

**技術展望**  
**TECHNICAL**  
**OVERVIEW**

## 技術展望

# トンネルコンクリートの歴史（山岳トンネル）

HISTORICAL DEVELOPMENT OF CONCRETE OF MOUNTAIN TUNNELS

## 下河内 稔

Minoru SHIMOKAWACHI

日本鉄道建設公団工務部工務第一課

(〒100 千代田区永田町 2-14-2)

**Keywords :** tunnel, lining, concrete, shotcrete

### 1. 山岳トンネル

トンネルを建設するには、普通に山岳部で施工される山岳方式、都市部や軟弱地盤で施工されるシールド方式および平坦地で浅い位置にある場合に施工される開削方式などによる。山岳方式で施工されたトンネルを山岳トンネルと称し、ここでは山岳トンネルの覆工に用いられるコンクリートについてのみ扱うこととした。

山岳方式では、一回の作業長さの分の掘削、ずり出しおよび支保工の一連の作業を繰り返すことにより掘進する。また、掘進より遅れて併行かまたは完了後に、トンネルの完成物である覆工が施工されるのが一般的である。覆工は、図-1に示すようにアーチ、側壁とインバートまたは梁版に分けられた名称を持つ。しかし、トンネルの用途、需要度および地盤条件によっては、構造的に一体とされることもあるし、全てを必要としないこともある。また、一体に施工されることもあるし、分けられて施工されることもある。

トンネルの建設の方法は、地盤条件ばかりでなく使われる機械や設備および用いられる材料によっても異なってくる。1955年頃までのトンネルの建設では、例えば図-2に示すように、トンネルの断面内の小部分を掘削しながら木製の支柱式の支保工を建て込み、全断面に切り抜げる方法が執られていた<sup>2)</sup>。このような状態で、覆工を施工するには、覆工の施工状況に応じて木外しと称される木製の支柱を取り外す作業を伴うことになり、相当の経験者による慎重な施工が要求された。1955年頃以降は、図-1に示すように、上半部や全断面に掘削されて鋼製のアーチ式の支保が完了した状態で、支保工を含んで覆工が施工されるようになった。さらに、1975年頃からロックボルトと吹付けコンクリートとを用いる支保工によるNATM (New Austrian Tunneling

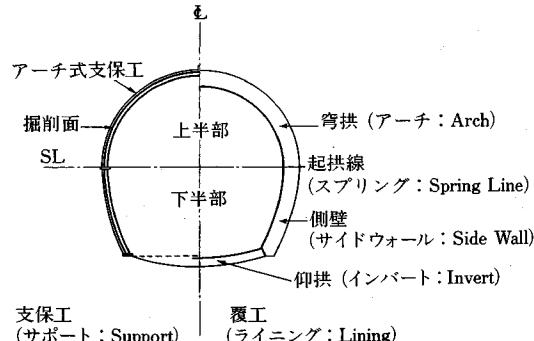


図-1 山岳トンネルの支保工と覆工の一般的模式

Method) が導入され普及し、トンネルの内空が全部確保された状態で覆工が施工されるようになっている。

### 2. 覆工の材料

条件が良ければあるいは材料がなければ永久的でない材料で覆工することもあるが、そのことを除いて今までに用いられた材料はレンガ、石材、モルタル、コンクリートおよび鉄材である。鉄材は鉄筋、鉄骨、鉄板や繊維などで補強材として用いられることが殆どであり、鉄材を除いた他の材料は主材料として用いられてきた。

イギリス人技師による大阪—神戸間の鉄道の建設に初めてトンネルの覆工にレンガが用いられてから、コンクリートの覆工が主体となるまで、トンネルの覆工材料は殆どレンガであった。この間に用いられたレンガは産地によって大きさも強度も異なっていたようであるが、後の規格品は  $21\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  の大きさで 100(並焼)/150(上焼) $\text{kgf}/\text{cm}^2$  の抗圧強度とされていることからすれば、後の規格品と同じ程度のものが用いられていたのであろう。レンガよりやや遅れて粗角石が側壁や底部に用

