



# トンネル雑記帳

# トンネル雑記帳

朝倉 俊弘

## まえがき

過去の偉大な先輩方は、退官・退職にあたって業績集・論文集をまとめておられます。それがあればその先生の学問的業績が一望でき、頂いて非常に便利です。退職にあたって私もと考えましたが、諸先輩の輝かしい業績と比較してあまりにも貧弱であり、気後れがしてとてもその気になれません。思い悩んでいると、論文以外の文集にしたら、とのアドバイスを頂き、我が意を得たり、と従うことにしました。

本雑記帳には、若い頃からいろんなところに掲載していただいた巻頭言や随筆、インタビュー記事とともに、トンネル工学の専門家でない方を対象に書いたトンネルの解説記事的なものも含めています。お手元に何も読むものがなく、時間を持て余しておられるときにでも手に取ってご笑読頂ければ十分に満足です。

今読み直してみて、一貫して文章は下手であり、赤面いたしますが、それなりにトンネルに対する一所懸命さと、トンネルに対する愛情は感じられます。それが私の唯一の取柄なのでしょう。

あっという間の 41 年間で定年退職を迎えましたが、これまでの仕事がどれほど世の中のお役に立てたのか全く自信が持てません。これからも何とかお役に立てるよう頑張りたいと思います。「子々孫々」に良質な社会基盤設備としてのトンネルを引き継いでいくために。

今後とも益々のご支援をお願いいたします。末筆ながら、皆様方の益々のご発展とご健勝を心からお祈り申し上げます。

平成 29 年 4 月 16 日

朝倉俊弘

# 目 次

## まえがき

### 第1部 トンネルとは／技術の変遷と展望

|  |    |
|--|----|
| 1. Changes of Railway Tunnel Technology and its Overview | 2  |
| 2. トンネルの近接工事に要注意   | 7  |
| 3. わかりやすい土木講座／トンネルいろいろ                                   | 13 |
| 4. 鉄道トンネルの技術の変遷と展望                                       | 15 |
| 5. 土木ミニ知識／TBM  | 21 |
| 6. トンネルとは何か？   | 22 |
| 7. コンクリートなんでも 1 番？／海外編 トンネル                              | 26 |
| 8. コンクリートなんでも 1 番？／国内編 トンネル                              | 29 |
| 9. 歴史に残る鉄道トンネル物語／断層とトンネル                                 | 32 |
| 10. 胎動するリニア中央新幹線   | 34 |
| 11. リニア中央新幹線（東京都～大阪府）                                    | 38 |
| 12. トンネルの発達史／地理的困難を克服した日本のトンネル技術                         | 42 |
| 13. トンネル施工の機械化とトンネル十訓                                    | 44 |
| 14. 鉄道トンネル   | 45 |
| 15. リニア成功の条件   | 49 |
| 16. 私はこう見る／各社の「ベスト」必要に                                   | 54 |

### 第2部 トンネルの維持管理／変状・地震被害とその対策

|   |    |
|---|----|
| 17. Effect of the Great Hanshin Earthquake on Tunnels | 58 |
| 18. トンネルのリハビリテーション                                    | 60 |
| 19. トンネル覆工はどのように壊れるのか？                                | 66 |
| 20. トンネル覆工模型実験装置                                      | 70 |
| 21. トンネル変状のメカニズムと対策                                   | 71 |
| 22. わかりやすい土木講座／トンネル検査のポイント                            | 73 |



|     |                         |     |
|-----|-------------------------|-----|
| 23. | 繊維シートでトンネル補強            | 75  |
| 24. | ハイテクインタビュー／トンネル覆工模型実験装置 | 76  |
| 25. | 山岳トンネルの地震被害と耐震設計への提言    | 77  |
| 26. | トンネル覆工剥落事故と今後の保守のあり方    | 80  |
| 27. | 今後のトンネル保守のあり方           | 87  |
| 28. | トンネル覆工剥落事故／その原因推定と教訓    | 90  |
| 29. | トンネル保守技術の変遷と展望          | 100 |
| 30. | トンネルの維持管理技術の変遷と課題       | 103 |
| 31. | 巻頭言／トンネルと地震             | 107 |
| 32. | 山岳トンネルでセミナー／工法工夫で耐震性向上  | 109 |
| 33. | この人に聞く／改良加え工法として確立      | 110 |
| 34. | 超長距離圧送工法アピール／可塑状グラウト協会  | 111 |
| 35. | トンネルの維持保全を考える           | 112 |
| 36. | 技術で発注者支援／可塑状グラウト協会      | 114 |
| 37. | 中山隧道／傷みチェック             | 115 |
| 38. | 中山隧道／守り生かそう             | 116 |
| 39. | 手掘りの魅力どう生かす／中山隧道        | 117 |

### 第3部 随想／講演・談話

|     |                       |     |
|-----|-----------------------|-----|
| 40. | 思い出したくない思い出           | 120 |
| 41. | 十年矢のごとし               | 122 |
| 42. | ああ、悩ましきトンネル変状診断       | 124 |
| 43. | トンネル災害とその対策           | 126 |
| 44. | 建設技術から保守技術へ           | 128 |
| 45. | 長いトンネル、短いトンネル         | 129 |
| 46. | 惜別の情                  | 130 |
| 47. | おもしろ鉄道とトンネルのお話し       | 132 |
| 48. | トンネル覆工コンクリート剥落事故に思う   | 141 |
| 49. | 座談会／鉄道土木構造物の安全は回復したか？ | 142 |
| 50. | 新部長就任のご挨拶             | 151 |
| 51. | 侃々諤々／頭の下がる人達          | 152 |

|     |                  |     |
|-----|------------------|-----|
| 52. | 子々孫々への遺産         | 153 |
| 53. | トンネル技術の今昔／夢のトンネル | 155 |
| 54. | スタッフ紹介           | 158 |
| 55. | 新神戸駅「白煙」の謎       | 159 |
| 56. | 全てのトンネル工事は安全が最優先 | 160 |
| 57. | 京都大学の思い出         | 162 |
| 58. | それぞれの立場で         | 163 |

## 第 1 部

トンネルとは／技術の変遷と展望

## Changes in Railway Tunnel Technology and its Overview

Toshihiro ASAKURA, Dr. Eng.  
Chief Engineer, Tunnel Engineering Group,  
Structural Technology Development Div.,  
Technological Development Dept.

*In this report, the history of railway tunnel technology is traced and its technological developments are followed up to the present. Historical changes in tunneling methods including the mountain tunnel, shield tunnel, cut-and-cover tunnel and immersed tunnel are described, together with their respective features. In addition, the guidelines and manuals established by the Japan Society of Civil Engineers and the defunct Japanese National Railways are chronologically arranged and introduced. Finally an overview from the present trends to future problems is given.*

*Keywords: Tunnel History, Construction Method, Standard*

### 1. Introduction

Among the expert circles, the tunnel is defined as "an underground structure planned with definite dimensions and built at a planned location, with a finished cross-sectional area exceeding 2m<sup>2</sup>, " which was accepted at the OECD Tunnel Congress of 1970 and has since won an official status in the world. The oldest documented tunnel in the world history dates back to about BC 2170. It is a cut-and-cover one built of brick and asphalt at the river bed of the river Euphrates in Babylonia by the order of an Assyrian queen, about 1 km long on the river bed about 180m long<sup>1)</sup>.

