

25. 牛鍵トンネル崩落事故の地質的要因について

東北新幹線施工中の事例

Geological factor of the Ushikagi tunnelling collapse

○ 北原秀介(鉄道・運輸機構), 太田岳洋, 川越 健(鉄道総合技術研究所), 永井誠二(日本国土開発)
Shusuke Kitahara, Takehiro Ohta, Takeshi Kawagoe, Seiji Nagai,

1. はじめに

東北新幹線は,すでに八戸まで開業(平成14年12月1日)し,さらに八戸〜新青森間を平成22年度末の完成に向けて施工中である。

この間には,複線トンネルで世界最長となる八甲田トンネルが平成17年2月27日に貫通しているが,八戸から八甲田トンネルに至る間に,13本のトンネルが施工中である。この13本のトンネルは,いずれも鮮新世後期から更新世の堆積物を施工対象とし,主に砂・シルト・火山灰で構成されるいわゆる土砂地山であり,しかも地形条件から小土被りでの施工が余儀なくされている。

このような地形・地質条件の中で施工をしていた牛鍵トンネル(延長2,070m)が,平成17年5月31日に施工中の切羽後方480mで大規模な崩落を発生し,地表部を大きく陥没させた。

この崩落事故に至った地質および地下水の要因について報告する。

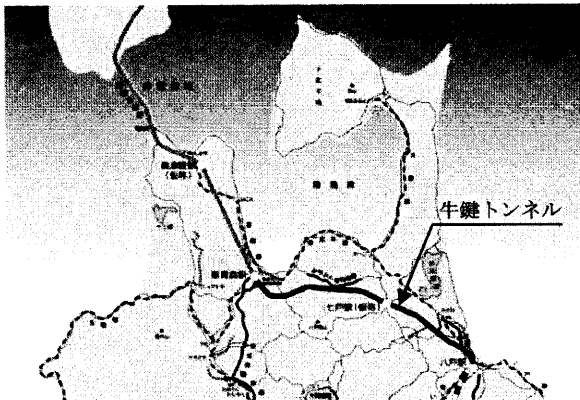


図-1 牛鍵トンネル位置図

2. 地形・地質概要

当区域は,中〜後期更新世の氷河性海水準変動により形成された海成段丘が広く分布している。

北東から南西に高くなり,奥入瀬川以南に低位段丘が認められ,奥入瀬川以北は中位の下:高館段丘(標高40〜20m),中位の上:天狗岱段丘(標高50〜30m),高位:七百段丘(標高80〜40m),最高位:袋町段丘(標高100〜60m)の4段丘に大別される¹⁾。

トンネル近傍では,南西部に位置する標高62.1mの有信山をピークにして北東方向に傾斜する地形となっており,トンネルは地形の傾斜方向に直交するように位置している。

高館面が形成されたのは約12万年前で,相対的に海面の大きな上昇,下降が起きた時期である²⁾。高館面を形成した海面の上昇時には,それ以前の海面の低かった時期に形成されていた開析谷に沿って海進があり,この海進によって新たな水系が台地内に開析するとともに,砂や泥が堆積された(ts層やtc層)。

その後,海進の最盛期が過ぎ,海面の低下に伴ってそれまで海が広がっていた場所は再び陸域となり海成段丘面が形成され,火山灰などが堆積した(ta層)。

トンネルに出現する地質は,更新世中期に堆積した野辺地層(Noc層,Nos層)を最下位として,その上に中位段丘の高館段丘堆積物で構成されている。

野辺地層は泥質層(Noc)を境に上位の砂層をNos1,下位の砂層をNos2とした。斜交層理の明瞭な砂層を主とし,シルトも伴い,トンネルの下位に一部出現する。

トンネル断面の大部分は,高館段丘堆積物で構成され,砂質土,粘性土,火山灰などで構成されている。

時代	地層名	記号	土質名
第四紀更新世	十和田・八戸火山灰層	ln	黒ボク・火山灰
	高館火山灰層	ta	ローム・浮石
	高館段丘構成層		粘性土
		tc-s	砂質土・浮石
			砂質土
	野辺地層		砂質土
		Nos2	粘性土・砂質土
			砂質土