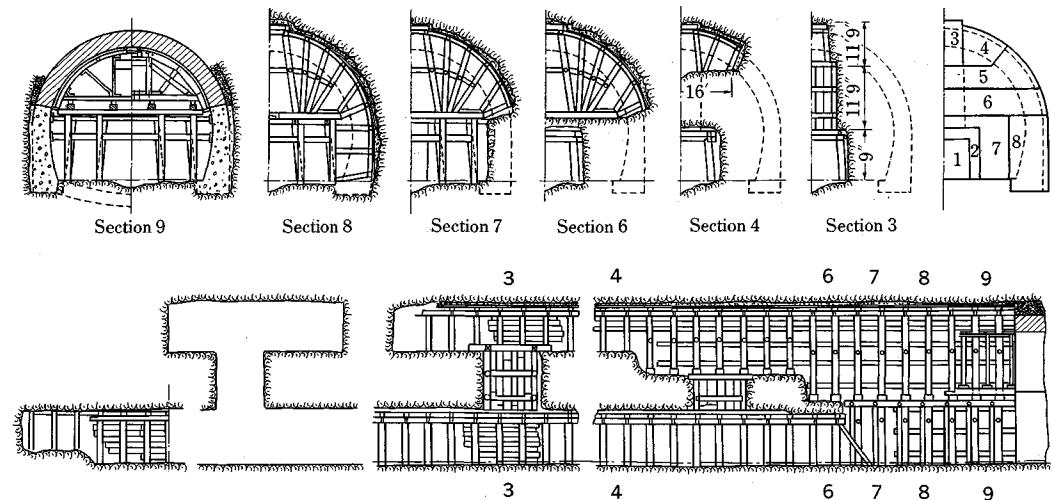


図-2 新模式による掘進の例（丹那トンネル：平山復二郎、山岳トンネル全より）

いられるようになったが、石材は建設地で安価に入手される場合には相当後まで用いられた。レンガや粗角石の接合には約1cmの厚さの目地に容積配合で(C:S=1:3)のモルタルが汎用された<sup>1)</sup>。その強度は、ポルトランドセメント試験方式で定められていた圧縮強度の110(1905年制定)/140(1919年二次改訂)kgf/cm<sup>2</sup>程度であったであろう。また、側壁の裏込めや覆工の基礎均しに場所打ちコンクリートが用いられたが、それらのことは詳細ではない。

初めて場所打ちコンクリートを覆工に用いた箇所はインパートであり<sup>1)</sup>、次いで側壁であり、最後にアーチであった<sup>11)</sup>。この順序は場所打ちコンクリートの施工の容易さによったのである。それもまだ、当時の技術では信頼性に欠けるとして、間もなくコンクリート塊をレンガの覆工のように用いる方法に取って代わられることになった。このブロックの形や大きさは種々あったが、鉄道では製造・運搬・積築に便利として、30cm×23cm×6cm(12inch×9inch×6inch)を標準とした<sup>3)</sup>。多くの場合、側壁や底部に場所打ちが、アーチに塊が用いられた。塊は1960年頃まで用いられたが1925年頃からコンクリート技術の進歩に伴って、再び場所打ちコンクリートが覆工の全部に用いられることが盛んとなり、現在では場所打ちコンクリートとなっている。

普通のコンクリートとは別に1925年頃から、図-3に示すようなセメント・ガンによる吹付けモルタル(容積配合C:S=1:3)を覆工に用いる方法が幾つかのトンネルで実施されたことは興味深いことである<sup>3)-5)</sup>。再び吹付け工法が使われたのは1964年からで、コンクリートを支保部材(一次覆工)に用い、現在まで発展している<sup>10)</sup>。

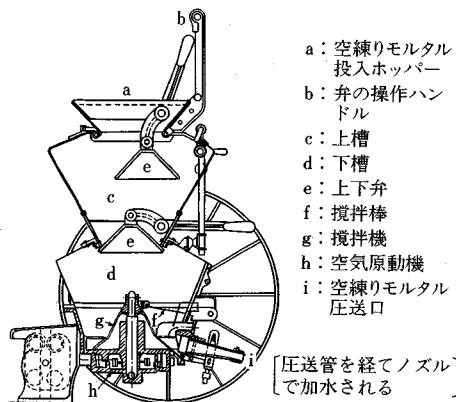


図-3 セメント・ガン (Cement Gun) の例 (門奈 正、豊坑開鑿及坑道開鑿法より)

### 3. 覆工コンクリートの配合と混練

1910年代にはコンクリートの配合は容積比でC:S:G=1:2:4, 1:3:6, 1:4:8が標準とされ、覆工では場所打ちも塊の製造も同じC:S:G=1:3:6のものが汎用され、特に強度や水密性を要する場合においてC:S:G=1:2:4などの富配合が用いられた<sup>12)</sup>。単位水量あるいは水セメント比については定められていて、単に硬練りと軟練りという混練の程度を使用に合わせていた。この配合の方法と標準は、1925年頃から軟練りコンクリートの水セメント比研究が進んできたけれど、1955年頃まで広く使われた。この方法による容積配合C:S:G=1:3:6の圧縮強度は、塊の製造方法の可否の試験の当時の記録や場所打ちされた覆工を後に改築した時の試験から見ると、ほぼ110から180kgf/cm<sup>2</sup>程度と推定される。

