

トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会
報告書

平成25年6月18日

トンネル天井板の落下事故に関する
調査・検討委員会

はじめに

トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討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、以下のとおり報告する。

トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会 報告書

1.	事故概要と調査検討委員会の検討	1
1.1	事故の概要	1
1.2	調査検討委員会の設置	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
2.2	施工	5
2.3	維持管理	6
3.	調査・試験結果の概要	8
3.1	事故区間の観察	9
3.2	天頂部接着系ボルトの設計	13
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	18
3.4	天頂部接着系ボルトの施工出来形調査	19
3.5	天頂部接着系ボルトの引抜試験	22
3.6	経年変化の影響に関する調査	27
3.7	天井板吊り構造の維持管理に関する調査	32
3.8	打音試験	34
3.9	その他の調査結果	36
4.	落下メカニズムの推定及び事故発生要因の整理	37
4.1	落下メカニズムの推定	37
4.2	事故発生要因の整理	38
5.	再発防止策	41
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	41
5.2	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	41
5.3	今後の接着系ボルトの使用	42
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	43
6.1	設計のあり方について	43
6.2	施工のあり方について	43
6.3	点検・維持管理のあり方について	44
	まとめ	45

(参考) 委員会規約

1. 事故概要と調査検討委員会の検討

1.1 事故の概要

平成 24 年 12 月 2 日午前 8 時 03 分頃、中央自動車道上り線笹子トンネルの東京側坑口から約 1,150m 付近において、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等が約 140m にわたり落下した。同区間を走行中の車両 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 台から火災が発生し焼損した。平成 24 年 12 月 4 日消防庁調べによると、この事故による人的被害は死者 9 人、負傷者 2 人であった。

なお、事故直後より中央自動車道下り線は大月JCT～勝沼IC間が、上り線は一宮御坂IC～大月JCT間が通行止めとなった。下り線は天井板を撤去等の上、平成 24 年 12 月 29 日午後 1 時より対面通行により供用を再開した。また、上り線は警察による事故の現場検証、天井板の撤去等の後、平成 25 年 2 月 8 日午後 4 時に通行止めが解除となった。これにより、上下線とも事故前と同様に各 2 車線での供用再開となった。

1.2 調査検討委員会の設置

(1) 目的

今回の事故を受けて、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の見地から検討することを目的として、「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会」が設置された。

(2) 構成

委員会は以下の委員により構成された。

委員長	今田 徹	東京都立大学 名誉教授 工学博士
委員	西村 和夫	首都大学東京 教授 工学博士
委員	二羽 淳一郎	東京工業大学 教授 工学博士
委員	真下 英人	独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ長
委員	水野 明哲	工学院大学 学長 工学博士
委員	本橋 健司	芝浦工業大学 教授 工学博士 (第2回委員会より就任)
委員	森 望	国土技術政策総合研究所 道路研究部長

(3) 開催経緯

委員会の開催経緯は以下のとおりである。

第1回委員会	平成 24 年 12 月 4 日(現地調査も併せて実施)
現地調査	平成 24 年 12 月 18 日
第2回委員会	平成 24 年 12 月 21 日
第3回委員会	平成 25 年 2 月 1 日
第4回委員会	平成 25 年 3 月 27 日
第5回委員会	平成 25 年 5 月 28 日

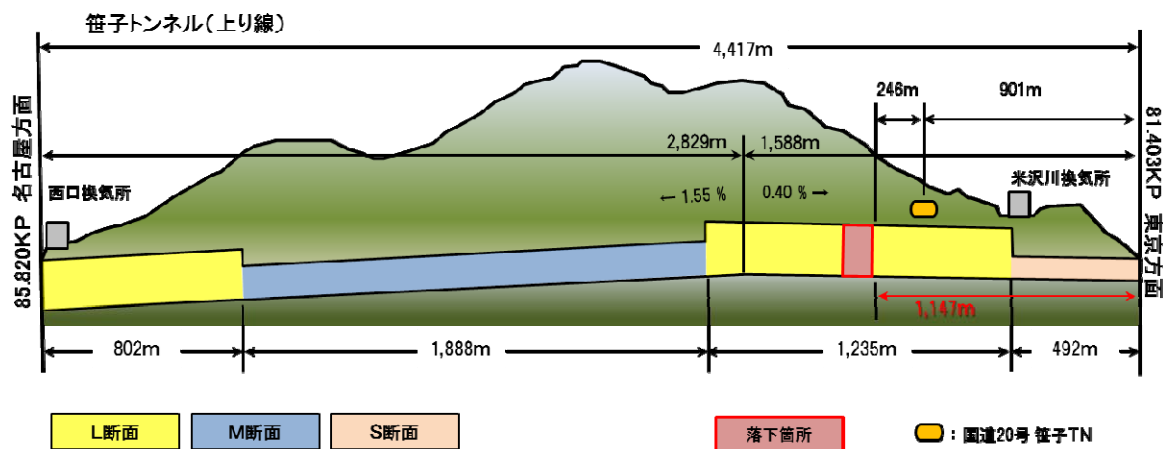
2. 笹子トンネルの基本諸元・設計・施工・維持管理状況について

2.1 基本諸元・設計

笹子トンネルの存する中央自動車道大月JCT～勝沼IC間は、昭和42年11月に「建設線の区間 大月市から韮崎まで」として基本計画が告示され、続いて昭和44年1月に整備計画が策定された。その後、同年4月に日本道路公団に対し施行命令が発せられた。昭和46年2月、日本道路公団から建設大臣あてに工事実施計画が提出され、同年3月に認可され工事が開始された。

笹子トンネル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により構成されている。昭和47年よりトンネル工事が開始され、昭和51年に本体工事が完成、昭和52年に天井板工事が完成した。なお、大月JCT～勝沼IC間は昭和52年12月20日より供用が開始された。

換気方式については、トンネル延長が3,000m以上であることから、設計時点における設計要領第三集トンネル(昭和45年 日本道路公団)に従い横流換気方式が採用された。横流換気方式において必要となる送気及び排気の両ダクトについては、トンネル断面を活用する天井板構造が採用され、その断面は設計速度(80km/h)、計画交通量(26,000台/日)、ディーゼル車混入率(17%)等を与条件とし、煤煙透過率(50%)、車道内最大風速(8m/s)、ダクト終端風速(20m/s)等の規定値を満たすものとして決定された。その結果、送排気流量の大きさによって、S、M、Lの3断面構造となった。



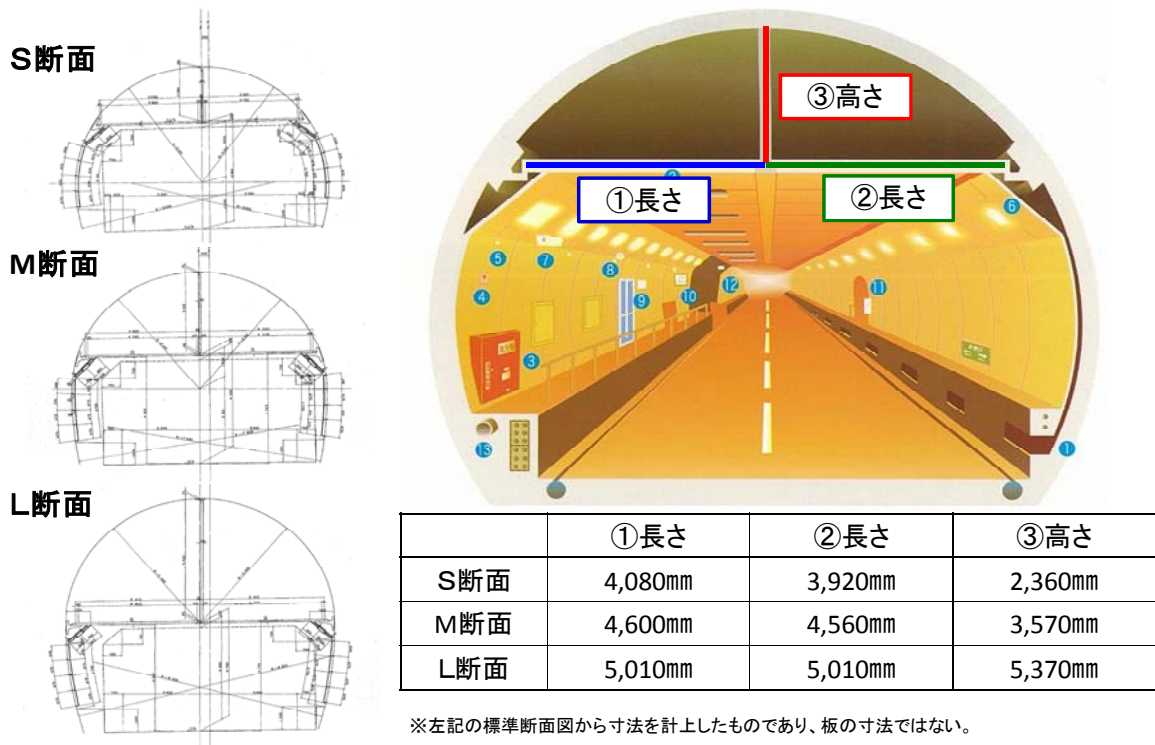


図2.1.2 S、M、Lの3断面の概要



図2.1.3 笹子トンネルの天井板(撤去工事時に撮影)

天井板は6mのCT鋼毎に天井板、隔壁板等を16本のトンネル天頂部接着系アンカーボルトと両端の受台で支える設計であった。この天井板の設計も設計要領第三集トンネル(昭和45年 日本道路公団)に基づき行われた。天井板の設計にあたり天頂部のボルトにかかる荷重として、①天井板の自重、②隔壁板の自重、③その他モルタル、CT鋼等の自重、④天井板上における作業員の荷重、⑤送気及び排気により天井板に鉛直にかかる風荷重が考慮された。また、16本のアンカーボルトはCT鋼軸線に対して非対称に配置されていたが、CT鋼にかかる荷重は、16本の接着系アンカーボルト※が均等に分担すると仮定した設計であった。

※ 笹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。

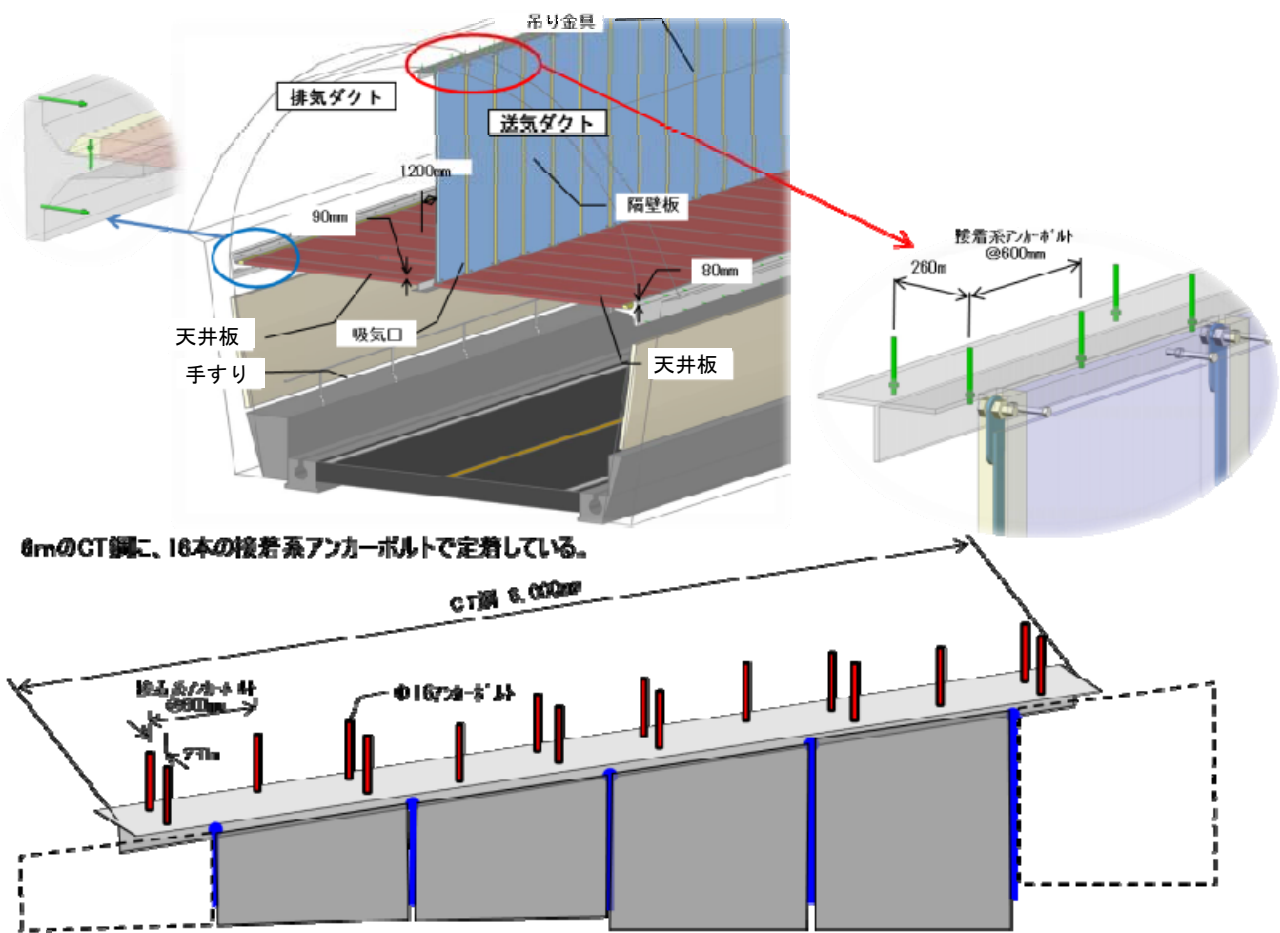


図2.1.4 天井板の構造

2.2 施工

トンネル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。

天井板及び隔壁板等の設置に用いる接着系ボルトについては、昭和 51 年 10 月に施工を請け負った現場代理人より「工事材料承諾願」が発注者に提出されており、監督員がこれを承認することにより決定された。