The oldest railway tunnel is one constructed for the Liverpool-Manchester line of the British railway excavated in a hill, completed at last in 1829 overcoming repeated rock-falls and mistaken surveys<sup>2)</sup>.

The oldest railway tunnel in Japan dates back to 1871, when the Ishiyagawa Tunnel (length 61m) on the Osaka-Kobe line (the present Tokaido Line) was constructed in the river bed of a suspended river at the foot of Mt. Rokko by the cut-and-cover method. Since then, a large number of railway tunnels come into being in step with the extension of railway lines. As far as JR is concerned, about 3700 tunnels can be counted with the total length of about 2100km.

In this article, the history of railway tunnels is traced with the technological developments overviewed and a future perspective of problems given briefly.

### 2. Changes in railway tunnel technology

#### 2.1 Mountain tunnel

The history of mountain tunnel dates back to Greek days. In those days ( before invention of gunpowder), the hard rock defying the use of a chisel was heated with fire and then quenched with water. Then the chisel was driven into a cracked rock. The lime stone was poured with acetic acid and then cut. In the Roman days the tunnels were constructed for strategic roads and for water supply tunnels. The following 10 centuries were dark days for the tunnel technology with nothing worthwhile left.

In 1679 the construction of the Langedock Channel Tunnel in France marked the first use in the world of black

gunpowder and since then a peak of prosperity came to the channel tunnels. Into the 19th century, long mountain tunnels for railway emerged one after another: Monsny tunnel (completed 1871) ; St. Gotthard tunnel (completed 1880); and Simplon tunnel (completed 1906) across the Alps linking Switzerland, France and Italy. In this period the mountain tunnel technology was basically modernized with use of dynamite and rock drill, improvement of ventilation equipment, countermeasures for earth pressure, dewatering, and building of access adit.

In Japan, the Edo Period saw many water way tunnels excavated, notably represented by Tatsumi Water Way and Hakone Water Way. Ao-no-domon Tunnel (1750) of Yabakei in Kyushu, popularized by a novel written by Kan KIKUCHI, was a hand-bored traffic tunnel for dual use by humans and horses and it remains still sound and useful, albeit improved later.

Enter the Meiji era with introduction of the railway. Then, the railway tunnels thrived with the Oosaka-yama Tunnel (completed 1880) for the first time built by the mountain tunnel method, which should be remembered as the first railway tunnel completed by the Japanese engineers. Thereafter new technologies have been successively introduced in the constructions of Yanagase Tunnel (completed 1884) using dynamite for the first time in Japan; Sasago Tunnel (completed 1902) for the first time built using electric power; Oriwatari Tunnel (completed 1924) using for the first time the shield tunnel method to fight the squeezing earth pressure; and Tanna Tunnel (completed 1934) taking a heavy toll of 67 workers killed for all the measures, applicable in those days, mobilized to guarantee the safety such as drainage drift, cement grouting, side drift, shield method or pneumatic method.

#### 2.2 Shield tunnel

The idea of shield method is said to have been hit upon by an inventor who watched how shipworms bored holes into the timber and covered up the holes with matter they themselves secreted. The inventor was Brunel, a British, who got his invention patented in 1818 and for the first time applied it in the construction of a road tunnel under the Thames River in 1825. It took 18 years for the tunnel to be completed after overcoming tremendous difficulties such as collapse, inundation, shield failures.

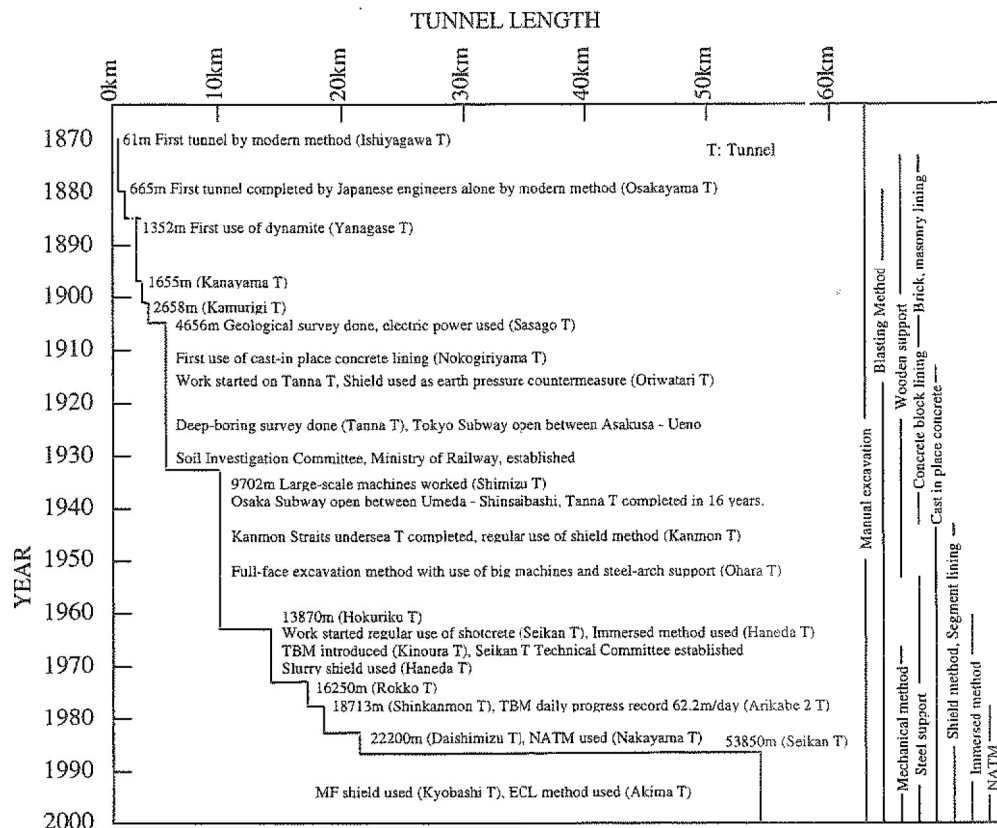


Fig. 1 Chronological history of railway tunnel technology progress in Japan (refer to literature 3), partially revised

The year 1869 witnessed a successful construction, undertaken by Great-head, of an underground railway tunnel across the river Thames, using a cylindrical shield improved to a shape close to that of the present cylindrical shield. Later, this new shield found widespread applications to the London Underground Railway.

Further in 1886, the pneumatic method for the first time succeeded in application to the South London Railway project to suppress water inflow into the tunnel. Such a technology was originally worked out for application to weak ground.

With follow-up improvements added, this technology is now the mainstream in urban tunnel construction. To cite an example, in the U.S., the shield method was first employed in 1886 for the New York Subway tunnel project. In Japan, the anti-squeezing earth pressure measure for mountain tunnel was for the first time taken in 1927 in Oriwatari Tunnel on the JNR Uetsu Line, where it was tentatively adopted in excavating a drainage drift pit for Tanna Tunnel. Regular adoption of this measure was implemented on the down-bound line of Kanmon Tunnel (1939), where it may be said that the shield tunnel method was ultimately established in Japan. Later on, in 1990 the shield method was implemented at Kakuo-zan of Nagoya

Subway and since then it has come to be widely used as a powerful engineering means for urban tunnels such as water supply, sewerage works, power and communications equipment and so on. Various types of shields have been developed such as manual-operation shields combined with the pneumatic method; mechanical shield; slurry-shield, and earth pressure shield.