図-2 層序区分凡例

3. 崩落事故に至る経緯

牛鍵トンネルは,青森側坑口(623km340m)から八戸側坑口(621km270m)に向けて掘削をしていた。崩落事故を発生した時点で上半切羽は621km480mに至り,残り210mとなっていた。

また、同時に上半切羽から 480m 後方の 621km960m 地点でインバートコンクリート敷設作業のための昼間作業で底盤掘削が実施され、翌日のコンクリート打設を待つ状態にあった。

夜間の坑内点検 (22:00) で同地点の湧水量が増加していることが確認され、さらにスプリングライン付近の吹付けコンクリートの剥落も認めた。吹付けコンクリートの破壊音が聞こえたことから、直ちに坑内作業員を退避させたところで、轟音とともに崩落が始まった (23:30)。

トンネル坑口を閉鎖後、地上部を確認したところ田畑部が陥没していることを確認 (23:40) し、崩落範囲が拡大して 6 月 1 日の 2:00 に崩落が収束した。



図-3 地上崩落部全景

4. 崩落原因に関する検討

4.1 地形・地質状況

牛鍵トンネル周辺に分布する谷はいずれも北東に位置する小川原湖に向かって流れ広範囲に流路を伸ばし、台地内の地下水を広く集水していることが想定される。

崩落地点周辺の詳細な地形の特徴は、以下のようにまとめられる。

- 1) 図-5 に示されるようにトンネルは崩落地点を含めた 4 箇所 (A, B, C, D) で埋没谷と交差している。
- 2) 崩落箇所は上記の 4 つの埋没谷のうち B 地点にあった。

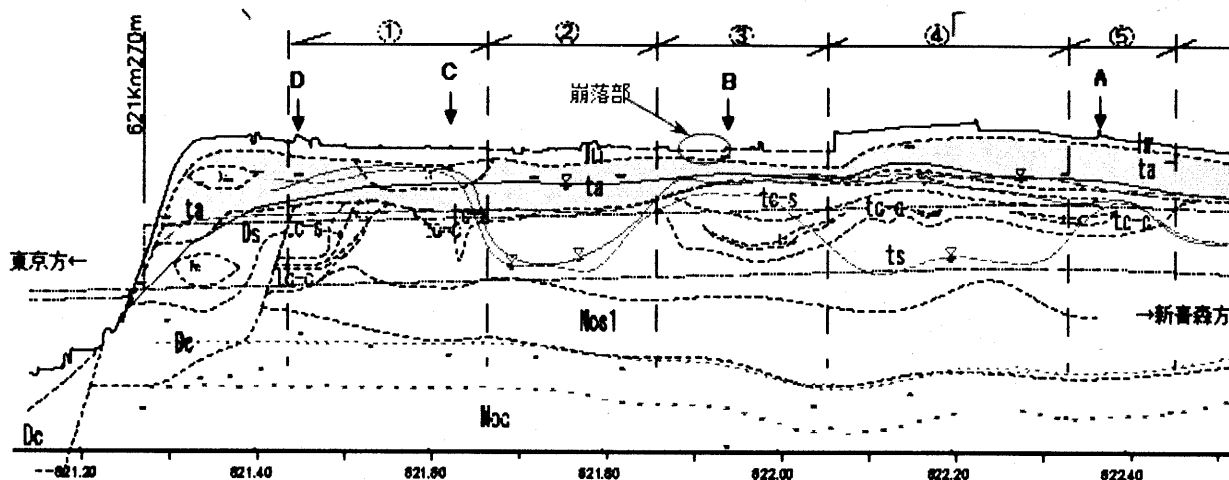


図-5 崩落箇所周辺の地質縦断面図

る。

- 3) B 地点の埋没谷は、4 箇所の埋没谷の中で現地形において最も大きな集水面積を有する。
- 4) インバート施工済区間の A 地点は、現地形で明瞭な集水地形を示していない。
- 5) 今後インバート掘削を行う C, D 地点は A, B 地点と異なり、砂土路川へ向う流路の谷頭にあたり、特に D 地点で集水面積が比較的大きい。

開削時の情報から崩落箇所の地質は、下位から ts 層 (砂質土層), tc-c 層 (粘性土層), tc-s 層 (軽石混じり砂質土層), ta 層 (軽石混じり火山灰層), lm (ローム層) である。tc-c 層は tc-s 層と同様の砂層や火山灰質の堆積物を挟み、tc-s 層中には tc-c 層と同様の粘性土がレンズ状あるいは不連続に分布する。

