煉瓦造アーチの製作実験

フリーハンド応用工法によるトンネル・ヴォールトの施工法に関する研究

EXPERIMENT OF CONSTRUCTION OF BRICK ARCH

Study of applied method of freehand

五島 利兵衛*, 堀田 雄一郎**, 青木 伸浩***

Rihee GOSHIMA, Yuichirou HOTTA and Nobuhiro AOKI

In constructing a dome and vault in the Orient and Byzantine districts, they used the method of freehand, that is, the construction method without a centering. This paper discusses the construction method for the tunnel vault in the Roman and Romanesque architecture based on the experiments of constructing arch with the simple and temporary framework which can be removed just after all bricks are laid out. This is called the applied method of freehand. And the result of our experiments shows that the Roman type tunnel vault can be constructed by the applied method of freehand.

Keywords: Arch, Tunnel vault, Construction Method, Applied Method of Freehand, Pantheon diagram, Romanesque architecture

アーチ、トンネル・ヴォールト、施工法、フリーハンド応用工法、
パンテオン図法、ロマネスク建築

序

煉瓦または石積み天井の施工法の検討には、迫石(煉瓦または石材)の形状、迫石を連ねて造る石層の曲率、石層の構成法(組み合わせ法)及び、迫石と迫石との関係、迫石と石層との関係、石層相互の関係などの考察が必要である。また目地モルタルの付着力や初期圧縮塑性強度後(述)の問題が関連する。迫石、石層、構成法の3つの要素の組み合わせによって、石造天井の施工法の分類ができるが、それについては既に論じた。^{注1} この考察の中から、型枠を用いずに石積みするフリーハンド工法の技術的系譜が存在することが明らかになった。すなわち、ゴシック建築の石造天井であるリブ・ヴォールトは、オリエン、ビザンチンと続くフリーハンド工法の延長上に存在することを理論的に証明した。このことは実験的にも明らかにした(注4文献参照)。本研究は、このようなフリーハンド工法の技術的系譜の視点で行っている研究の一環である。煉瓦、石積みの石造天井の代表的形態にドームとヴォールトがある。その中に、ドーム状ヴォールトと言う中間的形態の石造天井がある。中央がドームのようにふくらんだヴォールトである。ドーム状ヴォールトという場合、平面が正方形か正方形に近い矩形である。そして、その形状は完全なドームの形状から、中央部がある程度ふくらんでいるものまで、種々存在する。また、石層もドームのようにリング状のものから直線状のものまで存在する。ところで、このドーム状ヴォールトがどこで発生したかと言うと、ドームとバシリカの結合を技術的課題としたビザンチン建築のペンデンティヴ型の石造天井と考えるのが妥当であろう。ビザンチン建築ではドーム状ヴォールトが数多く造られ、ハギヤ・ソフィア(532—537)の側廊やハギヤ・ソフ

ィアに隣接するハギヤ・エイレーネ(6世紀)^{注2}など多くの実例がある。それで本研究は、ビザンチンのドーム状ヴォールトのフリーハンド工法に見られる施工法の原理を考察し、西欧石造天井の施工法を明らかにしようとする研究が出发点となっている。ビザンチンのドーム状ヴォールトは、第1の特徴としてベイ工法(四周アーチの囲い<ベイ>の中にヴォールトを施工する工法)と結びついたフリーハンド工法であるという点である。この特徴については後述する。第2の特徴として、ドーム状ヴォールトという性格から、石層の状態がドーム的志向(リング状の石層)とヴォールト的志向(古代ローマ型の直線状の石層)の矛盾が存在し、これがフリーハンド工法の特徴と結びついて、多様な石層類型の石造天井を形成している。この中に、ゴシック・リブ・ヴォールトやロマネスク・トンネル・ヴォールトを生み出す技術史的発展の可能性が存在したと筆者たちは推定する。この点についても後述する。

既に、ゴシック・リブ・ヴォールトの施工法について実験的に検討し、フリーハンド工法の応用工法(フリーハンド応用工法と称する)として考えられることを示した。^{注3} この中で、モルタル付着力とモルタル初期圧縮塑性強度の利用法という点が、フリーハンド工法と深く関わっていることが解明された。そこで、本研究は、フリーハンド工法の中の、モルタル初期圧縮塑性強度をりようした、ロマネスク・トンネル・ヴォールト(本研究では、スパンに対して、奥行きが浅いのでアーチと呼ぶ)に応用して、製作実験作業を行ったものである。