### 2.3 Cut-and-cover tunnel

The oldest record available about the cut-and-cover method concerns the tunnel excavated on the river bed of the Euphrates as cited in the introduction to this article; it was about 4000 years ago. Since then in urban areas the open channels and culverts dominated and the need for shallow tunnel has virtually been forgotten for a long time and it is considerably later that a large number of cases of tunnels began built by the cut-and-cover method begins to be reported.

Overurbanization created the need for three-dimensional exploitation of land space. Meanwhile the demand for construction of transportation routes as the urban infrastructure caused a sudden increase in European and American cities of urban tunnels built by the cut-and-cover method with advent of the 19th century.



In Berlin, New York, Chicago and most of the other cities the cut-and-cover method flourished as the mainstream technology for subways, with the exceptions of London where the cut-and-cover method was superseded by the so-called "tube" i.e., underground railway of great depth; and Paris where the mountain tunnel method came to stay as the mainstream for geological reasons. The case is the same with Japan where the cut-and-cover technology prevailed widely not only in Tokyo and Osaka where the subway appeared in the period from Taisyo era to early in the Syowa era, but also in all the other cities where the subway boom hit them in 1945 and thereafter.

Beginning about 20 years ago, however, with the subway inclined to go deeper and surface traffic increasingly congested, the trend was moving in the direction of the cut-and-cover method being marginalized to the station building and the shield method gaining an increased favor on the running tunnels between the stations.

## 2.4 Immersed tunnel

The concept of an immersed tunnel originated from the mid-19th century. The immersed tunnel method is an evolution from the piping technology developed at the end of 19th century, in which at first, cast-iron waterworks pipes are laid out at the water bottom and then the pipe joints are rendered water-tight.

The main sewage pipe line completed in 1894 in the Boston harbor in the U.S. is regarded as the oldest application of the immersed tunnel method. A regular case of its application came when the Detroit River-bed Railway Tunnel was completed in 1910, which was constructed by sinking a caisson holding two steel-made cylindrical tubes and placing water-tight concrete outside the tubes.

On the other hand, the Merth Road Tunnel (completed 1937) within the Amsterdam harbor, Netherlands, was a reinforced-concrete tunnel with an oblong cross-section, which might be called the prototype of the present immersed tunnel for road transport. In Japan the forerunner of the immersed tunnel is the Ajigawa Road Tunnel in Osaka (completed 1944) which was followed by the Tokyo Metropolitan Haneda Undersea Tunnel (completed 1963) and the Tokyo Monorail Haneda Undersea Tunnel (completed 1964). The first application of the technology for railway in general came with the Keiyo Line Tama River Tunnel (completed 1969), followed later by five other immersed tunnels.

## 3. Trends in technological developments

### 3.1 Mountain tunnel

After World War II, the wooden-pillar support system made room for the steel arch support system and at the same time the pillar was structurally replaced with the arch. In consequence with the working space enlarged, the mechanization of the support system became possible, which resulted in a raised work speed and in an enhanced work safety. Nevertheless, the basic design principle of bearing the acting overburden pressure with the support system and the lining remains unchanged. In the 1970s the so-called NATM (New Austrian Tunneling Method) came to be introduced from Europe -- a new idea of choosing

shotcrete and rock bolting as the main supporting means-- and it drastically changed the designing concept.

Namely, the traditional concept about a loosening load has changed to an aggressive one for exploiting the rock surrounding tunnel more positively as the supporting means and considering the rock surrounding tunnel itself responsible for maintaining the excavated opening.

Meanwhile, an advance in rock mechanics led to a positive approach of incorporating the tunnel design into the analytical procedure. At the same time, monitoring the rock behavior in terms of observation and measurement and maintaining the tunnel stability as well as optimizing the support system is coming into common practice.

In this manner, as a result of the progress on the mountain tunnel technology, practical cases of applying the mountain tunnel method to the urban areas are evidently on the increase. However, applicability of the mountain tunnel method is conditional on the independence of the heading and for this reason in recent times various auxiliary methods for mountain tunneling are vigorously being devised, notably the development of an advance support method.

Meanwhile, as seen in the three-lane expressway tunnel or in the tunnel for MAGLEV railway, tunnels featuring an enlarged cross-section are being demanded.

As for the road tunnels or water way tunnels, TBM (Tunnel Boring Machine) is strongly demanded in increasing cases for the sake of work speedup or for a pilot tunnel intended to enlarge the tunnel cross section. In the meantime, the JR East is now considering the implementation of a whole-section TBM to work on a single track for switching on Agatsuma Line.

### 3.2 Urban tunnel

In Japan most of urban areas stand on alluvial, weak ground. For construction in urban areas with shallow earth cover the cut-and-cover method is found more reliable and economical and naturally this method was more preferred initially in urban tunnels.

Regrettably, the cut-and-cover method is liable to adversely affect a traffic and the local inhabitants. Thus, for all the attention paid to low noise and low vibration and for all the technological efforts to develop a high-rigidity earth retaining wall, the cut-and-cover method is becoming less and less acceptable in urban areas. Hence the shield tunnel is more and more taking the place of the cut-and-cover method, while more incentive is given to the technological developments. Instead of the open shield combined with compressed air, a new slurry shield or an earth pressure shield is steadily coming into use, while the shield tunnel is gaining its ground as standard urban tunnel.

Happily, the ground surface settlement caused by the tail void -- a drawback to the shield tunnel -- is now being eliminated, while the water-tight technology is advancing. The latest targets pursued are a greater underground depth, an enlarged tunnel section, a longer stride of excavation, a speedup of execution; and in urban areas, the obstacles to be cleared are being removed, while new ideas such as multi-circular face tunnel section are being proposed and realized. In spite of diminished availability, it would be inevitable to continue dependence on the cut-and-cover method in the construction of stations involving large-scale underground