施工にかかる管理値について整理すると、

- 特記仕様書においては、アンカーの埋込み深さは内径の 11 倍以上(約 152mm 以上)と規定
- 設計報告書においては、定着長は 130mm と記載
- 完成図においては、埋込み長か削孔深さかの記載はないが、ボルトが埋め込まれた状態が図示され、130mm と記載
- なお、工事材料承諾願に添付されたパンフレットによると、穿孔深さは 110mm 以上、コンクリートの場合の最適深さは 130mm と記載

となっていた。しかしながら、埋込み長、定着長等の定義については確認できなかった。

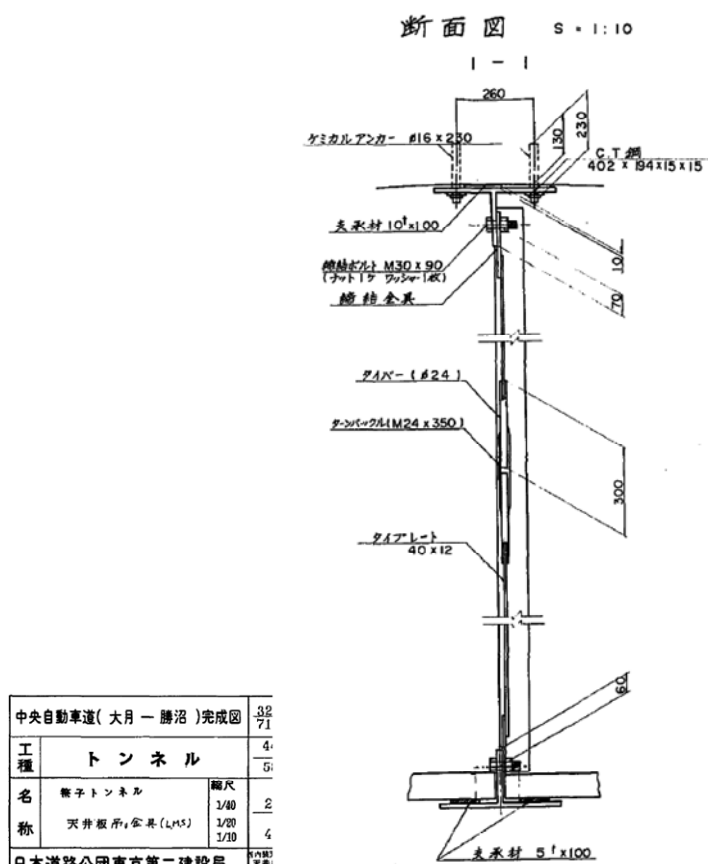


図2.2.1 天井板吊り金具完成図

施工時における管理については、工事関係書類によると、トンネル延長 100m 毎に試験用の接着系ボルト 3 本、計 156 本を天頂部周辺に試験用に別途設置し、引抜試験を行うことによりボルト鋼材の降伏に相当する引張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することが規定されていた。また、天頂部に施工された実アンカーでの引抜試験と推察される天井ケミカルアンカー引抜きテストが計 54 本実施されていた。これらの引抜き試験において、アンカーボルトの降伏点強度 3,900kg に対して、計 210 本全てが 4,000kg 以上で合格との記録が確認された。

また、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ると、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は「偏荷重の想定される特殊区間」であると位置づけられ、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、荷重の一部を地山に保持させるよう変更が行われていた。

※ 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、自ら定めた「保全点検要領」に基づき構造物の点検を実施している。前身の日本道路公団では、昭和 44 年 5 月の東名高速道路の全線開通前の昭和 44 年 1 月に「道路修繕要領(巡回要領)」を定め、日常の巡回・巡視の中で構造物の不具合の発見と修繕を実施してきた。

その後、昭和 58 年に「点検の手引き(案)」(昭和 60 年 3 月に「点検の手引き」となる)を定めている。この手引きによる点検により、個々の道路構造物の損傷状況の把握や構造物の特性によりその損傷状況が異なる等の知見の蓄積がなされてきた。以後、点検項目の細分化や判定基準に第三者被害に対する項目を追加する等の改訂が行われており、事故発生時点においては「保全点検要領 構造物編(平成 24 年 4 月)」が最新の要領であった。

この要領では、点検の種別(初期点検、日常点検、定期点検(基本点検、詳細点検)、臨時点検(特別点検、緊急点検))、点検方法(車上目視、遠望目視、近接目視※、打音、非破壊検査機器)、点検頻度(日常点検:交通量に応じて 4~7 日/2 週、定期点検(基本点検):1 回以上/年 等)等について定めている。

このうち、構造物の健全性の把握および安全な道路交通の確保や第三者に対する被害を未然に防止するため、構造物個々の状況を細部にわたり定期的に把握するために行う点検が詳細点検である。なお、詳細点検の実施方法としては、近接目視※・打音のほか、構造物の設計・施工条件や使用・環境条件などを考慮し、必要に応じて非破壊検査機器などを活用することにより、構造物の状態を適切かつ効率的に把握することとされている。しかし、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。

詳細点検の頻度は、1回/5～10年を標準とし、道路交通または第三者に対し支障となる恐れのある箇所の点検は、1回/5年を基本としている。

この要領によると「第三者に対する被害を防止する点検」とは、「コンクリート片等の構造物のはく落・落下により、安全な道路交通または第三者に対し支障となる恐れのある箇所」の点検を指し、その対象としている構造物(橋梁・トンネル・カルバート)および部位の点検対象範囲は、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高架下占用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支障となる恐れのある箇所とされている。

※ 保全点検要領 構造物編(平成24年4月)における定義

近接目視: 構造物の状況について可能な限り検査路や足場などを利用して、構造物に接近または双眼鏡にて目視により点検する方法である。また、必要に応じて簡易な計測機械、器具などを使用するものとする。

打音: 所定のハンマーにより対象構造物を打音して、構造物の状況(はく離(うき)、ボルトのゆるみ等)を把握する点検方法。打音にあたっては、近接目視の際に変状が認められる周辺や、建設時やその後補修されている周辺、トンネル覆工の目地部周辺、コンクリート打継目や端部周辺は入念に行うものとする。打音に使用する点検ハンマーは重量 230g(約1/2ポンド)程度のものである。コンクリート構造物を打音した結果の状態は、概ね表(略)を目安とする。なお、打音にあたっては、構造物に損傷を与えることがないように留意することが必要である。

非破壊検査機器: 点検作業の効率性の向上又は定量的な変状状況を把握することを目的として、構造物の特性に応じて適用されている赤外線カメラやトンネル覆工表面計測装置などの非破壊検査機器などについては、その機器の用途、技術仕様、精度ならびに個々の構造物の変状状況、使用条件、環境条件などを十分理解したうえで、目的に合致する場合は積極的に導入を図るものとする。

3. 調査・試験結果の概要

調査・検討委員会では、表3.1.1に示すように、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。

表3.1.1 試験項目概要

調査・試験項目	調査・試験数			調査・試験内容
	天井板 落下区間	その他 区間	実施総数	
事故区間の観察	—			・天井板落下状況の観察 ・天頂部接着系ボルト及びボルト孔内の観察 ・覆工コンクリートの状況観察(ひびわれ、漏水等)
天頂部接着系ボルトの設計	—			・天井板設計の再現(L、M断面)
天頂部接着系ボルトの製品使用説明書や品質保証範囲	—			・製品カタログに示される使用条件等の確認
天頂部接着系ボルトの施工出来形調査(覆工コンクリートのコアの切断観察)	26箇所	31箇所	57箇所	・天頂部接着系ボルトの埋め込み状態の観察
天頂部接着系ボルトの引抜調査	無	185箇所	185箇所	・当該ボルトの荷重変位曲線を記録 ・引き抜けたボルトの観察
経年変化の影響に関する調査				
長期耐久性(材料劣化)に関する調査(化学分析)	3箇所	27箇所	30箇所	・X線マイクロアナライザ分析 ・赤外線分光分析
接着剤内部の状態に関する顕微鏡観察	2箇所	6箇所	8箇所	・走査電子顕微鏡による観察
天井板吊り構造の維持管理に関する調査	—			・2000年以降の点検等の実施状況の確認 ・天頂部接着系ボルトの補修補強履歴の確認
打音試験	無	185箇所	185箇所	・近接目視、触診、打音を実施し、データを記録 ・センサー付き打音試験
その他の調査				
アンカーボルト孔調査	327箇所	113箇所	440箇所	・目視及びCCDカメラより削孔径、孔内の錆や接着剤の付着状況を記録
シュミットハンマー計測によるコンクリート圧縮強度の測定	10箇所	185箇所	195箇所	・覆工コンクリートの圧縮強度の確認
覆工コンクリートの圧縮強度測定	5箇所	10箇所	15箇所	・覆工コンクリートの圧縮強度の確認
アンカーボルト引張破断試験	無	ボルト4本	ボルト4本	・アンカーボルト自体の引張強度を確認
アンカーボルト腐食試験	無	ボルト4本	ボルト4本	・アンカーボルト自体の腐食状態を確認
内空の変位測定	全線			・トンネル内空変位を確認

3.1 事故区間の観察

図3.1.1に天井板の落下状況写真を示す。事故区間(天井板が落下したCT鋼23本分(138m分))において、天井板及び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、図3.1.2に示すように、一部の天頂部接着系ボルト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。CT鋼1本あたり16本のボルトが配置され、事故区間は23本のCT鋼で構成されていることから、事故区間の天頂部接着系ボルトの本数は368本と見積られる。

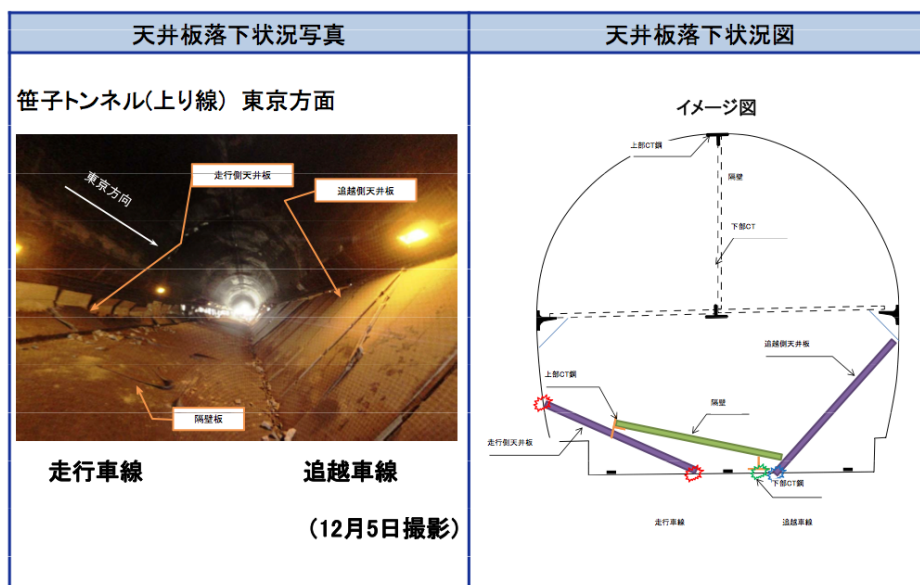


図3.1.1 天井板の落下状況図



図3.1.2 落下せずにとどまっていた天頂部接着系ボルトの例

落下痕跡について、図3.1.3に示すように、2つのCT鋼につながる隔壁の重なり方に着目して整理した。事故区間東京側6番から10番、13番から16番では、図3.1.3に示すように整然と落下しており、ほぼ一連で落下したことが伺われる。他方、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。また、併せて、図3.1.2に示すような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、図3.1.4に示すような舗装に残る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。以上の観察結

図3.1.3や図3.1.5に示す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、いくつかの起点となり、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として推定される。



名古屋←

路面傷の幅は、東京側で大きく、名古屋側に向かって細くなっている。

→東京

路面傷の幅は、名古屋側で大きく、東京側に向かって細くなっている。(下部CT鋼9番の落下痕跡)

図3.1.4 舗装に残る落下痕跡(下部CT鋼の落下痕跡と思われる)

