

I-47

地震応答特性を考慮したトンネルの地震観測計画について

北海道大学大学院	学生員	石田 高啓
北海道大学工学部	正 員	三上 隆
開発土木研究所	正 員	佐藤 京
(株)ダイヤコンサルタント	正 員	遠藤 真一

1. はじめに

一般に「トンネルは地震に強い」と言われているように、地中に建設される構造物の地震時の挙動に関する研究や観測実施例の報告は、地上構造物に比べて少ない。従来、地下構造物（シールドトンネルや揚水式地下発電所）や地下埋設物（ガス、水道管等）では、多くの研究や観測実施例⁽¹⁾が報告されている。

しかし、道路トンネルの場合、研究や観測実施例・被害度に関する経験的な報告例は数が少ない。トンネルのような線状構造物は、断層などの悪条件下の区間を避けることが難しく、これを境とした挙動の違いから、覆工が破壊に至る例が多いこと、断熱材を介した地山荷重の覆工への伝達機構を明らかにすることの観点から、地質及び地質構造・トンネル構造の両面で、二次覆工の安全性と経済的な設計法を検証していく必要があり、次の2つの課題についての観測目的を述べるとともに、強震観測設置計画について報告する。

課題1：断層を挟んだトンネルの挙動を明らかにする。

課題2：地山荷重の2次覆工への伝搬メカニズムの検討をする。

2. 目的

課題1について

- ①断層を挟んだトンネル岩盤内の地震波の位相のずれを確認する。
- ②トンネルのモデル化を行い、他の地山条件や地震動でのトンネルの安定性を明らかにする。

課題2について

- ①地震時の地山弛み領域の広がりを確認する。
- ②上記による、地山荷重増加の応力配分を確認する。
- ③防水シート・断熱材を介した覆工挙動を明らかにする。
- ④トンネル横断のモデル化を行い、他の地山条件や地震動毎のパラメータスタディから、覆工設計の目安を設定する。
- ⑤覆工応力から地山荷重を逆算する手法を開発する。
- ⑥岩石試験値とモデル化の入力値の検討を行う。

3. 幌満トンネルについて

北海道の中央部をほぼ南北に走る日高山脈の西縁部に位置する国道海岸線は、全般に堅硬な岩質の地質からなるが、日高造山運動による造構造作用を受け、断層、せん断帯などの割れ目が発達し、地表部に近い風化部では地盤の緩みから落石へと至っている。特に、国道336号線様似-襟裳間は、太平洋の海波に洗われた比高50～100mの波蝕崖が連続し、暴風雨、融雪あるいは降雨後などの振動や地盤のゆるみによって、しばしば落石・土砂崩壊、落氷が発生し、災害多発地帯の1つとして数えられている。(図-1)

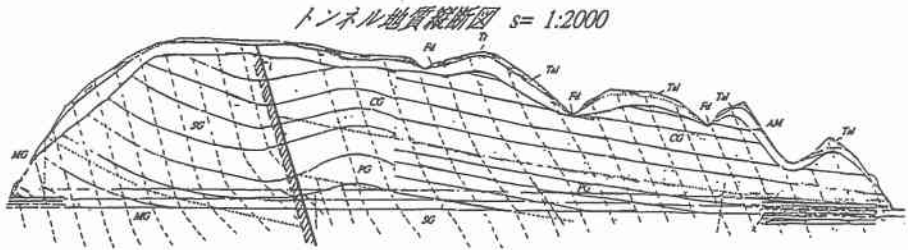
On The Project of Earthquake Observation of Tunnel Considered Response Characteristics of Earthquake. by Takahiro ISHIDA, Takashi SATOH and Shiniti ENDOU

幌満トンネルは様似町ランベツと幌満を結ぶ区間にほぼ東西方向にのびるトンネルで、ランベツ側から施工されている延長783mのトンネルである。当トンネルは、上記のように既設国道（海岸線）に散在する災害危険箇所を回避すべく、国道をショートカットする形で計画されている。

