可能ならば、撤去することが望ましい。
- 存置する場合は、第三者被害を防止するための措置として、バックアップ構造・部材を設置すべき。
- 上記2点の対策が完了するまでは、点検頻度を増やすなどのモニタリングを強化すべき。
- 点検にあたっては、全ての常時引張り力を受ける接着系ボルトに対して近接点検(近接目視、打音及び触診)を行うとともに、少なくともいくつかのサンプルで適切な荷重レベルでの引張載荷試験を実施すべき。

ここに、バックアップとは、既存構造と同一の吊り構造系とは別系統の構造により、新しく構造系を追加することで接着系ボルトが常時引張り力を負担できなくなった場合に当該部材が落下しないことを担保するものである。

また、ボルトごとに近接点検(近接目視、打音及び触診)結果を保存し、定期点検ごとに経年変化や補修履歴を分析できるようにすること、ボルトの脱落があった場合には原因を分析することも必要である。

5.2 常時引張り力を受ける接着系ボルトによる吊り構造で固定された既設重量構造物(ジェットファン、道路標識等)への対応

常時引張り力を受ける接着系ボルトで固定されたその他の吊り重量構造物については、第三者被害を防止するための措置として、バックアップ構造・部材の設置などを進めるべきである。

5.3 今後の接着系ボルトの使用

長期耐久性能について一定の知見の蓄積がなされるまでは、トンネル天井板、ジェットファン、道路標識等を固定する吊り構造等の常時引張り力を受ける箇所へは原則として接着系ボルトの使用を避けるべきである。

6. 道路構造物の今後の設計、施工、維持管理等のあり方について

6.1 設計のあり方について

- 道路管理者が設計施工基準を持たない新しい材料、製品、構造部材等の採用にあたっては、その破壊形態、抵抗特性や長期耐久性などの性能が確認された範囲で、かつ明示された使用条件の範囲で用い、その採用を行う箇所、部位を慎重に選択するべきある。
- また、原因によらず施工中及び供用中に確認された不具合事象の情報が蓄積・共有され、設計にフィードバックされるよう、不具合事象を道路管理者間で共有する仕組みも検討されるべきである。
- 個々の設計においては、
 - a. 部材の一部の損傷等が原因となって構造系の崩壊などの致命的な状態に至る可能性の回避に配慮した設計とすべき。たとえば、材料の性質や施工法の特性を理解し、弱点を回避するように配慮したり、致命的な状況に至ることによって第三者へ及ぼす影響を最小化するように配慮すべき
 - b. 点検や補修等の維持管理を行うために必要な設備の設置等具体的な点検の手段や、供用期間中に更新することが想定される部材については、維持管理の方法等の計画においてあらかじめ更新が確実かつ容易に行えるように配慮した設計とすべきであるとともに、構造物並びに添架物や設備、照明、標識等付属物等の設計基準等においても、その改訂に合わせて反映されるべきである。
- 個々の設計においては、新しい材料、製品、構造部材等の使用上の注意点や強度発現原理や施工方法、並びに、個々の設計における配慮事項については、施工段階及び維持管理段階に確実に引き継がれるように、設計図面等設計図書に明記すべきである。

6.2 施工のあり方について

- 適切に施工されているからこそ点検等の維持管理が有効に機能すると考える。したがって、施工においても、設計結果を実現するための前提条件、上記のa及びbの観点等設計において配慮された事項、材料や製品等の使用条件や原理等を把握するべきである。また、これらを確実に実現するために、施工管理項目や方法について受発注者間で十分に協議を行うべきである。
- 設計で想定した性能を実現させるための前提として、施工過程が確認できるように施工管理・品質検査記録や竣工図を供用期間中保存し、点検、補修補強等の維持管理に反映できるような仕組みを構築し、マネジメントを行うべきである。
- 補修補強を実施した場合についても、その背景に関する記録や竣工図等を供用期間中保存し、その後の点検や補修補強等の維持管理に反映できるような仕組みを構築し、マネジメントを行うべきである。

6.3 点検・維持管理のあり方について

- 点検については、その目的に応じて、長寿命化や安全性確認のための定期点検、塩害・疲労などに対する特定点検、重大と考えられる不具合・損傷の発生に応じた緊急点検、地震後などの緊急点検、さらには構造物の安全性には直接的には影響しないものの、非構造部材、道路付属物、道路施設やコンクリート片などの落下や倒壊による第三者被害を防止するための点検などがあり、それぞれ点検で対象とする項目(損傷等)、点検頻度や点検方法等が異なる。道路管理者は、当該路線や構造物に必要とされる管理水準等を鑑みながら、これらを適切に組み合わせて、適切な頻度・機会・方法にて実施すべきである。
- 設計や施工の記録だけでなく、点検・補修の履歴や点検・補修補強目的の記録を残し、その後の点検等の維持管理に反映させるような仕組みの構築やマネジメントを各道路管理者が実施すべきある。
- 構造物や材料・製品に事故や不具合等が生じた場合に、同種類別の構造物や材料・製品の利用状況や状態について調査が可能となるように、全道路管理者の情報を共有する仕組みを構築すべきである。
- また、国は、点検や維持管理及び構造物や材料・製品の事故や不具合等について共有された情報に基づき、点検要領の整備や設計基準の改訂を着実に進めることが必要。
- 接着系ボルトも含めて、目視だけでは現状の強度について信頼性の高い評価が困難な構造については、少なくとも、必要な技術力を有する者による近接での目視、打音及び触診による点検を着実に行う一方で、並行して、過度の加力では悪影響を及ぼすおそれのある引張り試験等の载荷試験によることなく強度を推定できる非破壊検査手法の技術開発が望まれる。
- 供用に影響を与えるような不具合が生じていないかどうかの監視技術、点検や交換等が容易であるなど維持管理性の高い構造や材料の開発、構造物や材料の耐久性試験法、部材の一部の損傷等が原因となって構造系の崩壊などの致命的な状態に至ることをなるべく回避できるような構造であることを照査するための技術基準の整備など、道路構造物を適切に管理することを容易にする技術開発が望まれる。

1 **まとめ**

- 2 ➤ 本事故は、通常の供用状態下において、道路構造物が原因となり、多くの死亡者・負傷者が
3 生じた我が国において例を見ない重大な事故と認識。
- 4 ➤ 本報告の趣旨を踏まえ、各道路管理者が直ちに再発防止策を講じることを期待する。
- 5 ➤ 接着剤の長期耐久性については、今後多方面にて調査研究がなされることを望む。
- 6 ➤ 今回の教訓を踏まえ、点検要領の整備、設計基準の改訂が着実に進められることを望む。
- 7 ➤ 各現場における構造物の経年変化、並びに、点検の実施計画、計画を変更した場合にはそ
8 の経緯等に関する情報が組織内で共有・継承されるように、特定の技術者や点検員が定期
9 的に当該構造物の点検に携わるようにするなど、補修履歴等が確実に記録・保存される仕
10 組みの構築やマネジメントの実施がなされることを望む。

11

12 今後、国並びに各道路管理者は、以上を教訓に確実な維持管理等に係わる仕組み、実施体制の
13 整備を図っていくべきである。