◆ 落下区間における舗装損傷、及びアンカーボルト孔状況

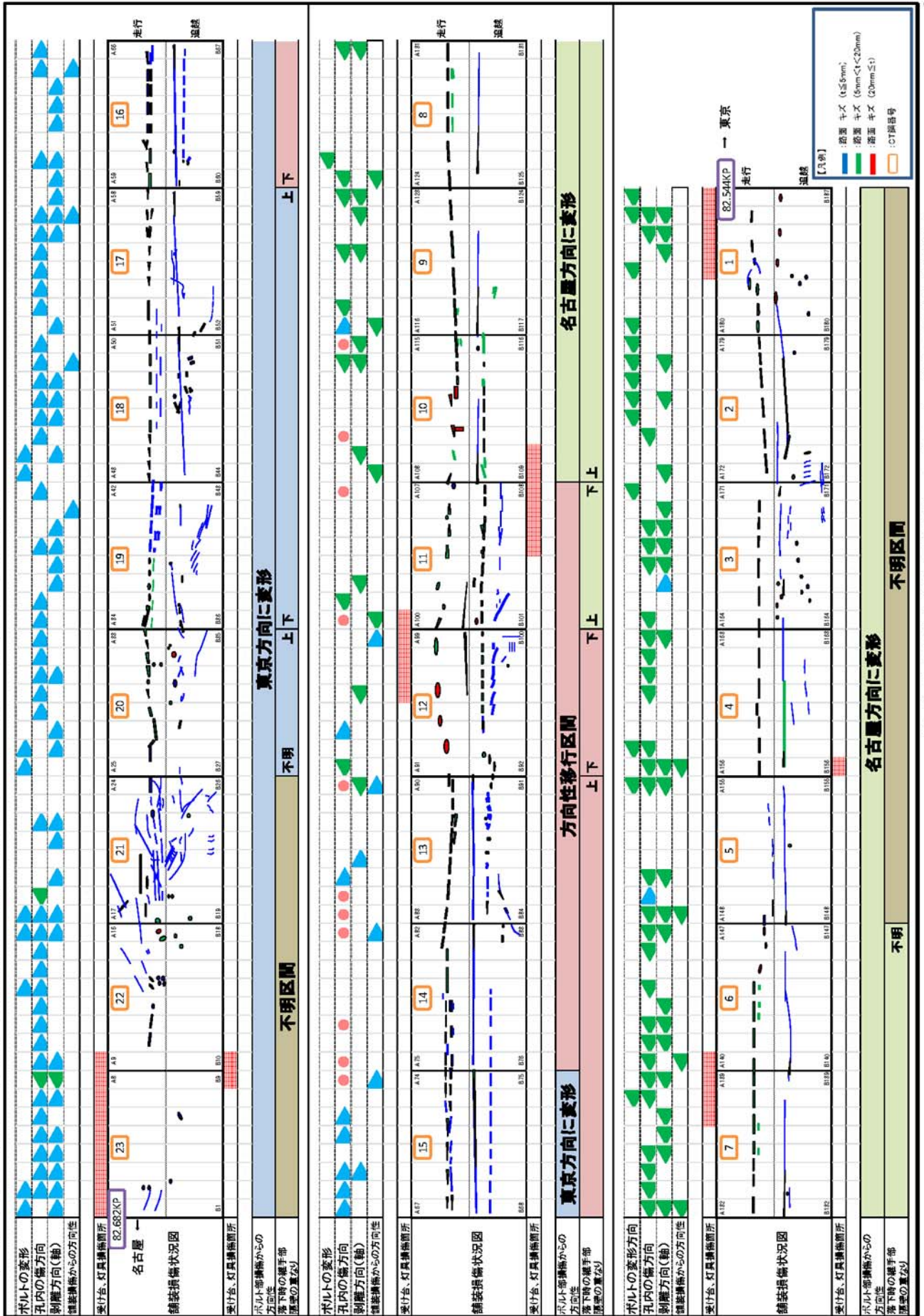


図3.15 落下区間における舗装損傷、及びアンカーボルト孔状況

※ ボルトの変形方向は、天井に残っているアンカーボルトの形状から判断した。

図3.1.6に、落下区間の覆工コンクリートの状態を示す。ひびわれや遊離石灰が一部に見られる。また、事故区間東京側から12番のCT鋼に対応するいくつかのアンカー孔箇所にて覆工コンクリートのコア採取を行った。その結果、そのうちのひとつでは、コア採取後にも、アンカー孔位置では漏水が観察された。

さらに、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。その結果、368本中、ボルト孔に近接してひびわれが横切っていたものは6箇所、そのうち、ボルト孔を跨いでひびわれが横切っていた箇所は1箇所であった。なお、ボルト孔を跨いでひびわれが横切っていた箇所は、事故区間において東京側から1番目のCT鋼内であった。

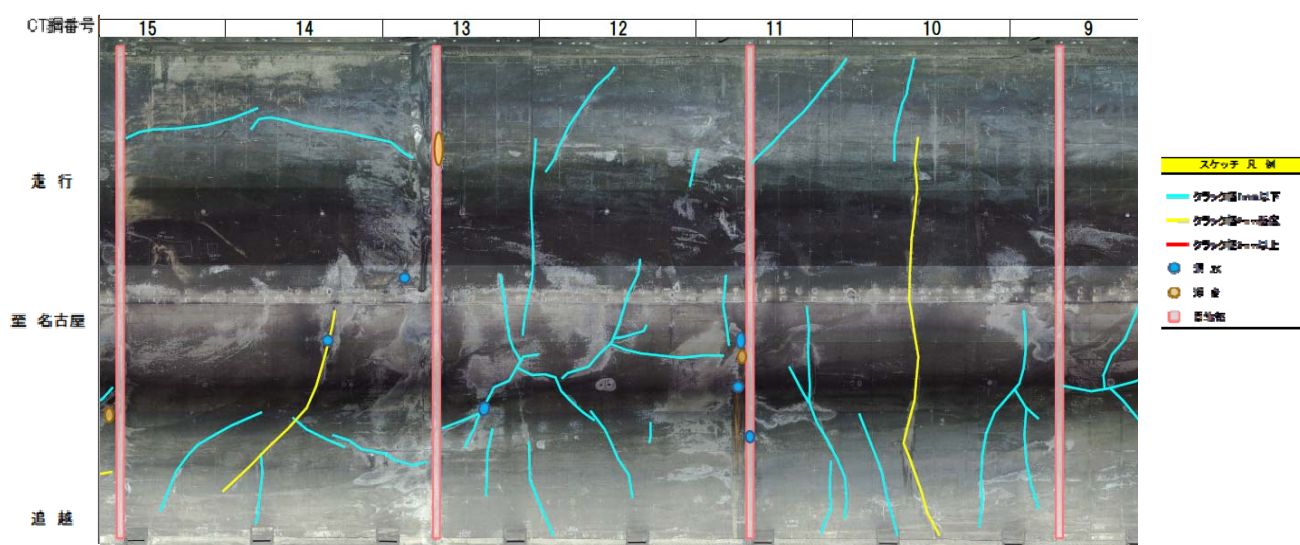


図3.1.6 覆工コンクリートの状態(落下区間東京側から9番から15番のCT鋼位置に対応、走行は天頂部を跨いで走行車線側、追越は天頂部を跨いで追越車線側の覆工コンクリートであることを示す)

3.2 天頂部接着系ボルトの設計

天頂部接着系ボルトに生じる力や設計で設定した強度を把握するため、当時の設計を再現した。S断面については、当時の設計資料が残っており、それと、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、設計計算の再現が可能であった。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。

設計に考慮された荷重組合せを図3.2.1に示す。これらを着目断面ごとに最も不利になるように組み合わせて載荷する。たとえば、天頂部接着系ボルトの設計では上向きの送気荷重は考慮しない方がボルトにとって不利であり、以後の再現設計計算値もこれを考慮しないときの値である。天井板及び隔壁板等の重量、並びに、鉛直方向の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。

また、天井板及び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。天頂部接着系ボルト

トへの引張力は、設計荷重についても、天井板及び隔壁板等の自重についても、L断面が最も大きく、S断面の2倍程度あった。これは、天井板及び隔壁板の大きさ、重量はL断面が最も大きく、重量はS断面の2倍以上であったことによる。

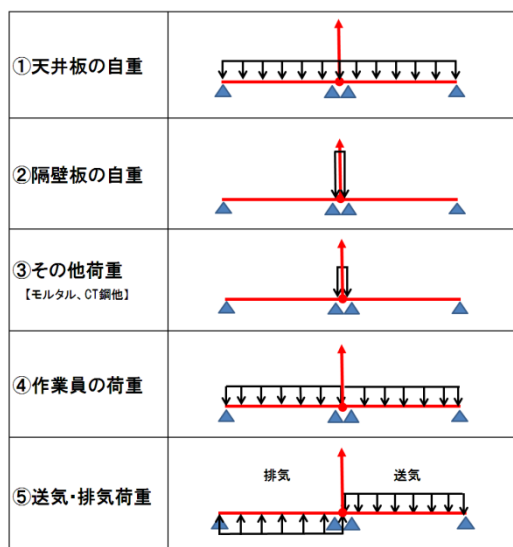


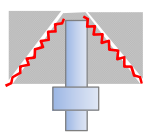
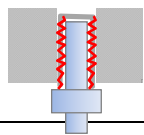
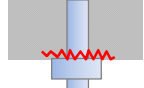
図3.2.1 荷重組合せ

設計図書によれば、当初設計では、L断面では直径16mm、長さ230mmのボルト(M16ボルト)が、M、S断面では直径12mm、長さ200mmのボルトが天頂部接着系ボルトとして配置されることになっていた。しかし、後述の引抜き試験の結果に基づけば、実際には、施工の段階で、名古屋側L断面では直径20mm、長さ250mmのボルト(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直径16mm、長さ200mmのボルトが使用された。

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について理由を確認できなかった。

L断面について、天頂部接着系ボルトの設計強度を計算した結果を表3.2.1に示す。設計上は、アンカーボルト鋼材の降伏が先行し、それに対して、接着剤樹脂と覆工コンクリート界面、もしくは、接着剤樹脂とボルト界面に沿ったせん断破壊によるボルトの引き抜けに対する強度の方が大きい。

表3.2.1 L断面における接着系アンカーの設計強度

破壊モード		強度
アンカー定着部 コンクリートの コーン破壊		48.8kN/本
アンカーボルト の引き抜け		52.2kN/本
アンカーボルト の降伏		38.4kN/本

国土交通省は、今回の事故を受け同様の天井板を設置しているトンネルにおいて、緊急点検を実施し、計61トンネル分の結果を公表している。結果には、トンネル天井板の諸元も示されている。それによれば、天井板の吊り高さはほとんどのトンネルで1.0mから3.5mであったこと、横流換気方式のトンネルの割合は多くないこと、及び、隔壁板を有しているトンネルは非常に少ないことが分かる。これに対して、本トンネルは、特にL断面では天井板上の空間の高さが約5.5mあり、またほぼ同じ高さの隔壁板を有しているという特殊な条件を有している。そこで、本委員会は、高い隔壁板の存在に着目し、図3.2.1に示した当時の設計要領の荷重組合せでは明示されていない、隔壁板に作用する水平方向の風荷重を考慮した場合の天井板の挙動を検討することにした。

検討は2つの方法で行った。一つは、図3.2.2に示すように、隔壁板と上部CT鋼の接合部位置に隔壁板に作用する風荷重の合力の1/2(隔壁板の上半分に作用する風荷重は上部CT鋼が、下半分に作用する風荷重は下部CT鋼が分担すると仮定)を水平方向に作用させたときの力の釣り合いからボルトに生じる軸力を求め、それを設計荷重作用時のボルト軸力に足し合わせる方法である。これによれば、L断面天頂部の送気側ボルトでは引張力がボルト一本あたり5.6kN増加し、合計で17.8kN/本(設計荷重のみ考慮した場合の約1.5倍)が生じる。

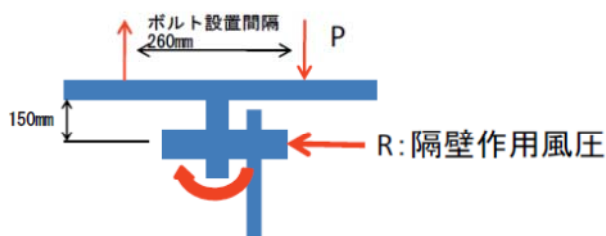


図3.2.2 隔壁板に作用する風荷重が天頂部接着系ボルト反力に与える影響の評価(その1)

もうひとつは、図3.2.3に示すように、より詳細な挙動を把握するために、ひとつのCT鋼に配置される天井板、隔壁板、吊り材、天頂部接着系ボルト等を対象に、天井板、隔壁

板及びCT鋼をシェル要素で、天頂部接着系ボルトを軸方向バネでモデル化した有限要素法による計算である。計算の結果、図3.2.3に変形図を示すように、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鋼のウェブが曲げられることにより、天頂部接着系ボルトに生じる引張力が影響を受けることが分かった。各天頂部接着系ボルトに生じる反力(引張力)を図3.2.4に示す。ここに、天頂部接着系ボルトを模擬するボルト軸方向バネ定数は、後述する、天頂部接着系ボルトの引抜試験において引抜けなかったボルトの荷重変位曲線の傾きから評価したものである。天頂部接着系ボルトをモデル化する軸方向バネのバネ定数等条件の設定により計算値が変化することに留意が必要であるが、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断面送気側の天頂部接着系ボルトには少なくとも20kN/本程度(設計荷重のみ考慮した場合の約1.6倍)の引張力が生じるという計算結果が得られた。また、送気側、排気側それぞれでボルト反力は一定ではなく、ばらつきを有することがわかった。そして、設計荷重に対して評価したときと同様、長い隔壁板を有する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推定された。

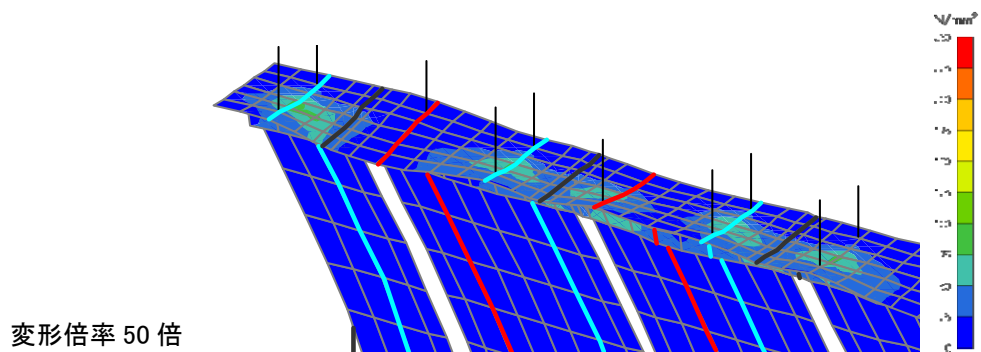


図3.2.3 隔壁板に作用する風荷重が天頂部接着系ボルト反力に与える影響の評価(その2)