崩落箇所のトンネル断面内には、インバート部に ts 層、下半からトンネル肩部は tc-c 層、肩部から天端には tc-s 層が分布する。湧水は、トンネル右側の tc-s 層の砂層部で認められる。

開削部で確認された tc 層は、腐植物の混入していることや火山性堆積物の堆積状況などから陸域の河川堆積物であると考えられる。一方、その下位の ts 層は堆積物の層相から海域の堆積物と推定される。

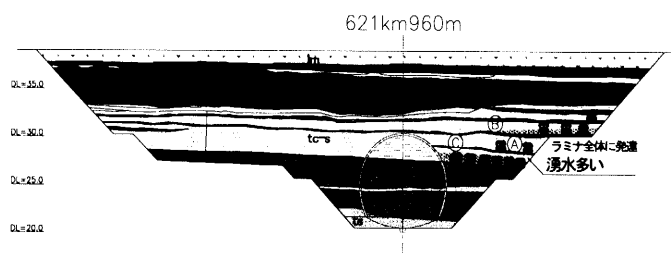


図-4 地質横断面図

4.2 地下水等の状況

4.2.1 地下水揚水量の変化

トンネルは、左右 20m 千鳥に配置したディープウェルによる地下水排除工を併用して施工を行った。ディープウェルは、tc-s 層（トンネル天端・肩）～ts 層（インバート）の地下水排除を目的に設置し、上半切羽通過の約 2 ヶ月前から稼働を初めインバート通過後約 40m まで稼働している。崩落地点での上半切羽通過は、崩落の半年前である。

崩落地点周辺のディープウェルおよび観測井の位置を図-6 に、揚水量の経時変化を図-7 に示す。

崩落地点の土地利用状況は、水田および長芋等の畑作が主体に行われており、崩落の 2 週間余り前には水田への引水が行われているが、水張りに例年の 2 倍以上の日数を有している（地主談）。

図-7 より、揚水量は降水による変動は殆どなく、田への引水後に急増している。これは、水張り時の状況も考慮すると、引水の多くは地中に浸透し揚水量の急増につながったと考えられる。ただし、場所により揚水量の変動は大きく異なり、地下への浸透状況が一様でないことが伺える。

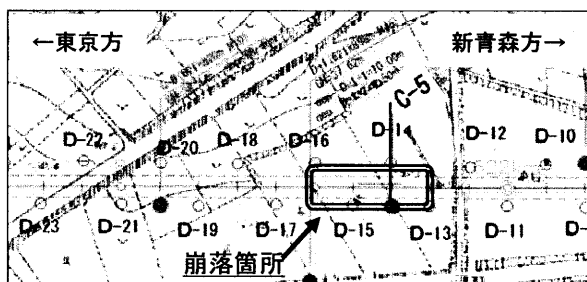


図-6 揚水井配置図

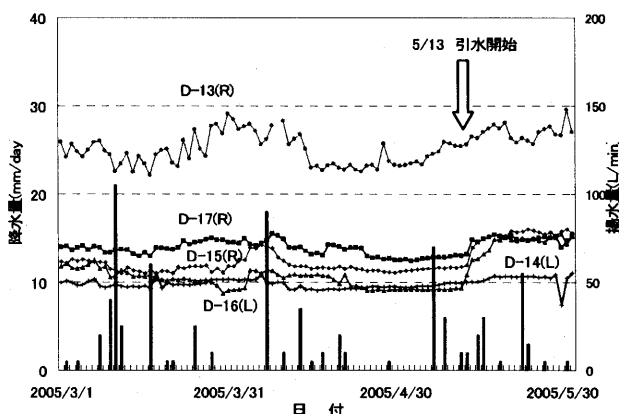


図-7 ディープウェル揚水量の経時変化

4.2.2 地下水位の変化

崩落前のディープウェル、観測井の水位変化を図-8 に示す。ディープウェルの水位は、帯水層ごとにスクリーンを分割していないため、tc-s 層、ts 層の合成水位をとらえている。