傾斜バケットコンベヤー	
揚量	20m <sup>3</sup> /h
傾斜角	70°
バケット容量	0.004m <sup>3</sup>
バケット数	87個
バケット取付	チエン装置
コンベヤー速度	32m/min
フレーム	木台
電動機	2×7.5HP
重量	3t
製作所	東京 山越工場

ウォーセクリーター	
セメントベースト	チャージターピン
混合槽型式	
セメントベースト	2.3m <sup>3</sup>
混合槽容量	
骨材	セメントベースト
貯蔵槽容量	2.05m <sup>3</sup>
砂利	3.7m <sup>3</sup>
砂	3.6m <sup>3</sup>
重量	6t
製作所	日本建機

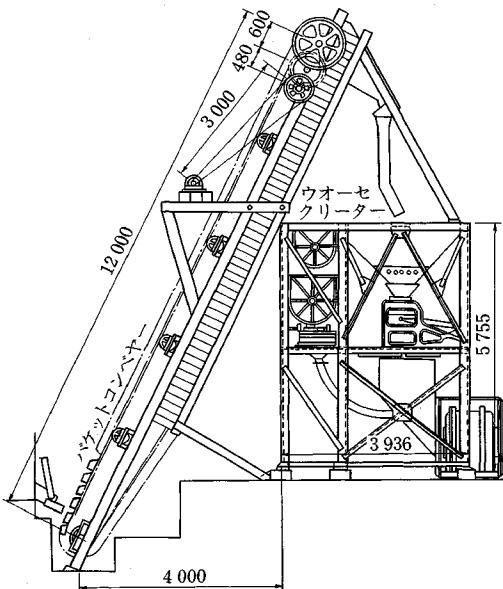


図-4 重量計量と投入機械を備えたバッチャープラントの例  
(セメントベースト先練式: 関門隧道より)

コンクリートの混練は、当初は手練りで、セメントと砂とを空練りし砂利を加え再び空練りしてから、水を加えながら更に練ることを示方したものもある<sup>12)</sup>。1915年頃からミキサーによる混練が行われるようになったが、材料の計算と投入は人力によっていた<sup>11)</sup>。1925年頃に重量計量と投入機械を備えたバッチャープラントが軟練りコンクリートの研究成果を取り入れて大きな鉄筋コンクリート構造に使われだしたが、図-4に示すようなバッチャープラントが重量配合とともにトンネルで使用されたのはかなり後のことである<sup>6), 8), 15)</sup>。

覆工コンクリートの水セメント比やワーカビリティーの管理に本格的に取り組み出したのは1950年頃からであったよう、その後に混和剤がもちいられた<sup>16)</sup>。その後の覆工コンクリートの機械化施工と相まって試験や試用を経て、1960年頃には殆ど土木学会制定のコンクリート標準示方書やそれをもとにした示方により管理するようになった。これによりコンクリートの強度が $\sigma_{c28}$ で大体140(1955年頃)、160(1965年頃)、180(1975年頃)kgf/cm<sup>2</sup>で示され今日に至っている<sup>9), 10), 17)</sup>。

吹付けコンクリートの導入の当初は乾式であった<sup>10)</sup>。乾式の場合でも標準示方書をもとにした材料管理を行うが、連続圧送される空練りのコンクリートにノズルで加水するため単位水量か水セメント比が一定に保てない。湿式は1975年頃から使われだしたが、これも連続圧送される生コンクリートにノズルで急結剤を混入するため単位急結剂量率の管理が難しい。このようなことから、吹付けられたコンクリートの性質の変動が大きく、実施