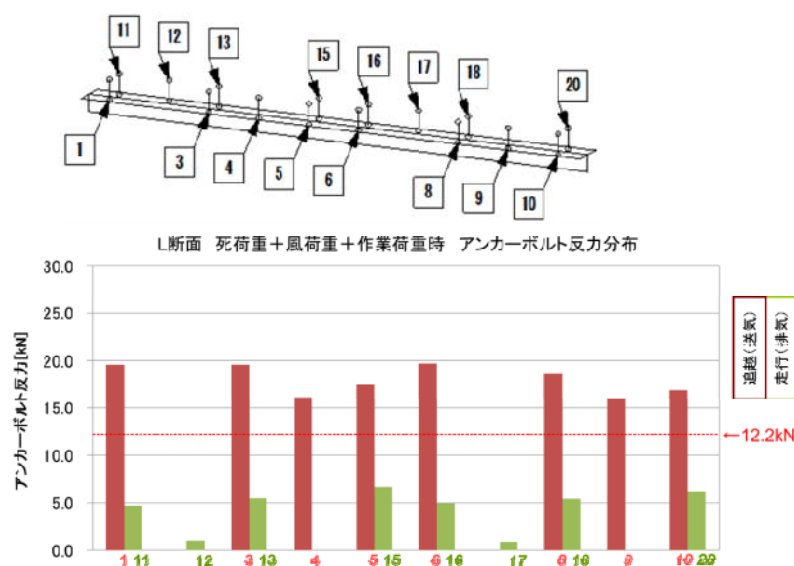


図3.2.4 L断面天頂部接着系ボルトに生じる反力に関する有限要素解析結果 (天頂部接着系ボルトのバネ定数を $1.42 \times 10^4 \text{N/mm}$ とした場合)

同じ有限要素モデルを用いて、天井板及び隔壁板等の死荷重に対する天頂部接着系ボルトの反力分布を計算した結果を図3.2.5に示す。死荷重に対しても各天頂部接着系ボルトに生じる引張力(反力)は一定ではなく、ばらつきを有すること、その結果、死荷重に対しても設計で想定したよりも厳しい荷重状態に置かれる天頂部接着系ボルトが存在するとの計算結果が得られた。一つのCT鋼内の天頂部接着系ボルトに生じる引張り力が均一ならないのは、図3.2.5の変形図から分かるように、天頂部接着系ボルトによる固定状態に応じてCT鋼に生じるたわみ・ねじれが均一にはならないためと考えられる。仮に、ウェブを挟んで接着系ボルトが必ず2本1組になるように20本配置した場合には、接着系ボルトに生じる引張力はほぼ均一になる。

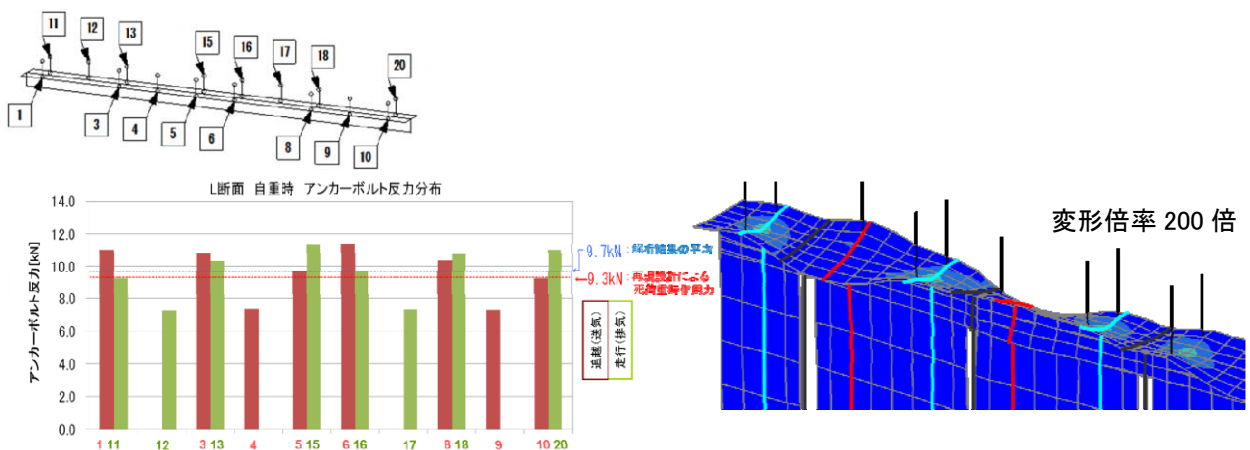


図3.2.5 L断面天頂部接着系ボルトに生じる死荷重反力に関する有限要素解析結果
(天頂部接着系ボルトのパネ定数を $1.42 \times 10^4 \text{ N/mm}$ とした場合、また変形図の変形倍率は200倍)

以上より、当初設計では、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が見込まれていなかったことで、隔壁板に作用する風荷重によっても無視できない大きさの引張力が天頂部接着系ボルトに生じることが確認された。また、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から、天井板及び隔壁板等の自重に対してもCT鋼に不均等な変形が生じ、各ボルトの長期荷重が明らかに不均等になった可能性のあることが確認された。

なお、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、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、笹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」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。

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。

しかし、当時の製品カタログに示される使用条件では、「打込時、ボルトが孔の底に達したらすぐスイッチを切り、むやみにかくはんしすぎない事」という記載はあるが、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として、例えば直径16mmの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。

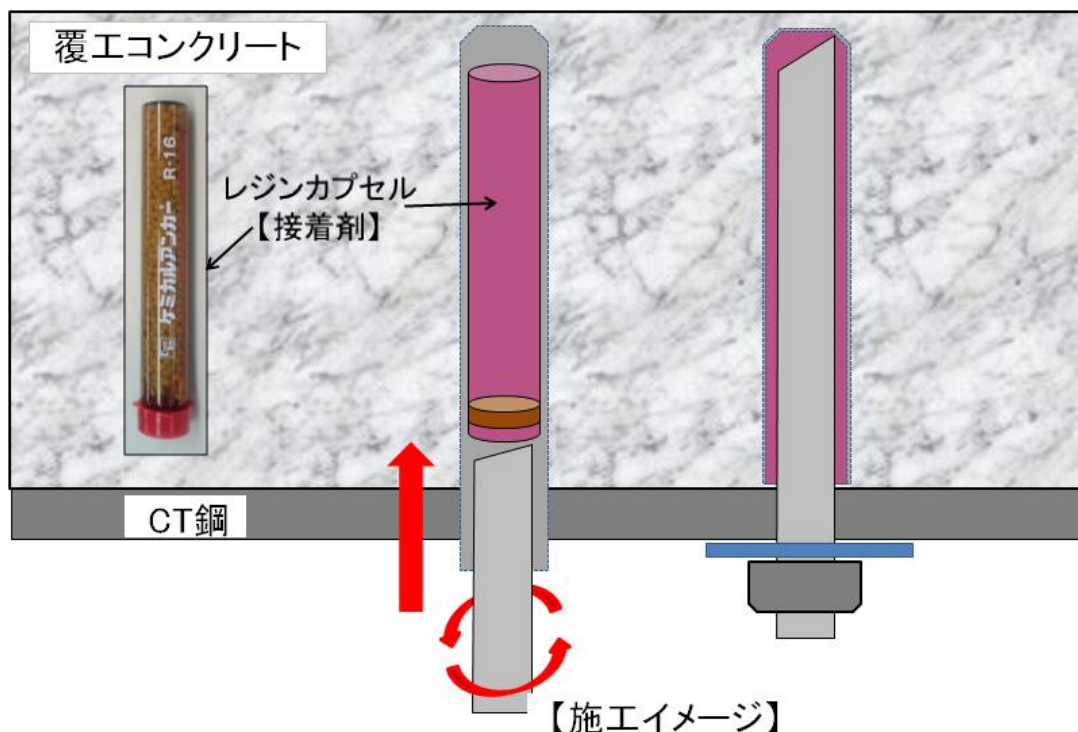


図3.3.1 カプセル方式の接着系アンカーボルト

3.4 天頂部接着系ボルトの施工出来形調査

天井板落下区間内や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57箇所において、覆工コンクリートのコア採取を行い、天頂部接着系ボルトの埋込み状態を観察した。図3.4.1に採取箇所を示す。26箇所は、天井板落下区間から採取したものである。

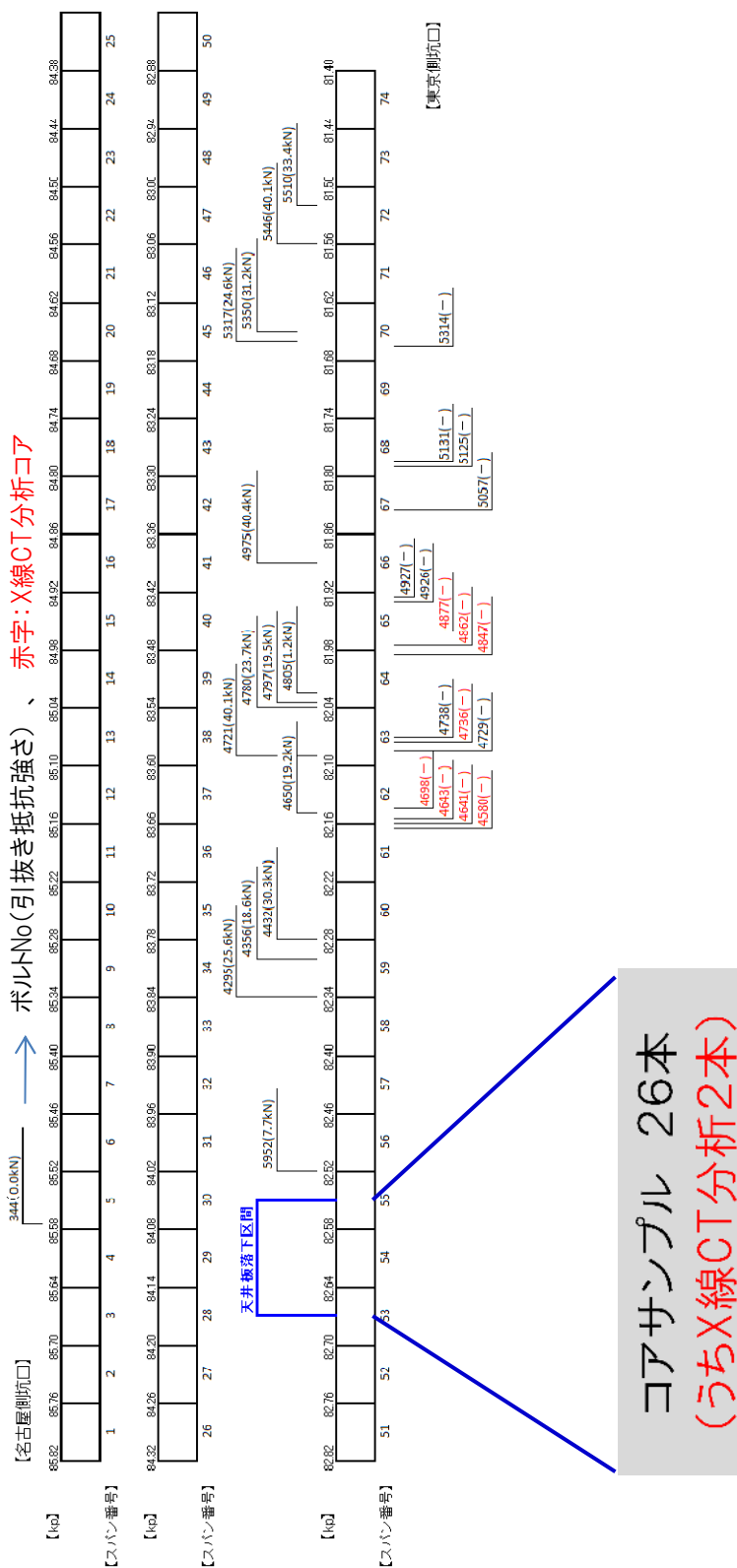


図3.4.1 コアサンプルの採取位置

図3.4.2にコア観察結果を示す。図3.4.2によれば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孔底とボルト先端の間の隙間に残留していることがわかる。

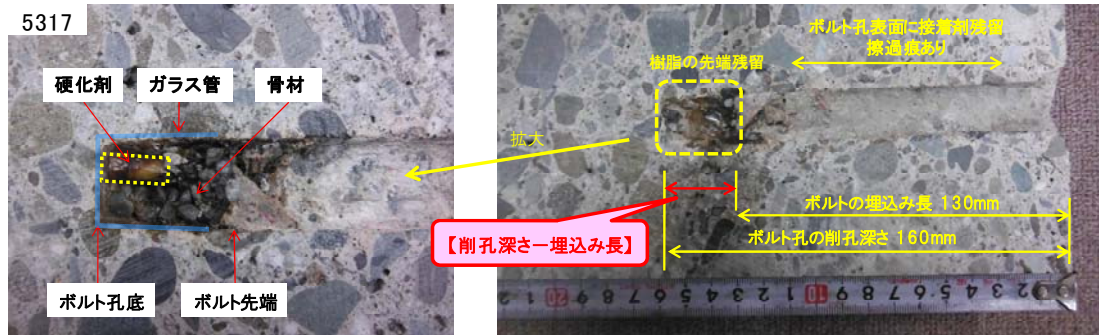


図3.4.2 コアサンプルの切断観察結果

ボルト削孔径、削孔深さ、埋込み長の分布を図3.4.3に示す。ここに、1箇所は直径20mmのボルトを用いているので、整理から除外した。ボルト削孔径は平均19.5mmでばらつきが少ない。一方で、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であり、ばらつきが大きい。平均的にも削孔深さが埋込み長よりも約28mm長かった。