幌満トンネルの地質層序を表-1に示す。トンネル周辺に分布する基盤の地層は先白亜紀の広域変成岩類より成る黒雲母片麻岩であり、その特徴的鉱物により、石灰質片麻岩（CG）、泥質片麻岩（PG）、珪質片麻岩（SG）および斜長石変晶斑状黒雲母片麻岩（MG）に細分される。所々、湧水が認められるが、いずれも約10%分の比較的少量の湧水である。また、SP530付近に断層が存在する。支保パターンは、坑口付近の坑口パターンを除いてCIIパターンで、坑口から約150mまでのところに断熱材が入っている。



図-1 幌満トンネル位置図



測点	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300					
掘削方坑口																																				
施工パターン	CII (断熱材)	破砕帯															CII (断熱材なし)	CII (断熱材)																		
地質	黒雲母片麻岩										珪質片麻岩					泥質片麻岩					珪質片麻岩、石灰質片麻岩															
ロケット計測力計																																				
掘削力計																																				
掘削力計																																				
掘削計																																				

○△□の中に表示している数字は、各測定断面に設置されている計測計の測定点数を示している。

図-2 地質縦断及び計測位置図

4. 計器設置位置

(1) 計器設置位置の選定

計測設置位置を選定するにあたって、簡単な地震応答解析を行った。

(a) 対象地震入力波：

釧路沖地震（1993）静内橋LG波

(b) 使用プログラム スーパーFLUSH

(c) 解析方法 弾性解析

(d) 加震加速度 最大基盤加速度280gal

(e) モデル 図-4

(f) 物性値 一般地山部（CII地山）：

変形係数10000kgf/cm²
 G0=42000 kgf/cm² $\nu=0.2$
 密度=2.6gf/cm³

断層部（DII地山）：

変形係数2500kgf/cm²
 G0=8400kgf/cm² $\nu=0.35$

表-1 地質層序

時代	地層名	記号	構成及び 岩質、分布	地層の性状		
				割れ目の平均 間隔 (cm)	硬軟	
第四紀	沖積土	Dt	礫、大礫、砂	—	未固結	
	扇状地性堆積	Fd	#	—	#	
	崖錐	T	礫、砂、粘土	—	#	
	洪積世	既丘陵堆積物	礫、砂	—	#	
新第三紀 白亜紀	侵入岩類	カコウ岩 ハンレイ岩	G _r ⁺ G _d	小規模岩体として半区画でも認められる 調査地では確認されていない	50~100	硬
	成層	角閃岩	AH	終点園城口付近に分布する	5~50	硬
		石灰質片麻岩	CG	石灰質層層を多く挟む		硬
		泥質片麻岩	PC	全体に比較的割れ目の多い片麻岩		硬
		珉質片麻岩	SC	全体に比較的割れ目の多い片麻岩		硬
		斜長石英片麻岩 黒雲母片麻岩	MG	斜長石英スポットの碎屑質を多く含む片麻岩		硬

表-2 地山分類

N.A.N.I. 地山番号	古生層→成層		火山岩		第三紀堆積岩類		亀裂係数 K (%)	地山定数					地山定数 c tH
	vp (km/s)	RQD (%)	vp (km/s)	RQD (%)	vp (km/s)	RQD (%)		亀裂係数 K (%)	亀裂係数 K (%)	亀裂係数 K (%)	亀裂係数 K (%)	亀裂係数 K (%)	
A	4.02上 (4.52上)	60以上	4.02上	60以上				1,000以上	60以上	542上	10,000以上	0.25以下	
B	4.3~4.8 4.0~4.5	55~60	3.5~4.0	70~80	3.0以上	60以上	25以下	1,400~200	60以上	33~38	10,000以上	0.25以下	
C I	4.0~4.5 (3.5~4.8)	30~50	3.0~3.5	50~70	2.5~3.0	40~60	25~50	300~150	40~30	50~45	10,000~ 20,000	0.25~0.30	
C II	3.5~4.0 (3.0~4.0)	20~30	2.5~3.0	40~50	2.0~2.5	30~40	50~70	150~70	30~15	45~40	10,000~ 10,000	0.25~0.30	
D I	3.0~3.5 (2.5~3.0)	20以下	2.0~2.5	30~40	1.5~2.0	20~30	70~80	70~30	15~10	40~25	10,000~ 500	0.20~0.30	0~2
D II				20以下	1.0~1.5	20以下	80以上			30~15	5,000~ 1,300	0.20~0.30	0~1
E								15~5	5~1	30~15	1,000~300	0.20~0.30	1以下 0.75以下