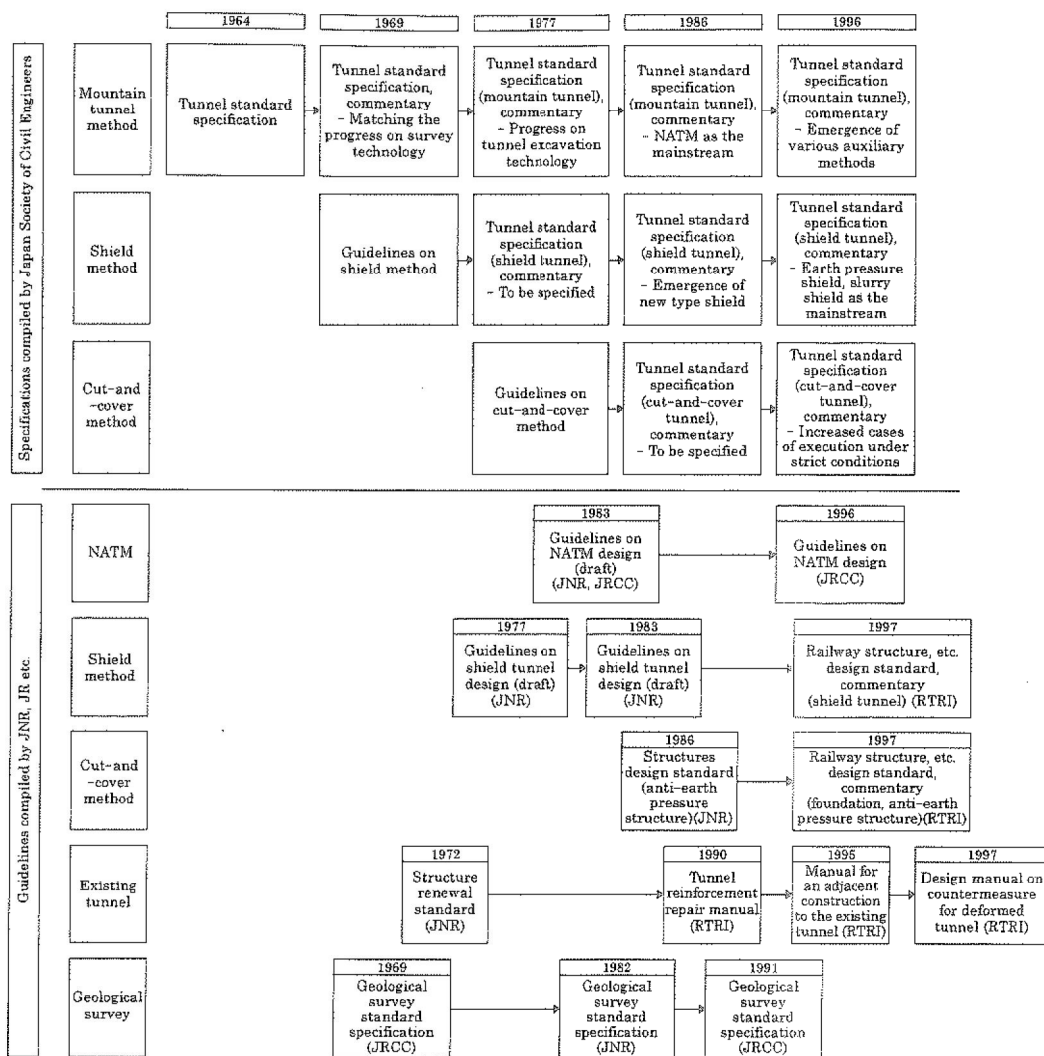


Fig. 2 Changes in tunnel specifications and manuals literature

structures or complicated structures. The cut-and-cover technology will remain indispensable for starting shaft or for arrival.

Recently, with attention paid to the influence on the surroundings, projects are increasing in which high-rigidity, highly water-tight tunnels as the structural walls are built up by diaphragm walls.

It should be added that the development of ground stabilization technology is also being promoted, matching an increased underground depth.

### 3.3 Changes in tunneling guidelines and manuals

In the following Fig. 2 are the changes mainly in specifications, guidelines, etc. issued by the Japan Society of

Civil Engineers, the defunct JNR, the present JR and others. The Japan Society of Civil Engineers holds complete sets of standard specifications for mountain tunnel, shield tunnel and cut-and-cover tunnel, from which everyone can see how they have been revised to catch up with the technological progress. In the railway domain, too, similar efforts are intensified with regard to manuals, etc.

Particularly manuals for maintenance are being made assiduously in addition to the construction technologies. At present the Railway Technical Research Institute is put in charge of manuals and other documents.

Before privatization and division of JNR, the matter was positively taken up as the so-called "technological development tasks".

#### 4. Future perspective

In Japan, characterized by mountainous topography, the sophisticated land use will be promoted, the demand for tunnels will continue to grow, and the tunnel technology will be increasingly upgraded.

Even in the face of difficult topography, geology and environmental conditions, the tough goals of "rapid execution" and "reduced construction cost" will have to be attained by all means. In contradiction to these goals, "improved quality of tunnel (maintenance-free)" will also be required to be satisfied.

Up to this time the tunnel technology has been brought up to a high level but it is still far from being a perfect product. A lot of challenges are waiting in store. Incidentally, it should be remembered that more than 100 years have elapsed since Japan set to building up a modern social infrastructure; hereafter the weight should be shifted from

the quantity to the quality; and it is now the time that we think in earnest of renewing the outmoded structures. Tunnels more than 100 years old are on the increase. How economically to extend their service life will be a tremendous job of great significance to the railway operation in the next century.

#### References

- 1) Archibald Black (translated into Japanese by Fukujiro HIRAYAMA), "The Story of Tunnel", IWANAMI-shoten, 1939
- 2) Takehiko Suga, "Railway Engineers in Heroic Days" (in Japanese), SANKAI-DO, 1987
- 3) Study Group on History of Transport Theory, "Studies on History of Transport Theory (IV)" (in Japanese), Transport Economic Research Center, 1991

# トンネルの近接工事に要注意

朝倉俊弘 小野田滋

都市やその近郊では、土地不足のため、既設のトンネルに近接した大規模な工事が急増しています。これは従来では考えられなかったことです。

そこでトンネルの近接工事対策が重要になってきますが、ここではその基本的事項を分かりやすくご紹介いたします。



## 著者紹介



あさくら としひろ  
主な研究：トンネル力学，トンネル保守  
担当分野：トンネル，主任研究員  
電話：NTT 0425-73-7266  
JR 053-7266