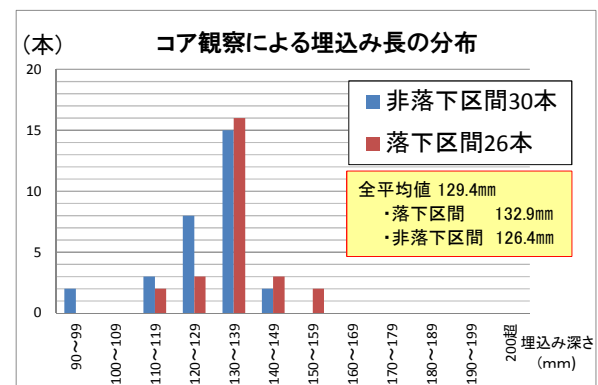
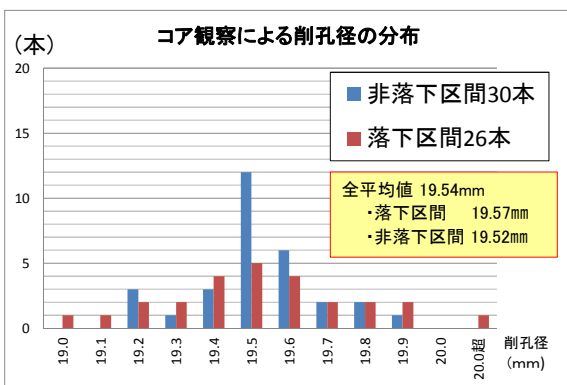
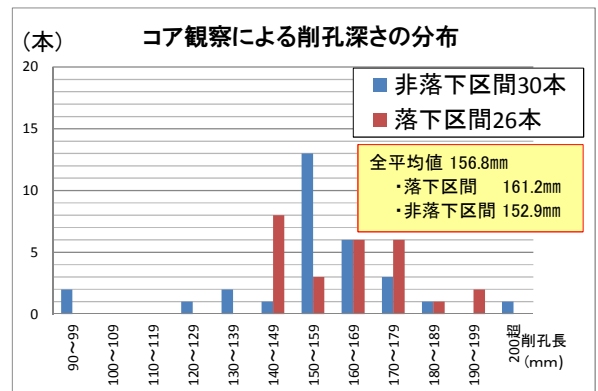
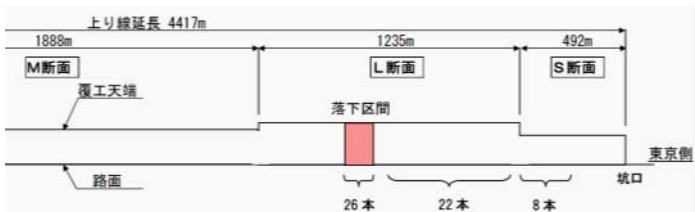


図3.4.3 コア採取位置と削孔径、削孔深さ、埋込み長の計測結果

図3.4.4には、ボルト孔の削孔深さとボルト埋込み長の差の分布を示す。同図では、樹脂等の一部がボルト先端部分に残留しているか否かを区分して示した。ボルト孔底とボルト先端位置が一致しない限りは、樹脂等の一部が攪拌されないままボルト先端に残留する傾向がある。

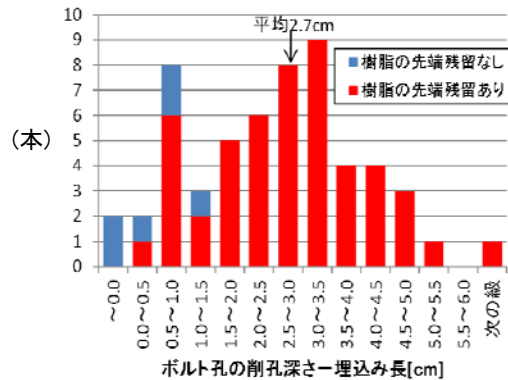


図3.4.4 ボルト孔底とボルト先端の距離（[削孔深さ]-[埋込み長]）と樹脂の残留状況の関係

また、図3.4.5に示すように、覆工コンクリート内部には一部空隙の存在が確認された。コア採取位置57箇所のうち8箇所では、ボルトが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ていた。採取したコアの一部空隙があったものは先の8箇所も含めて合計で57箇所中22箇所であった。

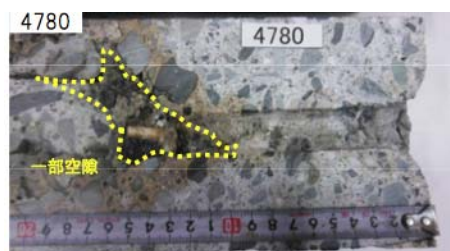


図3.4.5 覆工内部にある空隙へ接着剤が流出していた例

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に施工手順や管理方法については、以下のことが確認された。

- ～ 2.2にまとめたように、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、完成図（図2.2.1参照）に記載されていた寸法は130mmであったこと。
- ～ 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は不明であること。
- ～ 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。

3.5 天頂部接着系ボルトの引抜試験

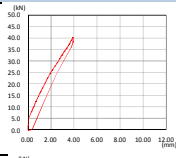
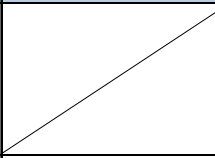
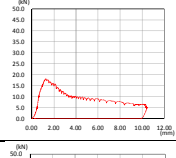

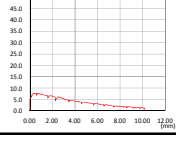

笹子トンネル上り線全線(事故区間を除く)にわたって、L, M, S断面それぞれで天頂部接着系ボルトの引抜試験を実施した。安全確保のため、CT鋼および隔壁板を存置したまま試験を行った。隔壁板は送気ダクト側のCT鋼ウェブに設置されており、CT鋼位置でのジャッキ設置が困難なため、試験対象のボルトは排気側ダクトのものとした。ボルト材料の降伏点応力度相当(約40kN)を目標に載荷し、荷重と変位を記録した。試験は、試験中の安全性も考慮しておおよそ等間隔になるように141箇所(以後、「グループ1」という)、その後、事故区間の前後区間や141箇所のボルトの中で引抜強度が低かったボルトの近傍など44箇所(以後、「グループ2」という)、全185箇所を実施した。有効データ数はグループ1で139、グループ2で44、合計183であった。

図3.5.1に引抜試験実施位置と実施結果を、表3.5.1に試験結果の概要を示す。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 断面にて観察された。また、名古屋側L断面で12.2kN未満であったボルト2本は、試験前に触診したとき引き抜けたり、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。

表3.5.1 引抜き抵抗力試験の結果

■引抜き抵抗力試験結果(183箇所)

引抜き抵抗力試験の結果

引抜き抵抗力 ランク	箇所数 割合			引抜き抵抗力試験結果 グラフ(一般例)	引抜けたアンカー写真 (一般例)
	当初試験 (ランダムサンプリング) (139箇所 [※])	追加試験 (44箇所)	合計 (183箇所 [※])		
A 40kN 以上	59 箇所	11 箇所	70 箇所		
	42 %	25 %	38 %		
B 12.2kN 以上~40kN 未満	72 箇所	25 箇所	97 箇所		
	52 %	57 %	53 %		
C 12.2kN 未満	8 箇所	8 箇所	16 箇所		
	6 %	18 %	9 %		

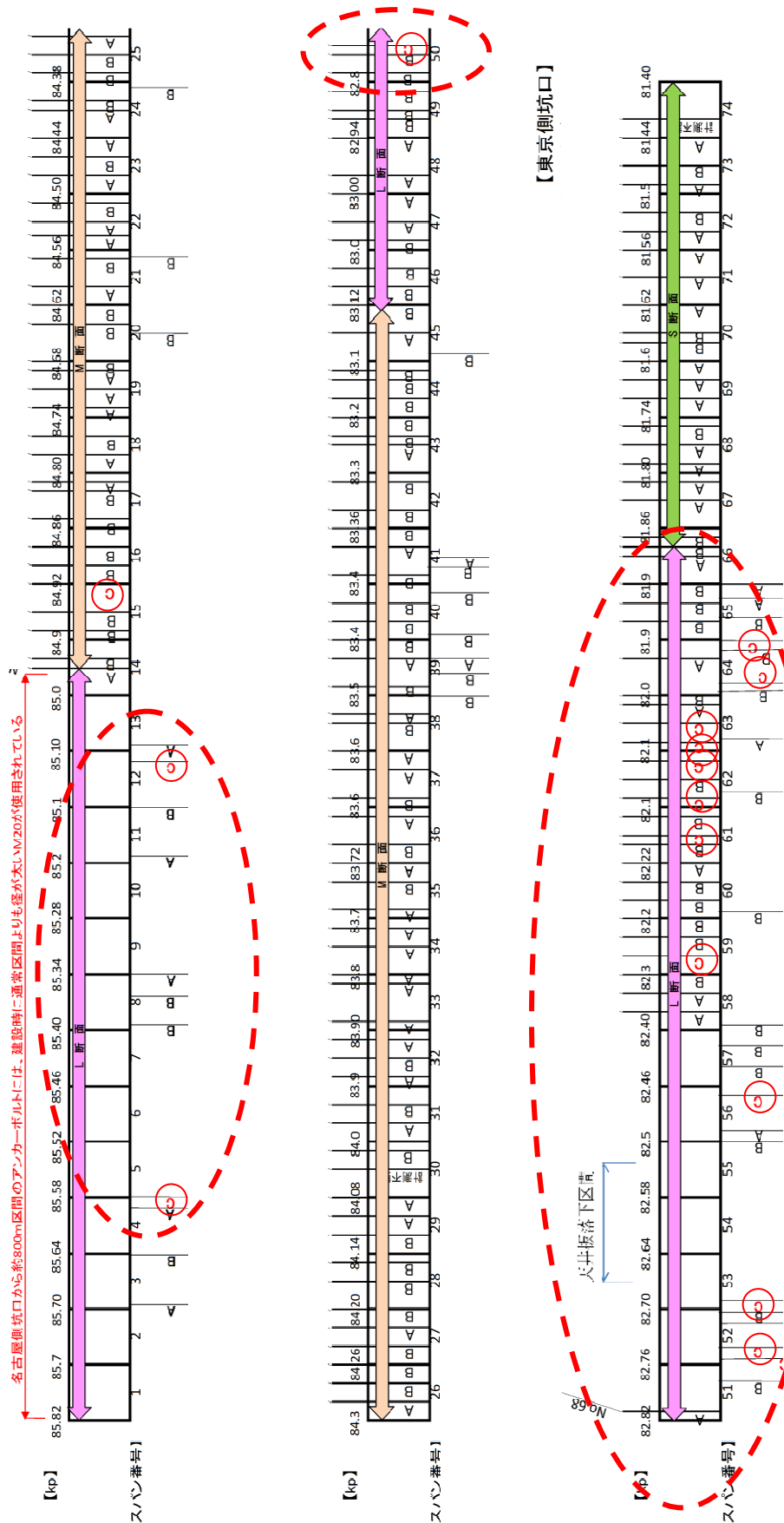


図3.5.1 引抜試験実施位置と引抜強度の分布(分類A=引抜強度が40.0kN以上であったもの、分類B=引抜強度が12.2kN以上40.0kN未満に達する前に引き抜けたもの、分類C=引抜強度が12.2kN未満であったもの)

図3.5.2に引張強度の累加構成率を示す。ここに、グループ1の試験結果を用い、M20ボルトが用いられていた名古屋側L断面の試験結果を除いたうえで整理している。試験強度の中央値は35.5kNであり、ボルト材料の降伏点応力度相当の荷重である40kNよりも小さかった。

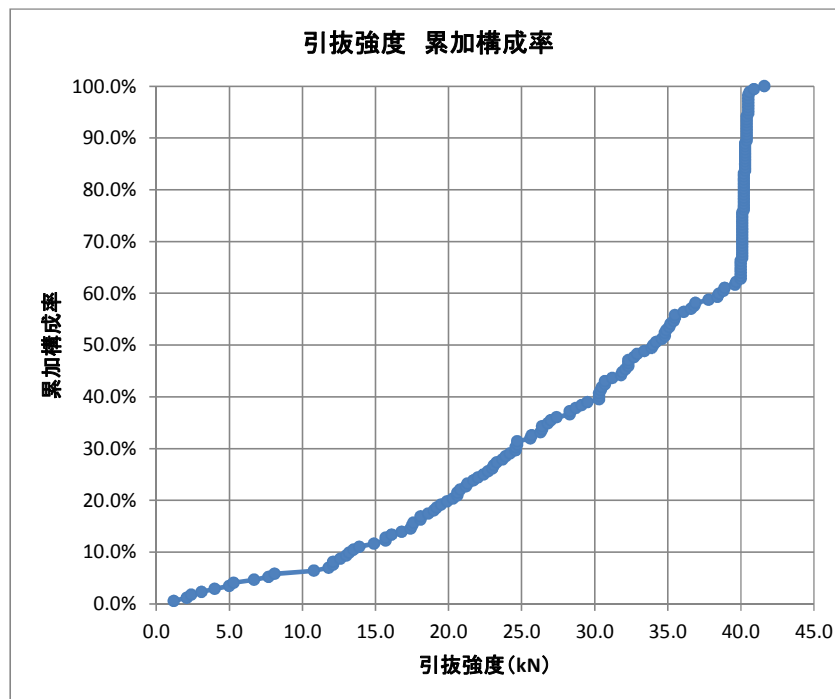


図3.5.2 引抜強度の累加構成率

計測された荷重変位曲線と引き抜けたボルトの例を図3.5.3及び図3.5.4に示す。引抜試験で引き抜けたボルトには、荷重変位曲線に明瞭なピーク点が現れるものもあれば、そうでないものもあった。なお、上部CT鋼と覆工コンクリートとの遊び等に起因して、載荷開始直後荷重変位曲線の勾配は多様な値を取り得る。