- (注) 1. 古生層→成層の vp の値は割れ目に富む古一実成岩類。なお、蛇紋岩、片岩類のうち、吸水膨張性を示すものは別途考慮。
 () 内はこれ以外の古生層→成層。
 (注) 2. 火山岩のうち、流泉、熱水等により変質したものは別途考慮。
 (注) 3. 湧水がある場合は別途考慮。
 (注) 4. RQD (5m) は 5 cm の RQD とする。
 (注) 5. vp は地山弾性波速度 (P波速度) を示す。
 (注) 6. 亀裂係数 K は次式による。K = $\left(1 - \frac{vp}{vp_0}\right)^2 \times 100$ (%)。vp : 岩石試体の P波速度

入力物性値は表-2を参考にした。

断層部はCIIパターンで施工されているが、実際の物性値が不明なためDIIを仮定としている。

また、入力弾性係数は、動的歪みレベルを考慮し、前期 (f) の 1.0 倍値を使用した。

(1) 計測設置位置の選定

図-4に解析結果を示したが、断層を境にして、鉛直変位に違いがみられることから、断層の両側地盤の挙動が捉えられる計測設置位置とした。

釧路沖地震（静内橋LG波）

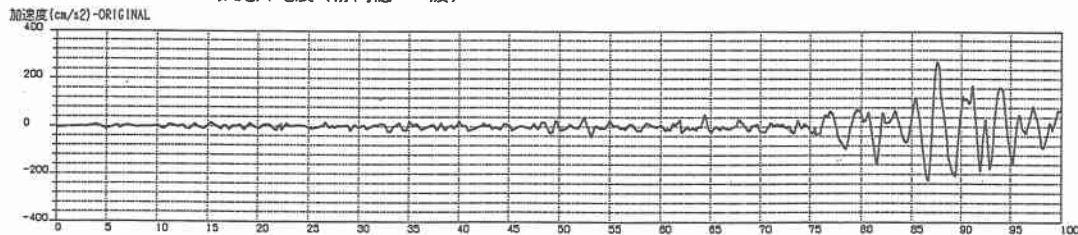


図-3 入力地震波（釧路沖地震 静内橋LG波）

(2) 計器設置位置

計器配置を前図-2に示したが、約95m離れたSP171地点の幌満橋のピアに強震計を設置した。

トリガーは、SP268地点の地表上に設置した強震計で発する配置とした。又、トンネル内は、前述の断層を境にした計測断面2 (SP516) と3 (SP552) の地山内に配置した。