おのだ しげる  
主な研究：土木技術史，トンネル保守  
所属：技術情報室，主席  
電話：NTT 0425-73-7262  
JR 053-7262

バブル崩壊をきっかけに、土地の高騰こそ一段落しましたが、都市および都市近郊の土地不足に変わりはなく、土地の高度利用化はますます進んでいます。

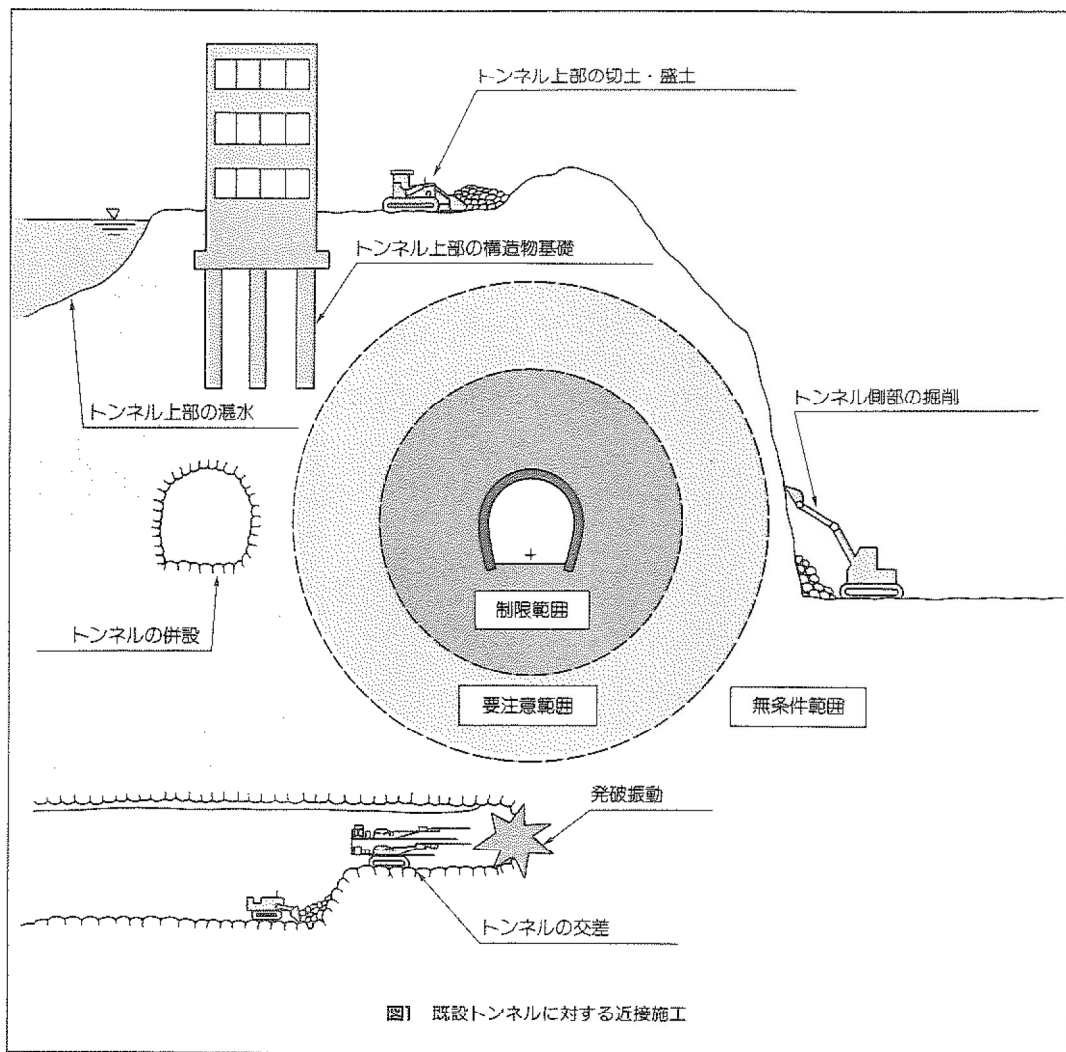
このため、既設の構造物に接近した、いわゆる「近接工事」が急増しています。従来であれば、トンネルがあるからという理由で避けられた土地でも、最近では宅地開発や新しい道路の建設に利用されます。

最近のトンネルに対する近接工事の特徴は、これまで例がないような非常に近接した工事が行われるようになったことと、さらに工事が大規模になりつつあることです。このため、鉄道事業者に対して、他機関から近接工事の計画が持ち込まれた時に、簡単にはその影響が判断できにくくなっています。例えば、同じよ

うな近接工事であっても、担当者によっては、非常に危険に思えて過剰な防護対策を採ったり、逆に、楽観視してほとんど無防備のまま工事が進められたり、といった大きなばらつきが見られるようになってきています。

そこで、鉄道総研では、類似の事例を収集・整理し、模型実験や数値解析を行って、「既設トンネル近接施工対策マニュアル」の暫定試案を作り、JR各社に配布しました。これによって、近接協議がスムーズに進むように役立てば幸いです。

以下にトンネルに対する近接工事の種類と影響について分かりやすく解説いたします。また、影響が心配される場合の対策についても簡単に説明したいと思います。



### いろいろある近接工事

トンネルに対する近接工事といってもいろいろな種類があります。図1をご覧ください。

**トンネルの併設**：既設のトンネルの横に新しくトンネルが建設される場合です。

**トンネルの交差**：既設のトンネルの上部、または下部に新しくトンネルが建設される場合です。

**トンネル上部の開削**：宅地開発などの

ために、トンネルの上部が掘削される場合です。

**トンネル上部の盛土**：宅地開発などのためにトンネルの上部が盛土される場合です。

**トンネル上部の構造物基礎**：トンネルの上に建物が建設され、その基礎杭がトンネルの頭の上に施工される場合です。

**トンネル側部の掘削**：斜面の近くにトンネルがあって、その斜面を道路拡幅な

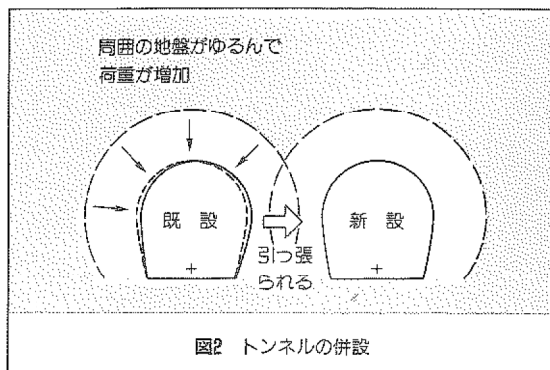
どのために切り取る場合です。

**トンネル上部の湛水**：トンネル上部にダムや貯水池が建設される場合です。

**地盤振動**：トンネルのすぐ近くで発破による工事が行われるような場合です。

この他にも特殊な近接工事がありますが、以上が代表的なものです。このような、いろいろな種類の近接工事によって、それぞれトンネルへの影響の出方は違ってきます。





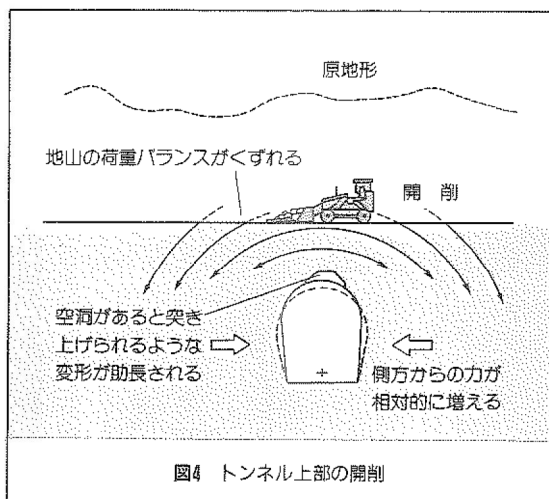
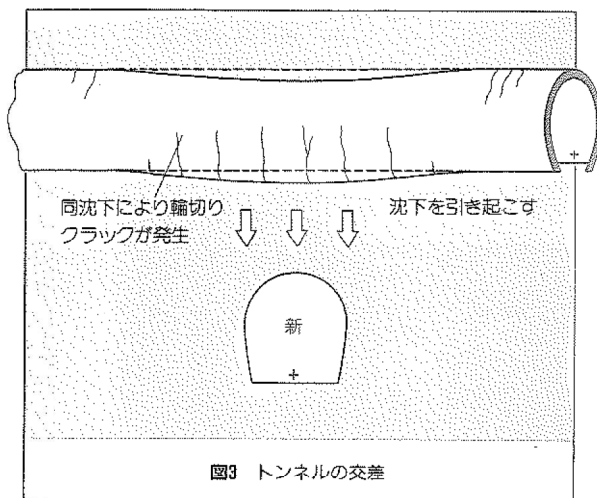
### トンネルへの影響は？

それでは、いろんな近接工事によってトンネルにはどのような影響が生じるのでしょうか？

図2は、トンネルの併設を表していますが、既設のトンネルは、新しく建設されるトンネルの方に引っ張られるように変形します。また、既設トンネルの周りの地盤が緩められて、既設トンネルの覆工（コンクリートやれんがができた壁）に新たな力が作用します。