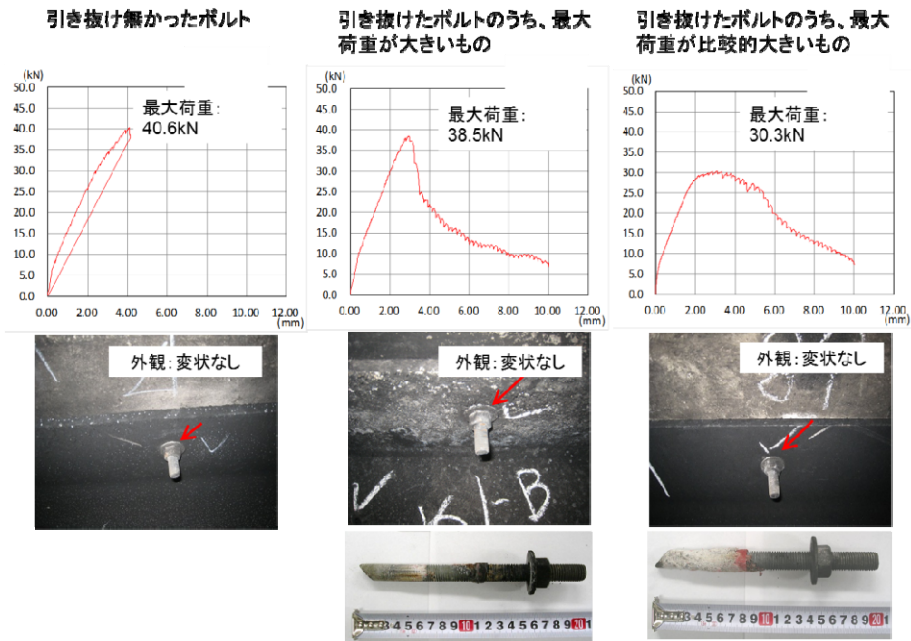


図3.5.3 引抜試験で得られた荷重変位曲線の例(引き抜けなかったボルトや比較的大きかったボルトの例)

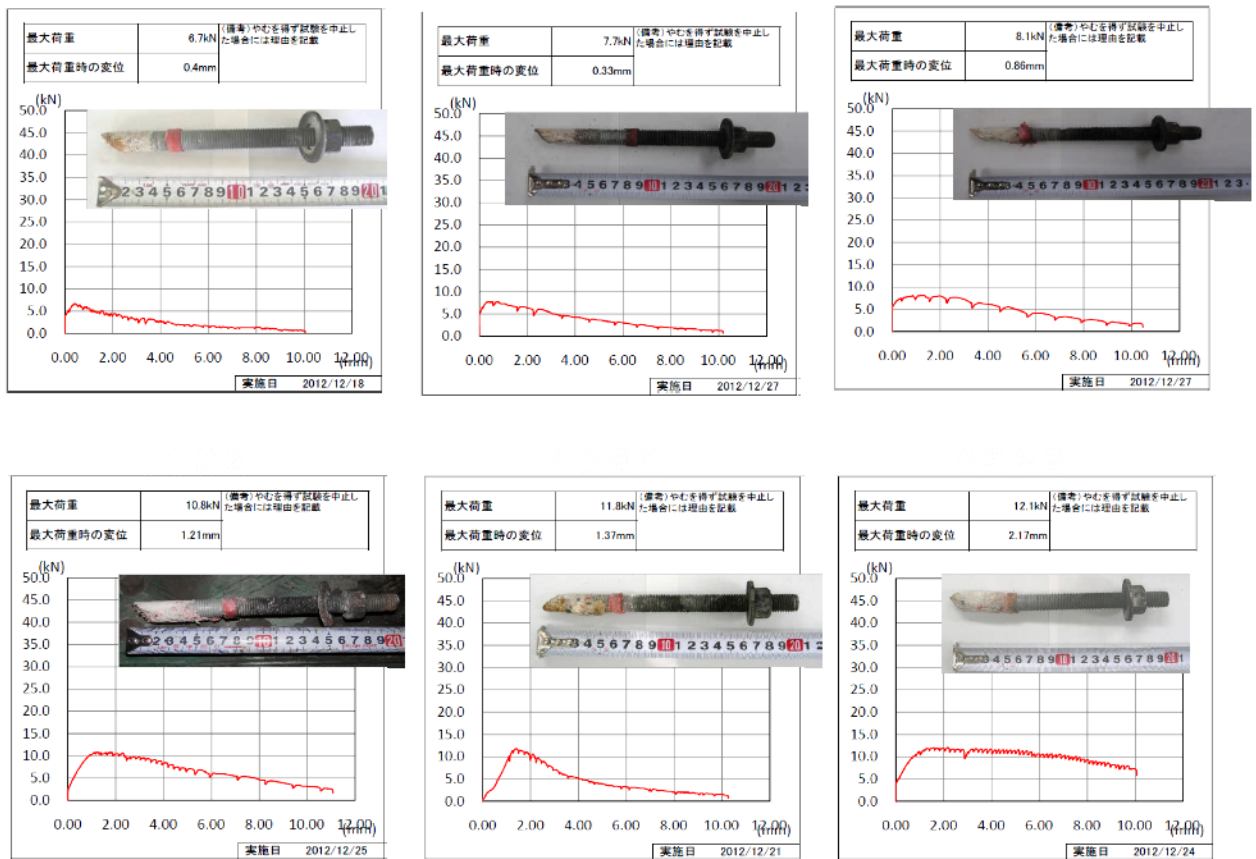


図3.5.4 引抜試験で得られた荷重変位曲線の例(強度が低かったものの例)

また、接着系ボルトの引抜強度は、ボルトと覆工コンクリートの隙間が接着剤で隙間無く満たされている部分の長さにも依存する。この長さを、ここでは試験によって引抜けたボルトの状況から推定することにする。引き抜けたボルトを観察すると、ボルト上に残存していた接着剤がボルト全体に付着していないものも確認された。

図3.5.5に、M20ボルトが用いられていた名古屋側L断面の試験結果を除いた上で、引き抜けたボルトについて、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剤の付着長であったと仮定したときの付着長（以後、「接着剤付着推定長」という）と、ボルト先端から実際に接着剤が残っていた範囲が接着剤の付着長であったと仮定したときの付着長（以後、「残存接着剤付着長」という）の分布を整理した結果を示す。天頂部接着系ボルトが位置した断面毎に凡例を変えてプロットしている。試験時に接着剤がボルトから剥落することも考えれば、実際の付着長は、これらの仮定した付着長の間のいずれかの値であったものと考えられる。全体として、接着剤付着推定長は60mm～140mmの間で、また、残存接着剤付着長は30mm～140mmの間でばらついた。同様に、引抜強度と接着剤付着長の関係も、ばらつきが大きい。付着長の平均値はS, L, M断面の順で短くなるが、付着長が分布する範囲についてL, M断面間で顕著な差は見られない。

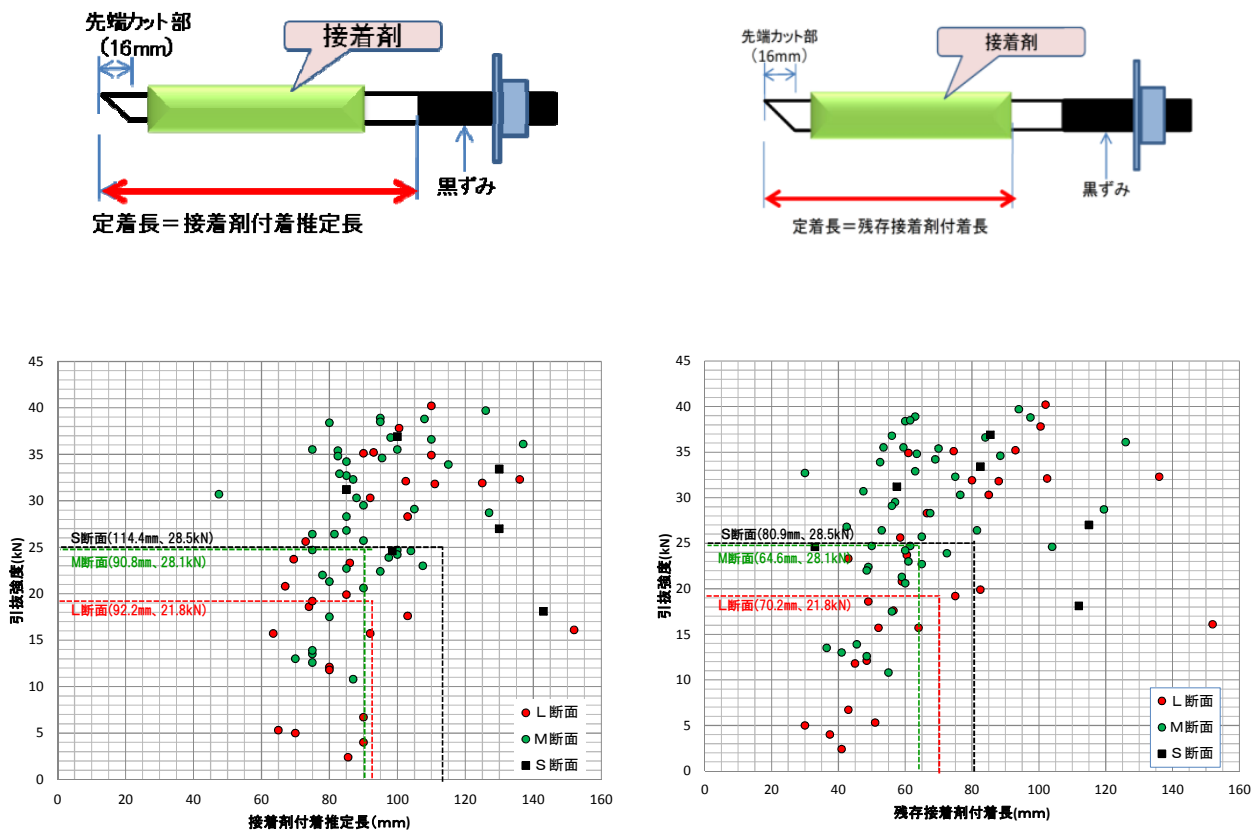


図3.5.5 引き抜けたボルトに接着剤が付着していた長さと引抜強度の関係

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

経年の荷重作用は、持続荷重と繰返し荷重に分類される。天井板及び隔壁板等の自重(死荷重)による常時引張り力が持続荷重であり、排気設備の稼働時に生じる風荷重が代表的な繰返し荷重である。3.2に示したように、L断面では、M、S断面に比べて、天頂部接着系ボルトが受ける常時引張り力も風荷重による引張り力も特に大きかった。

繰返し荷重環境の厳しさは、荷重の絶対値だけでなく、繰返し回数や振れ幅にも依存する。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・停止とそれに伴う繰返し荷重振幅があったと推計される。また、3.2の有限要素解析結果に基づけば、風荷重が作用したときに天頂部接着系ボルトに生じる引張り力と常時引張り力の差である繰返し荷重振幅の計算値は、これも、L断面ではM、S断面に比べて特に大きかった。

また、経年の繰返し荷重の影響として、換気装置稼働時の定常的な風圧変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。

(2) 長期耐久性(材料劣化)に関する調査(化学分析)

筐子トンネルにて使用された接着系ボルトの接着剤は、3.3に記載したように不飽和ポリエステル樹脂が用いられているものと考えられる。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。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。

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。分析結果の例を図3.6.1に示す。分析の結果、樹脂に相当する部分からカルシウム元素が検出された。その分布性状から、カルシウムイオン・水酸化物イオン等コンクリートの成分を含んだ水分が、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と浸入したと考えられる。