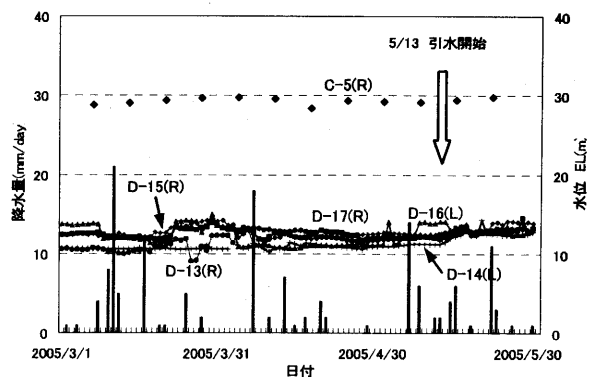


図-8 地下水位の経時変化

図-8 より、地下水位は引水直後から数十 cm～1m 程度上昇し、崩落直前までその水位を維持している。また、観測井(C-5)の水位は、常にトンネル肩付近に分布する tc-s 層にあり、引水後は 60cm 程度上昇している。

地下水位の挙動は、揚水量同様に引水による影響を受けており、引水による地下水増加の根拠となるものである。

4.3 水質の状況

トンネルに浸透した水の起源を確認するために、崩落直後および復旧開削途中において、トンネル坑内水および地下水、水田等の水を採取し水質分析を実施した。試料採水位置を図-9 に、水質分析結果を図-10 に示す。開削途中の地下水は、トンネル肩部に分布する tc-s 層から採水した。

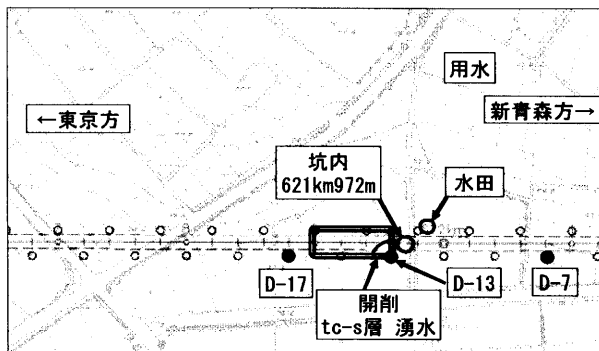


図-9 水質分析試料採水位置図

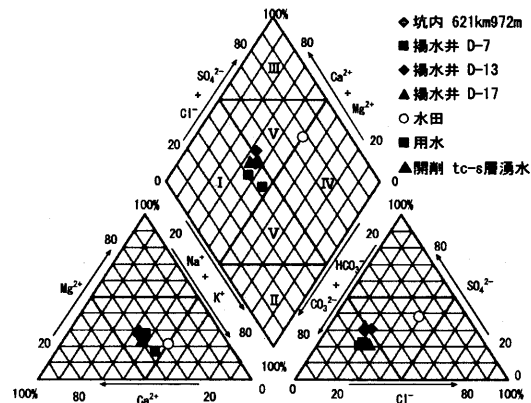


図-10 崩落箇所周辺のトリリニアダイアグラム結果

図-10の座標系から、崩落地点の坑内水および揚水井の水質は、I：炭酸塩硬度型に属し河川水・伏流水・浅層の地下水と同様の水質を有しているのに対し、水田は異なる座標系に属し別の水質となっている。

さらに、陽・陰イオンの定量評価による具体的な水質特性を把握するために、図-11に示すヘキサダイアグラムを作成して採水場所ごとのイオン量比較を行った。

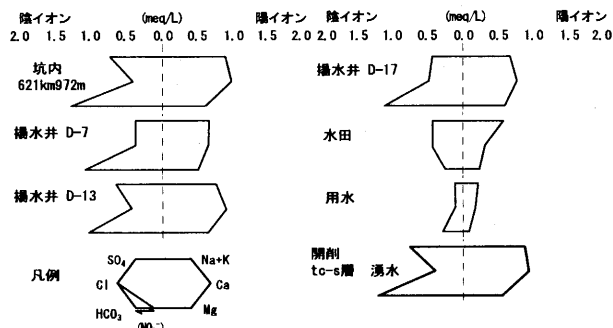


図-11 崩落箇所周辺のヘキサダイアグラム結果

水田および用水は、含有イオンが非常に少なく天水に近い性質を有しているのに対し、トンネル坑内への湧出水・揚水井・tc-s層は、イオン含有量が多く Ca^{2+} と HCO_3^- を優勢とする一般的な河川の水質に近い性質となっている。特に、崩落地点直近の坑内(621km972m)と開削時に採水した tc-s 層の水質は、極めて良い一致を示しており、崩落地点に最も近い揚水井D-13も坑内流入水およびtc-s層とはほぼ同じ性質の地下水と考えられる。