図3は、トンネルの交差を表しています。新しいトンネルが既設トンネルの下側に施工されると、既設トンネルに沈下が生じ、覆工のひび割れの原因になったりします。新しいトンネルが既設トンネルの上に施工されると、既設のトンネルが上方に引っ張られるように変形したり、あるいは逆に覆工にかかる力が増えたりします。

図4は、トンネル上部の開削の場合です。トンネル上部の地盤を削ることにより、トンネル覆工にかかる力が減るため、トンネルが浮き上がるように変位し、さらに相対的に側方からの力の割合が増えて、あたかも横方向から力を受けたような変形が生じます。削る量が多く、土被りが少なすぎると逆に鉛直方向の力が増えることもあります。



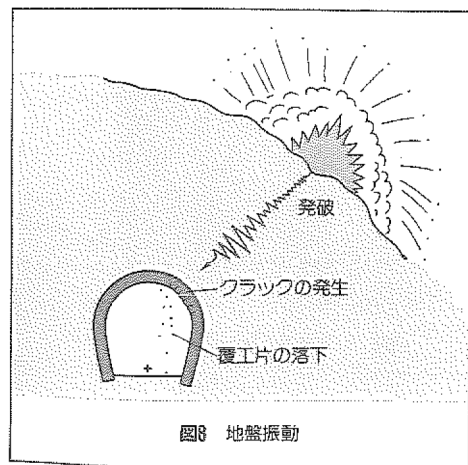
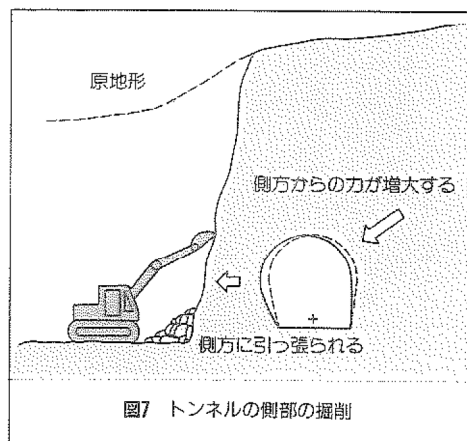
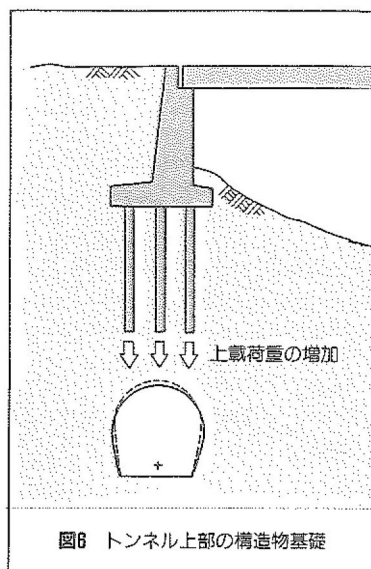
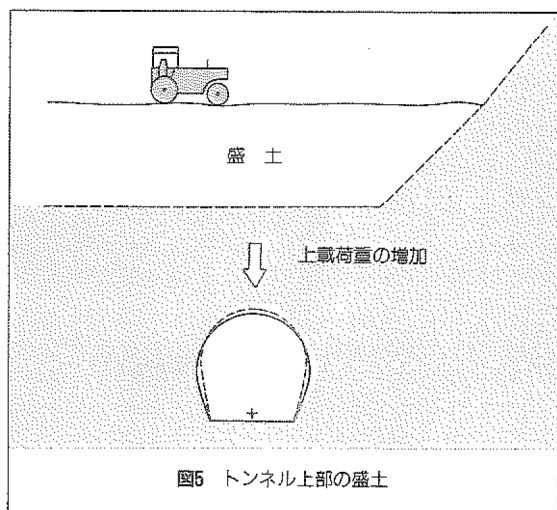


図5は、逆にトンネル上部に盛土が施工される場合ですが、この場合は盛土荷重がトンネル覆工に上からかかる力を増大させます。したがって、トンネルは縦につぶれ、横に広がるように変形します。

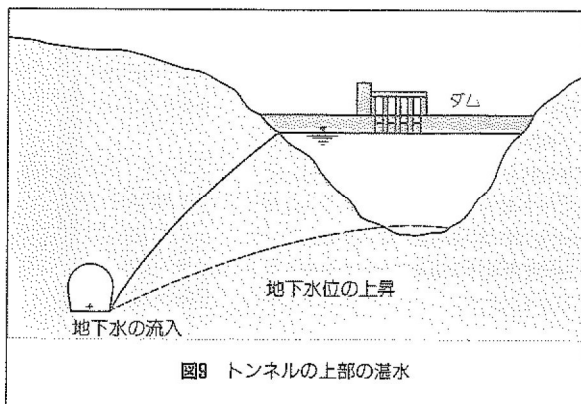
図6は、トンネル上部に構造物基礎が施工される場合ですが、上部盛土の場合と同様に、トンネルを上から押さえる方向の力が増えます。

図7は、トンネル側部の地盤が掘削された場合で、掘削される側に傾くように移動・変形します。いわゆる「偏圧」（トンネル周囲からの一様な力ではなく、片側あるいは一部からの偏った力）が作用するわけです。

図8は、トンネルに近接した発破等による振動の影響を表していますが、振動によりトンネル覆工の一部が剥落したり、ひび割れが拡大したりします。

図9は、トンネルの近くにダムや貯水池ができた場合を表していますが、地下水の状態が変わり、トンネル内への漏水量が増えたり、覆工に水圧が作用したりすることがあります。

このように、トンネルへの近接工事が計画された場合には、トンネルが受けるであろう影響を事前に的確に予測し、それぞれの影響に応じた対策を行う必要があります。



### トンネルは大丈夫？

近接工事が計画された場合には、正確な影響予測が何よりも重要です。

影響予測の手法には、2種類あって、過去の類似の条件下で施工された実績をもとに予測を行う、いわゆる「経験的手法」と、FEM（有限要素法）等の数値解析による「解析的手法」が採られます。

近接度が著しく、対策工が必要な場合には、両方の手法を併用し、特に対策工の効果の評価を比較解析により確認しなければなりません。ただし、数値解析手法は、入力物性値（解析に用いる地盤の変形係数等の値）の選び方によって結果が大きく変化するので、解析結果の評価に当たっては、十分な検討が必要です。

なお、影響予測に基づいて、近接工事の可否、対策工の要否等を判断する際の判定基準は、三つの観点から定めます。すなわち、

① 構造物の安定：トンネルが不安定にならないこと

② 軌道管理：軌道整備基準を超えるような軌道狂いが生じないこと

③ 建築限界：建築限界を侵すような変位が生じないこと

それぞれの立場からの許容値を設定して、これを超えない範囲で計画する必要があります。ただし、最も決定的な項目は、構造物の安定確保となることが一般的です。

### トンネルを守るために

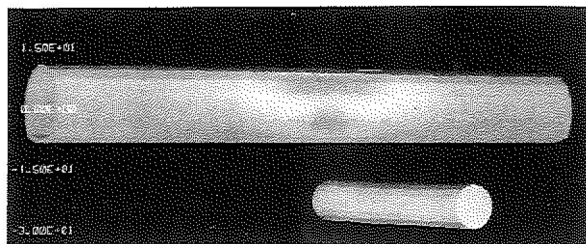
既設のトンネルにある程度の影響が予測されても、適切な防護対策工と安全監視さえ行えば、近接工事を行うことは可能です。近接工事に伴う対策工事は、大きく三つに分けられます。