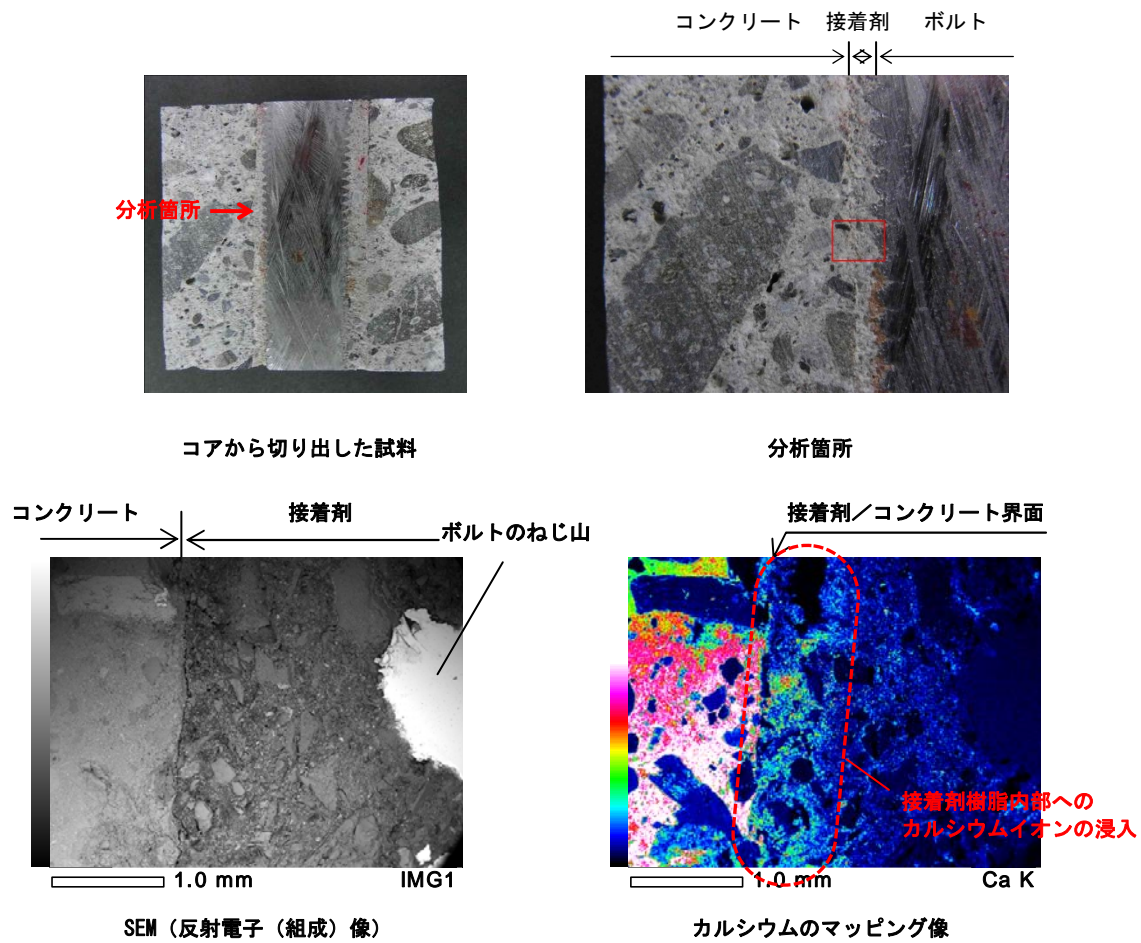


図3.6.1 X線マイクロアナライザ分析

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。図3.6.2に示すように、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。天頂部接着系ボルトに付着した接着剤樹脂においては、まず、表面(覆工コンクリートとの界面付近)にて試料を採取したのち、さらに切削したうえで、内部(ボルトとの界面付近)からも試料採取した。ボルト孔内に付着していた接着剤樹脂においては、孔内に棒を挿入して掻き出すことにより試料採取した。

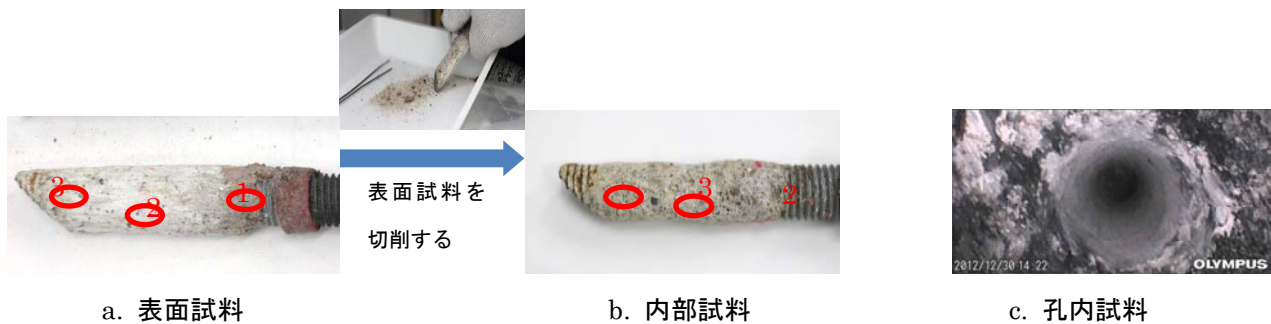


図3.6.2 接着剤樹脂試料の採取

分析の結果、図3.6.3に示すように、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った。このような性状は既往の不飽和ポリエステル樹脂の赤外線吸収スペクトル性状*に一致しており、筐子トンネルで用いられた接着系ボルトの樹脂は不飽和ポリエステル樹脂であると照合された。

※ たとえば、滝山榮一郎「ポリエステル樹脂ハンドブック(昭和63年、日刊工業新聞社)」を参照。

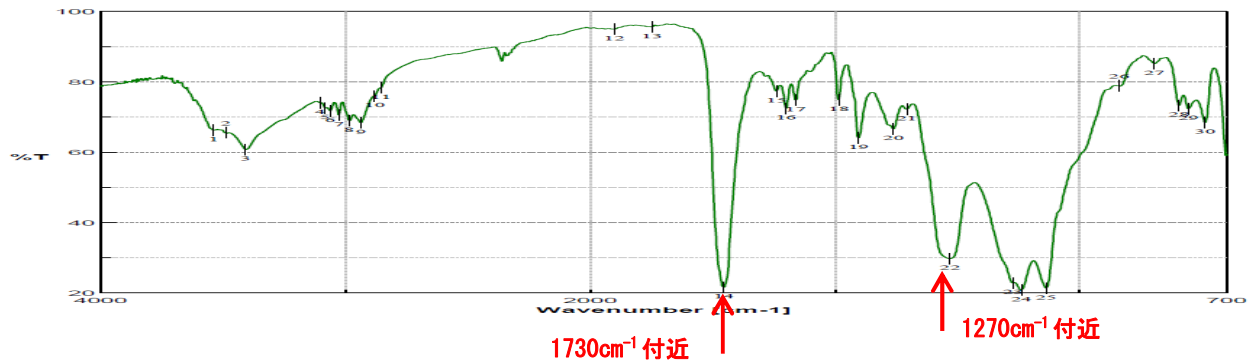


図3.6.3 代表試料の赤外線吸収スペクトル

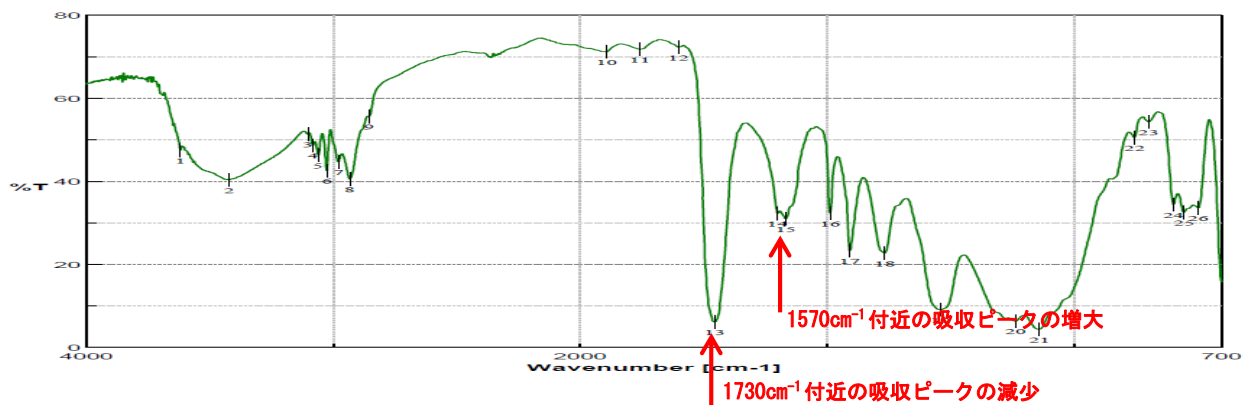


図3.6.4 ボルト表面試料の赤外線吸収スペクトル

また、図3.6.4に示すように、ボルトに付着した接着剤樹脂のうち、覆エ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思われる 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思われる 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、図3.6.5に示すように、スペクトルを吸光度表示し、 1570cm^{-1} 付近の吸収ピークと 1730cm^{-1} 付近の吸収ピークのそれぞれについてベースラインからピークトップまでの高さを求め、その比(以下、「吸光度比」という)を当該スペクトルの加水分解度合いの指標とし、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、覆エ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)。

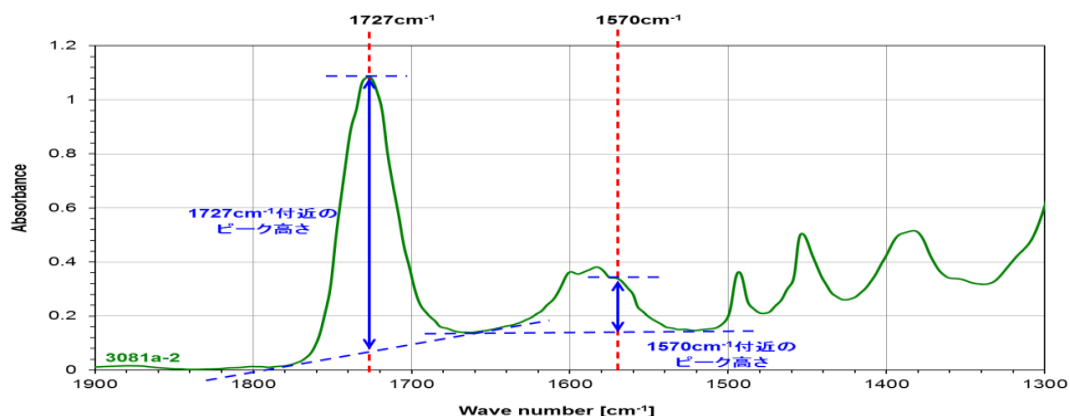


図3.6.5 加水分解度合の定量分析法の説明図

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、図3.6.6に示すように、以下のことを確認した。

- 付着強度が4.0N/mm²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4.0N/mm²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。

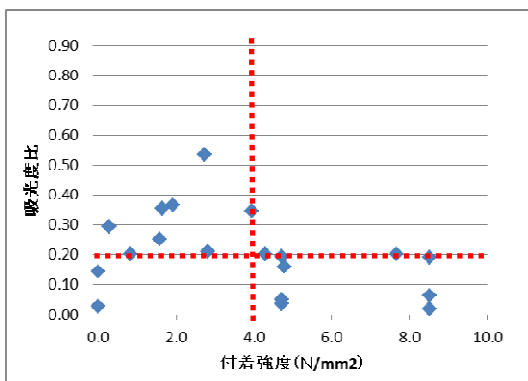


図3.6.6 ボルトの付着強度と1570cm⁻¹/1730cm⁻¹吸光度比(ボルト表面試料)

(3) 接着剤内部の状態に関する顕微鏡観察

出来形の調査を行うため、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コア57本のうち8本について、樹脂内部の状態を走査型電子顕微鏡で詳細に観察した。その結果、図3.6.7に示すように、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、無数の微細な内部き裂や空隙が観察された。

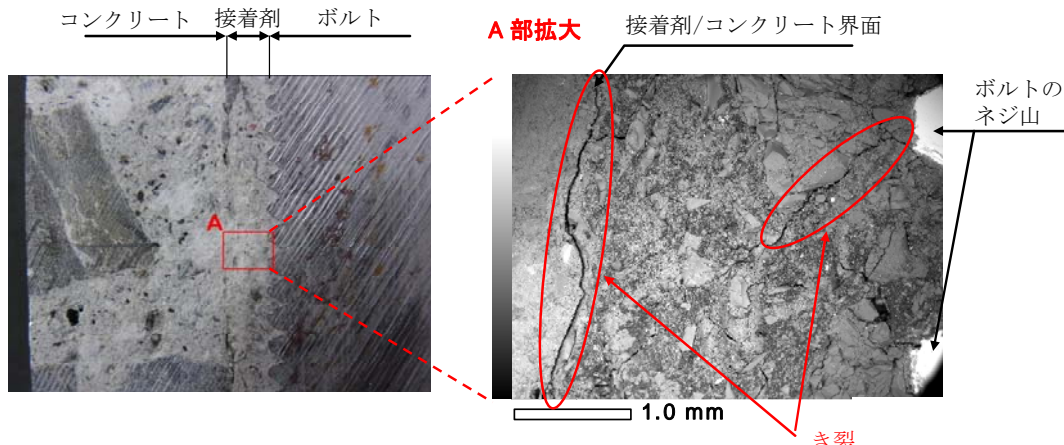


図3.6.7 接着剤樹脂内部の走査型電子顕微鏡観察結果(ボルト表面試料)

3.7 天井板吊り構造の維持管理に関する調査

表3.7.1に、2000年以後の点検等の実施状況をまとめた。点検、調査履歴について中日本高速に説明を求めたところ、以下のことを確認した。

- ～ 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は、近接での目視及び打音は12年間未実施であったこと。
- ～ 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。
- ～ 点検、調査履歴等が、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ていなかったこと。たとえば、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。

また、天頂部接着系ボルトの補修補強履歴について中日本高速に説明を求めたところ、以下のことを確認した。

- ～ 今回の調査で確認した天頂部接着系ボルト652箇所の補修補強の形跡について、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確認できる状態で保存されていなかった。
- ～ その後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。なお、243本のロックボルトは、天頂部接着系ボルトの代替ではなく、追加されていることが確認された。
- ～ 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。