これらの水質分析結果から、崩落地点でトンネル坑内に流入した地下水は、主にトンネル肩部に分布する tc-s 層に胚胎されているものといえる。

ただし、これらの水質は崩落後の地下水を分析したものであり、崩落時にトンネル坑内に流入した地下水は、tc-s 層に胚胎する地下水に加え揚水量、地下水位の挙動から、引水により地下へ浸透した水も含まれていると考えられる。

4.4 試料試験の結果

崩落箇所周辺の開削部で試験のための試料を採取し、物理試験および力学試験を実施した。その結果を表-1および表-2に示した。

表-1 物理特性一覧表

地層名	記号	湿潤密度 (g/cm^3)	土粒子の密度 (g/cm^3)	自然含水比 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数 (%)
高館段丘 構成層	粘性土 tc-c	1.569	2.618	61.8	46.8	38.1	8.7
	砂質土 tc-s	1.489	2.660	59.5	47.9	35.1	12.8
	砂質土 ts	1.723	2.723	25.0	NP	NP	NP
地層名	記号	粒度特性(%)					地盤材料の分類名
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	均等係数	
高館段丘 構成層	粘性土 tc-c	1.2	50.1	35.3	13.4	44.8	細粒分質砂
	砂質土 tc-s	31.7	52.9	8.5	6.9	75.0	細粒分質砂
	砂質土 ts	0.0	96.0	1.8	2.2	1.9	砂

物理試験結果から以下が言える。

- 1) tc層は自然含水比が高い。
- 2) tc-s層は非常に淘汰が悪い。
- 3) ts層は均等係数が1.9と小さく、流砂を起こしやすい状態にある。

表-2 力学特性一覧表

地層名		記号	せん断強度		変形係数 (MN/m ²)
			全応力(CD)		
			cd (kN/m ²)	Φd (°)	
高館段丘 構成層	粘性土	tc-c	8.1	37.1	8.8
	砂質土	tc-s	18.7	37.5	34.2
	軽石				
	砂質土	ts	3.4	34.2	68.2

力学試験は、崩落部周辺地山が排水状態にあったと考えられることから、せん断強度特性としてCD試験値を採用した。

5. まとめ

崩落箇所周辺の地形・地質と地下水位の変動、揚水量の変化について調査を行い、試料試験等により崩落箇所分布する地質の物理特性、力学特性、水理特性を求めた。その結果は、以下のとおりである。

- 1) 崩落箇所は埋没谷にあたり、さらに現地形でも集水地形を呈する位置である。
- 2) 崩落箇所周辺では (ta 層+tc 層) と (ts 層+Nos1 層) の二つの地下水位が存在した。
- 3) (ts 層+Nos1 層) の地下水は揚水により顕著に水位が低下するが、(ta 層+tc 層) の地下水は常に高い標高に水位を有する。
- 4) 田への引水時期に観測井水位の上昇と揚水量の増加が認められた。
- 5) ts 層, tc 層ともにせん断抵抗角が比較的大きく、変形係数も大きい。

以上の結果に基づき、以下の過程で崩落したと推定した。

- ① 上下半掘削による地山の緩み領域の形成と tc-s/c 層中の水通 (地下水位) の分布
- ② 田への引水に伴う地表水浸透による上載荷重の増加とインバート掘削による緩み領域の拡大
- ③ 緩み領域の拡大に伴う tc-c 層中の亀裂の発生
- ④ 支保工脚部付近への浸透水の集中あるいは応力の集中による地山全体の破壊

以上

引用文献

- 1) 建設省計画局・青森県：青森県八戸・三沢地区の地盤、都市地盤調査報告書、第21巻、PP2, 1970
- 2) 横山芳春・七山太・桑原拓一郎・安藤寿男：堆積学的手法によって明らかにされた海成段丘の形成過程、地質ニュース、595号、2004