計測断面2、3には他に、ロックボルト軸力計と覆工応力計を設置し、地震時の地山のゆるみ挙動と覆工の挙動を観測することにした。

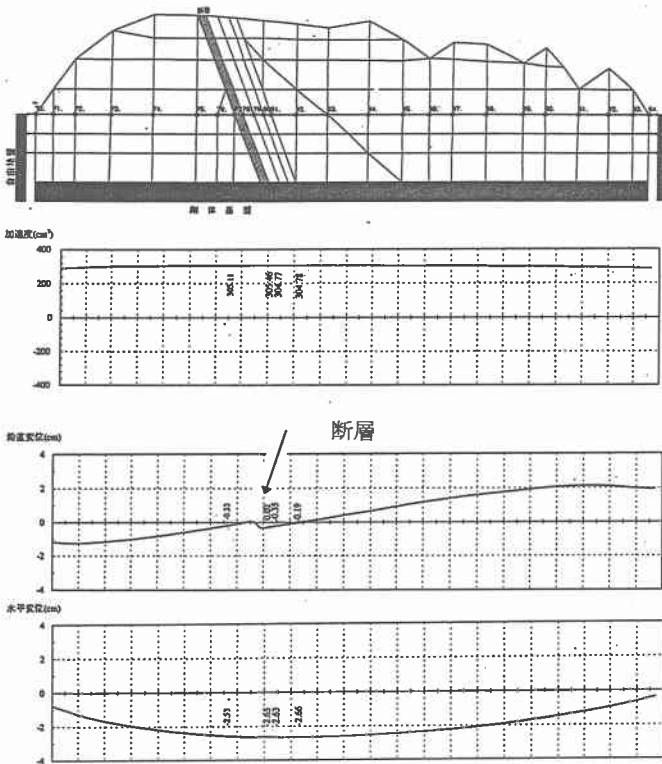


図-4 解析モデル及び解析結果

計測断面2、3のトンネル計測配置は、図-5のとおりである。

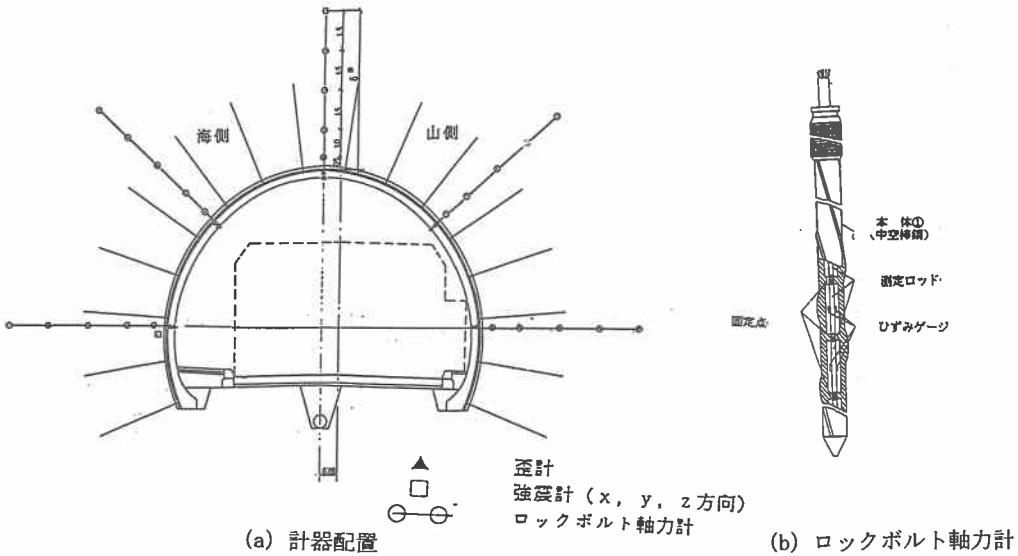


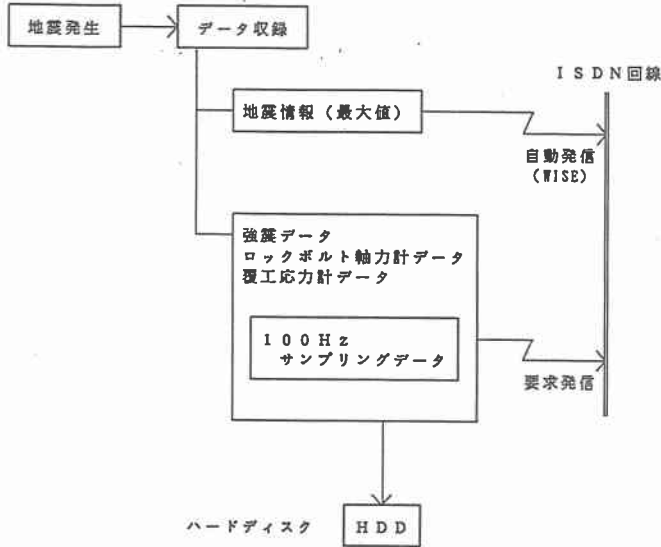
図-5 トンネル内計測断面計器配置

5. 幌満トンネル強震観測システム概要及び計器仕様

(1) 幌満トンネル強震観測システム

本装置は、構造物等に設置された検出器の出力信号より地震発生を感知し、そのときの強震計、ロックボルト軸力計、覆工応力計データの自動計測、収録を行うシステムになっている。さらに電話回線 (ISDN回線) を使用し、遠隔地からデータ収録設定、データ回収が行える。データ収録時間は、290秒 (プリトリガ30秒含む) である。