① 既設トンネルの補強

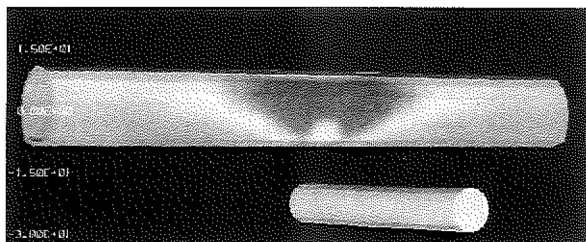
② 近接工事側の対策

③ 中間地盤の対策

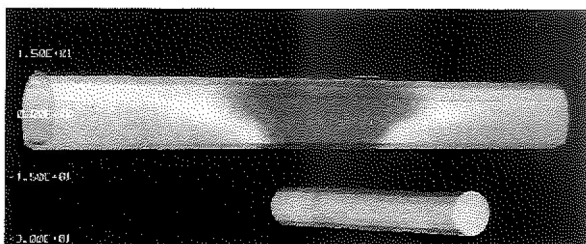
既設トンネルに対して行う対策としては、どんな場合にでも行っておくことが望ましい「基本対策工」（覆工の裏側にある隙間にモルタル等を注入し、トンネル



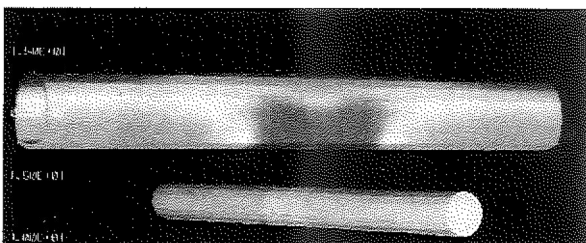
1) 新トンネルの掘削が接近する



2) 新トンネルの掘削が直下に到達する



3) 新トンネルの掘削が直下を交差して通りすぎる



4) 新トンネルの掘削が交差後遠方に進む

既設トンネルの5m下を新トンネルが近接交差した場合の3次元影響解析です。赤・黄は覆工内面に発生した引張応力の強・弱を表わしています。

図10 トンネル交差の3次元解析

表1 近接対策工の種類と選択の目安

| 対策工事<br>近接種類 | 基本工   |           | 補強工      |       |        |           |        | 補修工   |      |       |       |
|--------------|-------|-----------|----------|-------|--------|-----------|--------|-------|------|-------|-------|
|              | 裏込注入工 | 覆工片の落下防止工 | セメントル補強工 | 内巻補強工 | 内張り補強工 | ロックボルト補強工 | ストラット工 | はつり落し | 表面清掃 | 排水溝整備 | 漏水防止工 |
| トンネルの併設      | ○     | ○         | ○        | ○     | ○      | ○         | ×      | ○     | △    | ×     | ×     |
| トンネルの交差      | 上部新設  | ○         | ○        | △     | ○      | ○         | ×      | ○     | △    | ×     | ×     |
|              | 下部新設  | ○         | ○        | ○     | ○      | ○         | ○      | ○     | △    | ×     | ×     |
| トンネル上部の開削    | ○     | ○         | △        | ○     | ○      | △         | ×      | ○     | △    | ×     | ×     |
| トンネル上部の盛土    | ○     | ○         | ○        | ○     | ○      | △         | ×      | ○     | △    | ×     | ×     |
| トンネル上部の構造物基礎 | ○     | ○         | △        | ○     | ○      | △         | ×      | ○     | △    | ×     | ×     |
| トンネル側部の掘削    | ○     | ○         | ○        | ○     | ○      | ○         | ×      | ○     | △    | ×     | ×     |
| トンネル上部の漏水    | ○     | ×         | ×        | ×     | ×      | ×         | ×      | ×     | △    | ○     | ○     |
| 地盤振動         | △     | ○         | ×        | ×     | △      | ×         | ×      | ○     | △    | ×     | ×     |

○：効果が期待できる，△：場合によっては効果が期待できる，×：ほとんど効果が期待できない

を強化する裏込注入と、万一の場合に備えて覆工片が落ちてこないようにする落下防止工の二種類)、トンネル自体を補強して増加荷重や変形に持ちこたえられるようにしておく「補強工」(トンネルの内側にH型鋼等而建て込むセメントル補強工、トンネルの周囲の地盤に向かって鉄筋棒を打設するロックボルト補強工等)、覆工表面のひび割れ等の損傷を修理しておく「補修工」(浮いているれんがをあらかじめ落としておくはつり落とし等)に分けられますが、近接工事の種類ごとにその選択の目安を示したのが表1です。

既設のトンネルに十分な対策を行えない場合や、近接工事側で工法選択の余地がある場合は、可能な限り影響の少ない工法を選ぶよう協議することも必要です。具体的には、盛土や切り取り量の変更、掘削工法の変更、掘削順序の変更、発破の際の火薬量の変更等が考えられます。

もし、既設トンネル側でも、近接工事側でも対処できない場合は、その中間の

地盤に対して、薬液注入工法や凍結工法による改良・強化工事をしたり、地中連続壁等による影響の遮断を図ったりします。

一方、対策工事と同時に、近接工事の影響の有無を観察・計測し、列車の安全運行を確保するための「安全監視」も大切です。その中でも重要な項目が覆工表面の観察調査で、新たなひび割れが生じていないかどうか、ひび割れの先端が伸びていないかどうかを入念にチェックします。その他、トンネルの壁面と壁面の間隔の変化を測定する内空変位測定、トンネル覆工表面の変形を調べるひずみ測定、レールの通りなどに狂いが生じていないかどうかをチェックする軌道狂い測定などが必要に応じて行われます。

こうした観察・計測結果は、その都度整理し、トンネルに異常な変形が見られないかどうか、覆工のひずみ量は管理基準値(安全監視のために、あらかじめ設定する目安値)を超えていないかどうか、

常に目を光らせておく必要があります。そして、万一管理基準値を超えた場合には、対策工事の追加、近接工事方法の見直し、安全管理体制の強化などについて検討しなければなりません。なお、こうした場合に備え、関係箇所との連絡体制を事前に確立しておく必要のあることは、いうまでもありません。

#### おわりに

本稿では、専門外の方に知っていただくために、トンネルの近接施工対策のいろはを紹介いたしました。ここに述べた内容は、「既設トンネル近接施工対策マニュアル」に詳しく述べられています。同マニュアルは現在試用期間中ですが、近日中に必要な修正を加え、印刷・出版する予定です。また、出版に合わせ、講習会の開催も予定しています。興味をお持ちの方、業務に必要な方は、是非ご参加下さい。RRR

## わかりやすい土木講座

## 土木部門

## トンネルいろいろ

朝 倉 俊 弘\*

## はじめに

本稿は、話題となるようないろいろなトンネルを紹介することを目的としており、トンネルの専門知識を得ることを目的としたものではない。軽い読み物として読んでいただければ幸いである。