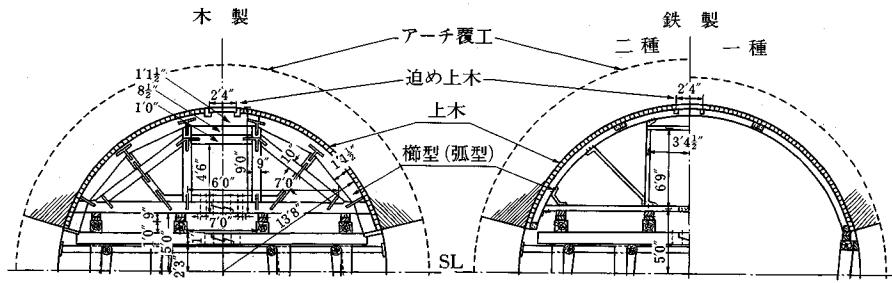
では $\sigma_{c28}$ で150から250kgf/cm<sup>2</sup>程度である<sup>10)</sup>。一時、実施された吹付けモルタルでは急結剤もなく、一回に約1cmの厚さのものを数回に重ねて約3から5cm程度の覆工に仕上げたとあるが、相当の熟練を要したであろう<sup>3)</sup>。

#### 4. 覆工コンクリートの打設

レンガ、粗角石やコンクリート塊のブロック状材料は、目地モルタルで合わせながら積み上げて覆工とした。側壁では、造方と水系で位置出しをして積み上げるだけであったが、後には場所打ちコンクリート用の型枠が使われた<sup>1)-3)</sup>。アーチでは、図-5に示すような組立式の拱架(アーチセントル: Arch Centre)に上木と称する角材をわたしその上に積み上げた。

場所打ちコンクリートを用いるようになると、側壁では図-6に示すような組立式の側壁型枠を、アーチでは拱架と上木を使い始めた。当初、これらは木製であったが、長大トンネルでは鉄製の拱架や鉄製の幕板(メタルフォーム: Metal Form)を使うようになった<sup>5), 7)</sup>。組立式型枠(バラセントルと通称される)に代わって、レール上を走行できる架台(トラベラー: Traveller)に鉄製のスキンプレート(Skin Plate)を取り付けた型枠(ブロウフォーム: Blow Form, スライディングフォームまたはスチールフォームと通称される)が、1925年頃に試用されたが<sup>5), 13)</sup>、その試用は支柱式支保工からアーチ式支保工に変わった1955年頃まで本格化しなかった。

場所打ちコンクリートを用い始めた頃は、坑外で混練



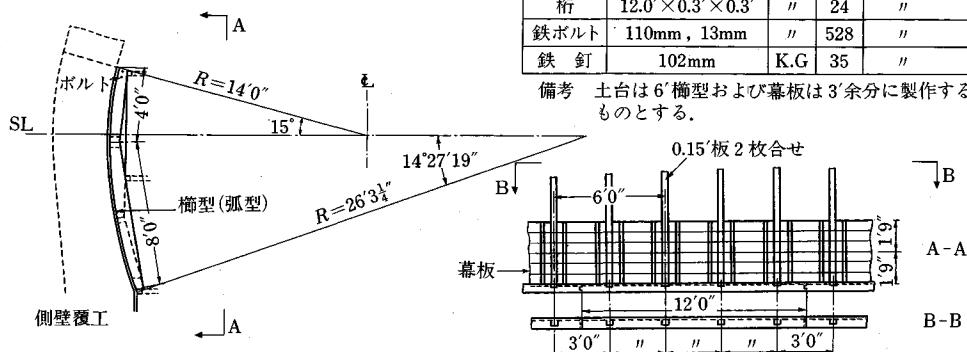
〔図はトンネルの上半部のみを示している〕

図-5 組立式拱架（アーチセントル）の例（丹那トンネル：丹那隧道工事誌より）

材料表（延長 1 鎮両側分）

名 称	形 状 尺 法	称 呼	数 量	記 事
土 台	12.0' × 0.6' × 0.4'	本	12	材質 松
櫛 型	8.0' × 0.85' × 0.15'	枚	96	"
櫛 型	4.0' × 0.7' × 0.15'	"	96	"
幕 板	6.0' × 0.6' × 0.15'	"	483	"
棧	1.7' × 0.2' × 0.2'	本	644	"
桁	12.0' × 0.3' × 0.3'	"	24	"
鉄ボルト	110mm, 13mm	"	528	"
鉄 釘	102mm	K.G	35	"

備考 土台は 6' 櫛型および幕板は 3' 余分に製作するものとする。



〔図はトンネルの下半部の片側のみを示している〕

図-6 組立式側壁型枠の例（丹那トンネル：丹那隧道工事誌より）

されたものを箱型車などで打設場所まで運搬するか、打設場所近くで混練するかして人力によりショベルを使って型枠内に搬ね込んでいた<sup>12)</sup>。1925年頃から、鋼形車で運搬、上半部に設置した吊桟橋に引き上げて型枠内に投入する方法が普及し、1955年頃まで主な方法であった。