図-6は地震発生からデータ転送までのデータフローである。



ISDN回線

図-6 強震観測データ転送システム

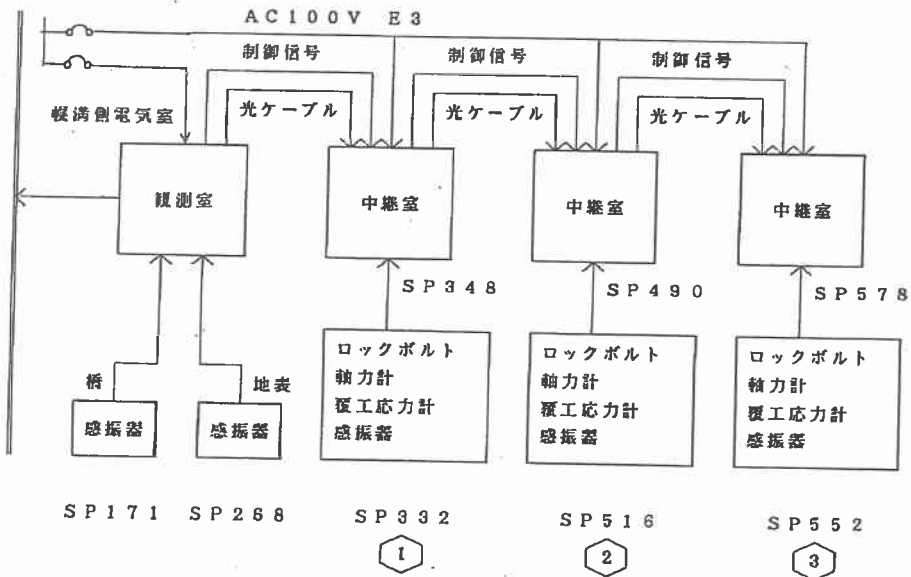


図-7 観測機器ブロック図

図-7に観測計器ブロック図を示す。

地震が発生すると、SP268地点の感振器から観測室にデータが送られ、設定したトリガレベルを越えるとトリガが発生する。このトリガが中継室に伝わると各観測断面において計測されたデータが、中継室に送られ、地震データ収録が始まる。収録されたデータは中継室でAD変換され、光ケーブルで観測室に送られる。この観測室からNTT回線を介することによって、遠隔地からデータを回収することができるのである。感振器は3CH、ロックボルト軸力計は25CH、覆工応力計は10CHである。中継室では静動切替器によって、静ひずみ測定と動ひずみ測定が可能である。

(2) 計器仕様

(a) 感振器

感振器として、サーボ型加速度計を地中埋設用に組み込んだものを用いる。これには落雷による破損防止用アレスターを内蔵している。外形寸法 $\phi 57 \times 548$ mm、測定方法、水平 $\times 2$ 、上下 $\times 1$ 、測定範囲は ± 20000 gal但し、上下成分は ± 10000 gal、感度は $5\text{ V}/1000\text{ gal}$ 、測定周波数範囲は、 $0.05\sim 100\text{ Hz}$ 耐水性は $30\text{ kg}/\text{cm}^2$ である。

(b) ロックボルト軸力計

軸力測定アンカは電気式平均軸力測定アンカ(EMA)を使用している。(図-5(b))

測定範囲 $\pm 20000 \times 10^{-6}$ 測定精度 $\pm 10 \times 10^{-6}$ 程度

本体の弾性係数 $2.1 \times 10^6\text{ kgf}/\text{cm}^2$

引張り強度 応力、 $7000\text{ kgf}/\text{cm}^2$ 以上 軸力、 31.2 tf 以上である。

(c) 覆工応力計

覆工応力は、ウルボンに歪みゲージを取り付けたもので測定する。

6. おわりに

今後の方針としては、上記した目的を達成すべく、地震観測開始後、観測データが取れ次第、解析に取り掛かりたいと思う。

7. 参考文献

(1) 例えば、大西 博ほか:埋設管路の地震観測と応答解析,第6回日本地震工学シンポジウム論文集 pp1921~1928,1982.

池田智学ほか:東京港第2航路海底トンネルの地震観測と応答解析,第6回日本地震工学シンポジウム論文集,pp.1849~1856,1982.など

(2) 北海道開発局建設部道路建設課監修:道路トンネル設計施工要領 NATM 編,(社)北海道開発技術センター ,pp.19~20 1995