## 1. トンネルの定義

常識的には、トンネルとは、「2地点間の交通と物資の輸送を目的として、その上部の地山を残して建設される地下の通路」ということになるが、専門家の間では、1970年のOECDトンネル会議での「トンネルとは、計画された位置に所定の断面寸法をもって設けられた地下の構造物で、その施工法は問わないが、仕上がり断面積は2㎡以上のものとする」との定義が一般的に採用されている。

## 2. トンネルの種類・分類

1978年にITA（国際トンネル協会）ではトンネルに関する基本用語<sup>1)</sup>を制定している。これによれば、トンネルは以下のように多様な分類がなされる。

## (1) 寸法による分類

- ①極小断面（3㎡未満）、②小断面（3～10㎡）
- ③中断面（10～50㎡）、④大断面（50～100㎡）
- ⑤極大断面（100㎡以上）
- ①短長（0.5km未満）、②中長（0.5～3km）
- ③長大（3～10km）、④極長大（10km以上）

このように分類されているが、最近では、トンネルの大断面化・長大化が著しく、実態として1ランクほど変わってきており、極大断面は200㎡以上、極長大は50km以上でないと使わないようである。

## (2) 断面形状

- ①円形、②馬蹄形、③長方形、④卵形

静水圧のような均等な荷重に対しては、円形に近いほど力学的には有利である。鉛直荷重のみを考えればよい場合には馬蹄形でも十分であるが、側圧が大きくなるほど、馬蹄形→卵形→円形、と丸くする必要がある。

## (3) 土被り

- ①浅い(20m未満)、②普通(20～100m)
  - ③深い(100～500m)、④非常に深い(500m以上)
- 土被りが浅いと、地盤のアーチ作用が期待しにくくなり、地表沈下を抑制する必要がある。土被りが深くなると、初期地圧が大きいので、地山の強度・変形特性によって、膨圧や山はねの可能性が出てくる。伊・仏間で計画されているALPトンネルは最大土被り2500mで、地熱対策も必要ではないか、と考えられている。

## (4) 用途

- ①鉄道用、②地下鉄用、③道路用、
- ④歩行者用、⑤駅部用、⑥上水道用
- ⑦水力発電用、⑧放水路用、⑨洪水用
- ⑩航路用、⑪下水道用、⑫電力・通信用

文明の発展とともに、トンネルは非常に多様な使われ方がなされてきていることがお分かりいただだけよう。大きく分ければ、1)交通用、2)水路用、3)都市施設用、4)備蓄用、と分類することもできる。上記以外にも多くの利用がなされている。

## (5) その他の分類

上記以外にもトンネルの分類法は、考えられる。例えば、建設工法により分類すれば、以下のようになる。

- ①山岳工法、②シールド工法、③開削工法
- ④沈埋工法、⑤ケーソン工法、⑥その他

どの工法を採用するかは、1)地形、2)地質、3)周辺環境、4)用途、5)規模、等々によって決まる。

紙数の制限もあるので、分類については、この辺にとどめておこう。

\* 勸鉄道経研 構造物技術開発事業部  
主幹技師（トンネル）



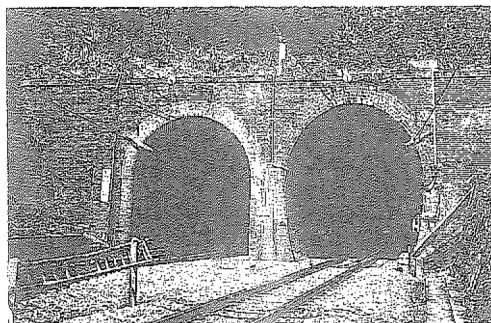


写真-1 わが国鉄道最長老の清水谷戸トンネル上り線（左側のトンネル）

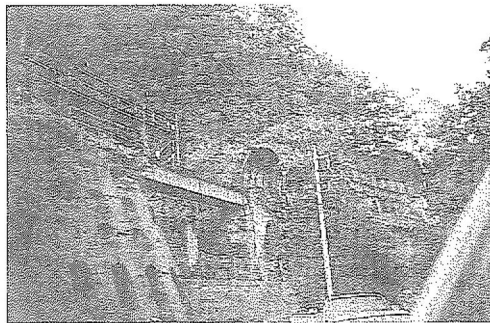


写真-2 わが国最短の樽沢トンネル

### 3. 古いトンネル

厳密には不明であるが、記録に残る最も古いトンネルは、4000年以上も前（BC2200年）、バビロンのユーフラテス川の河底に、アッシリアの女王が造らせたもので、湯水期にれんがとアスファルトを用いて造った開削工法トンネル<sup>2)</sup>である。幅3.7m、高さ4.6m、長さは約1km（河底部は約180m）で、宮殿と神殿の連絡通路として使われたようである。もち論、砂に埋もれてしまい、発見されていない。

日本の一番古いトンネルも不明であるが、菊池寛の「恩讐の彼方に」で有名な九州耶馬溪の「青の洞門」（延長約180m）は、禅海和尚により、1750年に完成している。これは、自動車用に拡幅・直線化されたが、一部は当時のまま現存している。

日本の鉄道で最も古いトンネルは、大阪～神戸間の石屋川トンネル（61m）で、天井川の下に開削工法により1871年（明治4年）に建設された。ただし、これは現存せず、供用中の最長老トンネルは、東海道本線保土ヶ谷～東戸塚間の清水谷戸トンネル（単線並列トンネル）の上り線（写真-1）で、1887年（明治20年）に完成している。今年で109歳になるので、キンさん・ギンさんより長命である。

### 4. 長いトンネル

青函トンネルと答える人が大半であろう。確かに青函トンネル（1983年貫通、延長53.85km）は世界一であるが、あくまで交通用トンネルとしての条件付きである。

ギネスブックによると、ニューヨークのウェスト・デラウェア給水トンネルは、何と延長169km

である。1944年に完成しており、多くの立坑からの掘削によって建設されたものである。現在、アメリカ、イリノイ州では、総延長211kmの下水道用トンネルを建設中とのことである。

立坑間の距離が最長のトンネルは、1994年に開業した英仏海峡トンネル（延長50.5km）で、海底部の延長は37.9kmある。青函トンネルの海底部は23.8kmである。こうしてみると、青函トンネルは世界一ではなくなってしまうが、施工困難な地質条件を考えあわせると、日本人として、青函トンネルが世界一である、と言いたい気もする。

### 5. 短いトンネル

日本で一番短いトンネルは、吾妻線の樽沢トンネル（写真-2）であろう。延長は、わずか7.2mであるが、ちゃんとコンクリート覆工もある。吾妻線の設計最高速度は100km/hであるから、わずか0.26秒で通り抜けることになる。筆者は、長い間これが世界一であろうと信じていたが、スイスの鉄道トンネルマウティア第3トンネルは、さらに40cm短い、たったの6.8mである。上には上（下か？）があるものである。

### おわりに

この他にも、興味深いトンネルは多々あるが、紙数の都合で断念せざるを得ない。希望があれば、続編をご紹介するにヤブサカではない。

### ＜参考文献＞

- 1) 土木学会：『トンネル用語辞典』、1987
- 2) A. Black, (平山復二郎訳)：『トンネルの話』、岩波書店、1939