機械による打設は、1920年頃のプレイサー (Pneumatic Concrete Placer) がプロウフォームとともに試用されたことに始まるが、型枠のこともあるってあまり使われなかった<sup>13)</sup>。しかし、1955年頃からの鉄製型枠とアジテーターカーによる生コンクリートの運搬方法とともに次第に、また1965年頃からのプレイサー機能付アジテーターカーになって急激に普及した。ポンプによる打設方法は、国産品の試用と改良を経て1955年頃から普及し、東海道新幹線のトンネルでは全面的に採用され現在に至っている<sup>9)</sup>。

覆工コンクリートの締固めにバイブレーターが使われ始めたのは、1935年頃の信濃川発電工事との説もあるが定かではない。ただ、1940年頃の関門トンネル工事で使った記録から、1935年頃から使われたと推定される<sup>8)</sup>。

## 5. おわりに

技術の発達についてはどの分野も同じであると思うが、記録のないものや記録があっても不明確なことはもとより目に触れないこともあります。ある事柄が何時、何処で最初に使用されたかを明確にすることは困難である。識者も文献も著者の知る範囲によって纏めたのが表-1の年表で、不正確で鉄道に偏り過ぎているかも知れない。今後、トンネルとコンクリートに詳しい方、また道路や水路等の目的別あるいは農業や電力等の業務別の分

表-1 トンネルコンクリートの歴史（山岳トンネル）

西暦	覆工の材料と施工法	関連土木事業
1870	覆工にレンガを用いる。	(鉄道) 大阪一神戸間石屋川 T (L 61 m, 1871年竣工), 開削工法による。
1878	覆工レンガの目地にモルタルを用いる。	(鉄道) 京都一大津間逢坂山 T (L 665 m, 1880竣工), 山岳工法による。 (水路) 安積疏水(1879年—1882年建設)の沼上嶺 T (L 590 m).
		(道路) 八代一水俣間(1903年開通)の佐敷 T (L 590 m) と津名木 T (L 212 m).
1885	インパートに場所打ちコンクリートを用いる	(水路) 琵琶湖疏水の長等山 T (L 2436 m, 1890年竣工).
		(鉄道) 大津一京都間改良工事(1914年—1919年建設)の新逢坂山 T (L 2 325 m) や宮崎線(1914年—1916年建設)の第4猪之谷 T (L 589 m).
1891	側壁の裏込めに場所打ちコンクリートを用いる。	(鉄道) 信越線碓冰第26号 T (L 433 m, 1892年竣工).
1911	側壁に場所打ちコンクリートを用いる。	(鉄道) 陸羽東線(1911年—1917年建設), 例えば鳴子 T (L 1 062 m).
1915	コンクリートミキサーを使う。	(鉄道) 房総西線(1915年—1918年建設)でスミス式ミキサーを使用.
1915	アーチに場所打ちコンクリートを用いる。	(鉄道) 房総西線の鋸山 T (L 1 252 m, 1915年—1917年建設)など.
		(道路) 国道1号線の宇津ノ谷 T (L 230 m, 1929年—1930年建設).
1917	覆工にコンクリートブロックを用いる。	(鉄道) 日豊北線(1917年—1923年建設)の大原 T (L 521 m) や羽越北線(1917年—1924年建設)の例えば折渡 T (L 1 438 m).
		(道路) 国道1号線の鈴鹿 T (L 245 m, 1922年—1924年建設).
1921	コンクリートプレイヤーを使う。	(鉄道) 上越南線(1921年—1924年建設)の棚下 T (L 690 m) で試用, 热海線の丹那 T (L 7 804 m, 1918年—1934年建設)の周壁導坑で実施.
1921	プロウフォーム(スチールフォーム)を使う。	(鉄道) 上越南線の棚下 T で試用.
		(道路) 関門 T (再開1952年—1958年建設)の下関陸地部でプレイヤーとアーチスチールフォームを使用.
1923	覆工に吹付けモルタル(セメントガン使用)を用いる。	(鉄道) 房総線の鷹ノ巣 T (L 441 m, 1923年—1924年建設)で試用し串浜 T (L 42 m) などや因美線の物見 T (L 3 075 m, 1928年—1931年建設)で実施
1924	鉄製のアーチセントルを使う。	(鉄道) 热海線の丹那 T では組立式を, 上越線の清水 T (L 9 702 m, 1922年—1931年建設)では移動式を使用.
1926	吊り桟橋によるコンクリート打設方式	(鉄道) 上越線の第1湯檜曽 T (L 1 753 m, 1926年—1929年建設)で鉄製の鍋形トロリーによる運搬方式.
1926	イナンデーター(砂の含水管理式材料配合装置)を使う。	(鉄道) 土讃南線(1926年—1929年建設)のトンネル.
1929	鉄製の型枠(メタルフォーム)を使う。	(鉄道) 石北線の石北 T (L 4 329 m, 1929年—1931年建設).
1931	覆工に鉄筋コンクリートを用いる。	(水路) 信濃川発電所浅河原一千手間圧力 T (L 3 167 m, 1931—1939年建設).
		(鉄道) 伊東線の宇佐美 T (L 2 919 m, 1933年—1938年建設).
1941	ウォーセクリーター(セメントペースト先練式材料配合装置)を使う。	(鉄道) 関門 T (1938年—1944年建設)の門司方(山岳方式外では1939年から).
1953	コンクリートポンプを使う。	(鉄道) 北陸線の俱利伽羅 T (L 4 329 m, 再開1953年—1955年建設)で国産のコンクリートポンプの試用.
		(道路) 関門 T の門司海底部の2次覆工(開始1954年)で使用.
1953	アジテータカーを使う。	(鉄道) 佐久間一大嵐間線路付替工事の大原 T (L 5 063 m, 1953年—1955年建設)でテレスコピック型スチールフォームとともに使用.
1964	支保工(一次覆工)に吹付けコンクリートを用いる。	(道路) 電源開発の七色発電所の搬入路 T (L 200 m).
		(鉄道) 青函 T (1964年—1971年調査)の吉岡斜坑で試用(1964年)し実施(開始1965年).
1964		(土木学会) トンネル標準示方書の制定, 1969年, 1977年(山岳編), 1986年(山岳編)改訂.
1966	プレイヤー機能付アジテータカーを使う。	(鉄道) 信越線の笠島 T.
1973	ドライバッヂシステムを使う。	(鉄道) 上越新幹線の大清水 T (L 22 221 m, 1971年—1980年建設)の万太郎谷工区(L 4 800 m).
1974	覆工に鋼纖維補強コンクリートを用いる。	(道路) 恵那山 T (1969年—1975年本工事)の覆工補修.
1979	坑内パッチャープラントシステムを使う。	(鉄道) 青函 T (1971年—1987年本工事)の海底部.
1987	ECL(掘削直打覆工併進)工法。	(水路) 信濃川発電所千手一小千谷間第2水路の山本 T (L 5 495 m, 1987年—1989年建設)
		(鉄道) 北陸新幹線の秋間 T (L 8 300 m, 着手1990年).