表3.7.1 2000年以後の天井板の点検状況

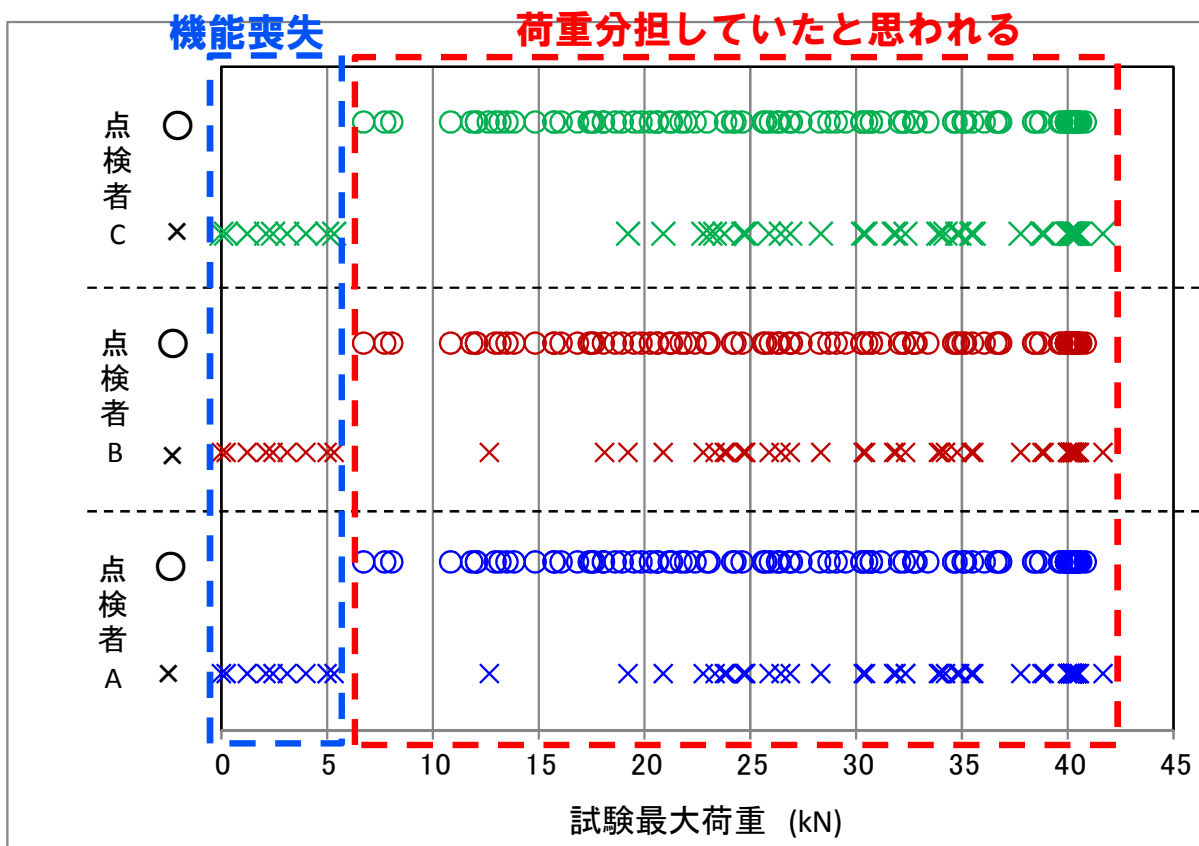
点検年度	点検種別	点検目的	点検内容	点検内容の補足及び変更経緯等
2000 (平成12)	臨時点検	道路構造物総点検(頻発する鉄道や道路構造物での事故を受けて)	ダクト空間の近接目視及び打音点検	
2001 (平成13)	補強工事にて、アンカーボルトの引張試験(4本)、鋼材腐食度、せん断試験、コンクリート現位置試験や強度試験などの調査を実施			
2005 (平成17)	定期点検	前回点検から5年目	路面上から近接目視及び打音点検	第三者被害は天井板下面からのコンクリート片はく落対象と位置付け天井板上面は対象外
2008 (平成20)	【計画】定期点検 ↓ 【実施】臨時点検	【計画】点検要領に基づく詳細点検 ↓ 【実施】対象部位の絞り込み	【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) ～2011 (平成23)		天井板撤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検討業務」の中で調査を実施(調査内容:天井板や隔壁の取付け状況、覆工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。調査は西坑口から約1.8km区間で、落下区間は調査していない)。 ・2011年には、天井板撤去を前提としない排煙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、「構造物の変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、変状の状況を定量的に解析評価するために実施するもの。」

3.8 打音試験

あと施工アンカーの打音検査(打音点検、叩き点検等とも呼ばれる)では、一般に、アンカーをハンマーで打撃し、打撃時の音の清濁、反発の有無、ボルトの動きの有無等を観察する。打音試験と引抜試験の結果を比較整理した結果を図3.8.1に示す。ここに、引抜試験にて引抜強度をほぼ喪失していたことが確認されたボルトの例を図3.8.2に示す。経験のある点検員であれば、近接点検(近接目視、打音及び触診)にて、図3.8.2のように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。



・グラフのサンプル数: 試験対象の185箇所

図3.8.1 打音点検と引抜強度の関係

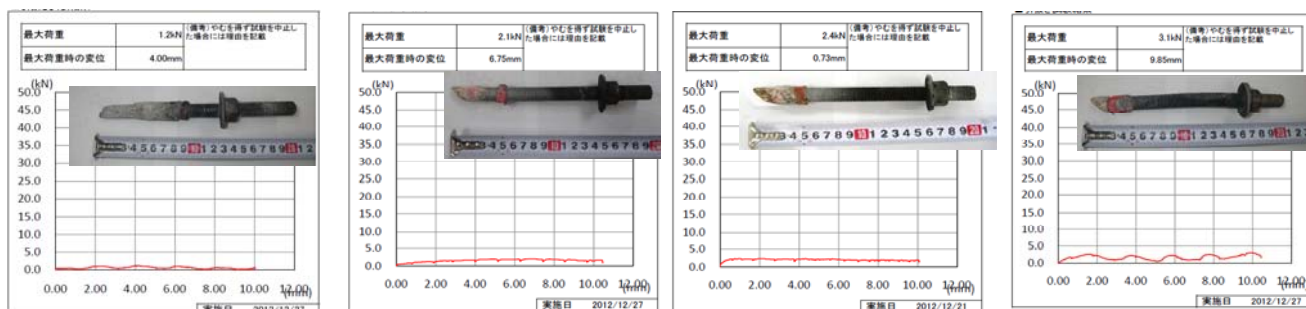


図3.8.2 引抜強度をほぼ喪失していたボルトの例

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、近接点検(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。

他方、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が明らかになった。その理由として以下の2点を確認した。

- CT鋼を使用していたという笹子トンネル特有の構造特性が、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
- 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、分析した結果によれば、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

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。

- 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。
- 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。
- 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、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。
- 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。
- 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の変位が生じた状態で留まっていたという事象が多数観察された[※]と報告されている。一方、筐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は確認されていない。

※ 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.

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・検討結果を踏まえると、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。そして、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接着剤引抜強度※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。
- 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下・喪失が進行したと推定される。
- 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、全体としては天井板及び隔壁板等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、単独または複数の破壊形態の複合形態により引き抜けたことで、CT 鋼、天井板及び隔壁板の落下が生じたと推定される。
- さらには、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 の区間にわたり連続して落下したと推定される。

※ 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、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に起因するボルトの引抜強度を指すものとする。

以下に、この推定に至った理由を述べる。

第一に、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。今回行った天頂部接着系ボルトの施工出来形調査や引抜試験で得られたボルトの観察結果を踏まえれば、工事完成時点において所定の接着剤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。

第二に、工事完成時点の接着剤引抜強度を常時引張り力で除した値が 1 に近いほど、経年の中で、何らかの要因により、たとえば図 3.6.7 に見られたような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、接着剤引抜強度低下の進展は著しくなると考えられる。この推論は、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事実符合する。

第三に、経年の中での何らかの要因によるき裂や空隙の発生については、主として、以下の2つの事象が考えられる。

- 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き裂や空隙が生じやすい環境下にあった。

※ 一般に、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を言う。たとえば、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り、疲労と呼ばれる。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。

- 経年の劣化に関して、水酸化物イオン・カルシウムイオン等を含んだアルカリ性水分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が、接着剤引抜強度に一定の影響を与えた可能性が確認された。

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ことから、今後の調査・研究の蓄積が望まれる。

4.2 事故発生要因の整理

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から、事故発生に関連があったと考えられる要因を整理する。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、致命的な事故に至ったと考えられる。

(1) 設計に係わる事項

笹子トンネルの天井板は他のトンネルに比べると非常に高さの高い隔壁板を有していたことや、採用されていた隔壁板とCT鋼の継手構造では、水平方向の風荷重がCT鋼に伝達され、CT鋼が変形することから、水平方向の風荷重によって天頂部接着系ボルトに生ずる引張力は、天頂部接着系ボルトの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。他方、このような挙動は、天頂部接着系ボルトの設計で見込まれた引張力として反映されていなかったものと考えられる。

また、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たが、各ボルトが負担する引張力にばらつきがあったと考えられる。これは、ボルトによっては、経年の持続荷重に対する強度の余裕を結果として小さくしたと考えられる。

(2) 材料・製品に係わる事項

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ま施工された理由の一つと考えられる。

また、現在まで、長期耐久性について十分な知見が得られているとは言えない[※]が、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。これは、長期耐久性について十分検討しないまま施工された理由の一つと考えられる。なお、長期耐久性に関する知見としては、たとえば今回の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接着剤引抜強度の試験結果が少なくとも我が国ではこれまでに見られない。また、接着剤樹脂の疲労や加水分解の程度と付着強度の低下の関係の考察に必要な知見も十分で無い。

※ 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。」との記載がある。

(3) 施工に係わる事項

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長の記載について、矛盾点があった。また、天頂部接着系ボルトの今回の施工出来形調査の結果、実際に、ボルト孔の削孔深さとボ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。したがって、接着系ボルトの強度発現原理に照らせば、建設当初から、所定の接着剤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と考えられる。

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、接着剤引抜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かった。

なお、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。

(4) 点検方法・点検実施体制に係わる事項

事故が生じたという結果を踏まえれば、以下のような中日本高速の笹子トンネル天井板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。

- 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が先送りされていたこと
- 膨大な数の補修補強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

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、かかる事故原因調査の途中において、各種資料やデータの整合性の確認作業等に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、維持管理履歴や補修補強履歴を管理することが重要であることを付記する。

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

本委員会における調査・検討の結果、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ことが確認された。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も、技術的な限界として確認された。

以上のことを踏まえると、少なくとも接着系ボルトで吊られた既設の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施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(フェイルセーフ)[※] 構造・部材を設置すべき。
※ バックアップ(フェイルセーフ)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。
- 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载荷試験を実施すべき。

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補強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 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

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、その他の既設重量構造物(ジェットファン、道路標識等)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

これまでの調査・検討の結果を踏まえれば、接着剤樹脂については、疲労等の長期耐久性について十分な知見があるとは言えないことが明らかとなった。このため、接着剤樹脂の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

本委員会では、今回の事故を教訓とし、国民が安全に安心して利用できる道路を提供するため、設計、施工、維持管理の各段階において、今後重視すべき視点について、以下の通りまとめた。

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である。

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。さらに、個々の設計においては、

- 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徴を理解し、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
- 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。加えて、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。

また、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。併せて、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

(1) 適切な点検の実施と維持管理への反映

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。また、設計や施工の記録だけでなく、点検・補修補強の履歴や目的の記録を残し、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である。

(2) 情報の共有と基準等への反映

構造物や材料・製品に事故や不具合等が生じた場合に、同種類似の構造物や材料・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べきである。

(3) 新技術の開発

引張り試験等の載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。

まとめ

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・負傷者が生じた我が国において例を見ない重大な事故であり、二度とこの様な事故が発生しないよう、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とともに、点検要領の整備、設計基準の改訂及び新技術の開発などが着実に進められることを望む。

また、今回の教訓として、各種情報の共有・継承の重要性が上げられる。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的に当該構造物の点検に携わるようにするなど、補修補強履歴等が確実に記録・保存される仕組みの構築やマネジメントの実施が重要である。

最後に、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、実施体制の整備を図っていくべきである。

「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会」規約

平成24年12月4日

(名称)

第1条 この委員会は、トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会（以下「委員会」という。）という。

(目的)

第2条 委員会は、平成24年12月2日に発生したトンネル天井板の落下事故を受けて、落下の発生原因の把握や、再発防止策等について専門的見地から検討することを目的とする。

(委員)

第3条 委員会の委員は、別紙のとおりとする。

(委員長)

第4条 委員会に委員長を置く。

2 委員長は、事務局の推薦により委員の確認によってこれを定める。

3 委員長は、委員会の議長となり、議事の進行に当たる。

4 委員長に事故があるときは、委員のうちから委員長が指名する者が、その職務を代理する。

(事務局)

第5条 委員会の事務局は、国土交通省道路局が行う。なお、中日本高速道路株式会社は、必要な資料提供、説明など、委員会の運営に協力する。

(関係者からの意見聴取)

第6条 委員長が必要と認めるときは、関係者を呼びその意見を聞くことができる。

(議事の公開)

第7条 会議については冒頭部分のみ公開とし、傍聴は不可とする。議事要旨について、事務局は委員長の確認を得たのち、会議後速やかにホームページで公開する。

(守秘義務)

第8条 委員会委員に対しては、国家公務員と同様に国家公務員法上の守秘義務が課せられる。

以上