野からの意見を戴ければ幸いである。これを書くに際し、名工建設の藤井 浩、鉄道総合技術研究所の河田博之と小野田 滋、日本建機の成田英一の各氏から貴重な資料と識見を戴いたことを記し謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 田辺朔郎：とんねる，丸善，1922年2月。
- 2) 平山復二郎：山岳トンネル 全，日本工人俱楽部，1929年6月。
- 3) 小林紫朗：隧道工学，工業雑誌社，1934年2月。
- 4) 門奈 正：豎坑開鑿及び坑道開鑿法，修教出版，1945年11月。
- 5) 鉄道省大臣官房研究所：第一回 隧道会議記事，1925年11月。
- 6) 鉄道省東京第二改良事務所，四谷御所隧道工事概要，1927年6月。
- 7) 鉄道省熱海建設事務所：丹那隧道工事誌，1936年3月。
- 8) 運輸省下関地方施設部，閂門隧道，1949年3月。
- 9) 国鉄岐阜工事局：俱利伽羅隧道工事誌，1957年3月。
- 10) 鉄道公団青函建設局：津軽海峡線工事誌(青函トンネル)，1990年3月。
- 11) 鉄道院東京建設事務所：房総線・北条線建設概要，1919年10月。
- 12) 鉄道省神戸改良事務所：大津・京都間線路変更工事誌，1923年1月。
- 13) 鉄道省：上越線建設概要，1931年8月。
- 14) 鉄道省東京建設事務所他：上越線水上・石打間工事誌，1933年9月。
- 15) 鉄道省岡山工事事務所：土讃線建設概要，1936年8月。
- 16) 国鉄信濃川工事事務所：信濃川水力発電工事誌，1953年3月。
- 17) 国鉄東京新幹線工事局他：東海道新幹線工事誌，1965年3月。

(1992.12.9 受付)