本研究の構成は次の通りである。^{注4}

* 大同工業大学工学部建設工学科 教授・工博
** 大同工業大学工学部建設工学科 修士課程・修了生
*** 大同工業大学工学部建設工学科 博士課程

Prof., Dr. of Daido Institute of Technology
Graduate Student (Completion) of D.I.T
Graduate Student (Doctor Course) of D.I.T

- 1、フリーハンド工法の特徴とその応用の問題
- 2、フリーハンド応用工法によるアーチ製作実験(1)
- 3、フリーハンド応用工法によるアーチ製作実験(2)
- 4、アーチ製作実験結果の考察

第1章 フリーハンド工法の特徴とその応用の問題

フリーハンド工法で造られたビザンチンのドーム状ヴォールトの特徴について、既知のことをまとめてみると、次の通りである。

第1に、迫石となる矩形の薄い煉瓦を立てて作られている。煉瓦の小口が下端に来るのである。これは、オリエントのトンネル・ヴォールト架構におけるフリーハンド工法と同じである。^{注3}

第2に、迫石である煉瓦が連なってできる石層は、アーチをなしている。つまり、石層アーチを順次に造りながら、アーチの連続体としてドーム状ヴォールトを造っていく。直前にできた石層アーチが次の石層アーチの型枠の役割を果たしているのである。

第3に(図18参照)、石層アーチは、鉛直面で造られ、四周アーチによるベイ区画に対応できるようになっている。そして、迫石となる煉瓦のモルタル付着力が有効に働くように煉瓦が傾けられている。オリエントでは、石層アーチと迫石が同じ角度で傾けられて造られている。ビザンチンでは迫石のみが傾いているのである。この点が、オリエントの工法とビザンチンの工法の違いである。これに、更に西欧の違いが加わってくるのである。

この西欧の違い、つまり、施工法の技術的応用問題の検討が本研究の出発点であり、その史的展開の解明が本研究の一貫した視点である。さて、トンネル・ヴォールトへのフリーハンド工法の応用について考察する。まず、石層アーチの連続体を取りあげてみよう。石層アーチの連続体を作ることは、直前の石層アーチを型枠として、利用するためである。これをもう少し細部的に見ると、1つ1つの石層アーチを造るとき、迫石がいかに、所定の所にとどまっているかが、施工上の問題となっている。その解決法として、モルタル付着力の利用がある。モルタル付着力によって、所定の位置にとどまらせるのであるが、その場合、モルタル付着力だけでは不十分なので、上記で述べたようにオリエントでは、石層の傾きによって、ビザンチンでは、迫石の傾きによって、そして、ゴシック・リブ・ヴォールトでは、簡単な型枠(伸縮せき板など、簡単な支持材)の補助によって解決した(注3の文献参照)。

ゴシック・リブ・ヴォールトでは、石層がアーチになっているが、トンネル・ヴォールトに類似した放射型石層配置になっている。時代的に前後するが、考え方として、この工法の延長上で、トンネル・ヴォールトをとらえていくと、トンネル・ヴォールトでは、石層アーチは直線化し、型枠としての機能を喪失し、モルタル付着力の有効性がなくなった状態である。それで石層アーチが直線化する代わりに、石層と石層の組み合わせがアーチをなす。つまり、疑似の石層アーチ(ヴォールトの一部としてのアーチ)が成立している。疑似の石層アーチを連続させて、トンネル・ヴォールトを造っていく施工方法が考案された。この疑似の石層アーチが、次に述べる区画を持ったベイ工法と結びついたところにロマネスク・トンネル・ヴォールトが存在する。

フリーハンド工法では、直前で造られた石層アーチが、型枠の機能を果たしている。そこではモルタルは、単に矩形の迫石の間をくさび型形状のモルタル目地で詰めるという役割だけでなく、モルタルが軟らかい状態で、石層アーチを自立させるという役割を担っている。このとき、軟らかいモルタルに圧縮力がかかる。このモルタル耐圧縮力を初期圧縮塑性強度と呼ぶ。石層アーチの自立と、これによる型枠としての利用は、初期圧縮塑性強度を利用しているという点が深く関わっている。石層アーチの連続体の施工法では、迫石と迫石の間にモルタル初期圧縮塑性強度を働かしている。古代ロー

マ型トンネル・ヴォールトでは、疑似アーチの構成(石層アーチと石層アーチの組み合わせ)の所に、上記のモルタル初期圧縮塑性強度を利用すれば、フリーハンド工法の応用は可能となる。この場合、直線状の石層アーチの長さを短くし、それに対応する型枠を用いることである。この施工法を端的に実験するにはアーチ(ヴォールトの一部を)完成とともに(煉瓦積み終了直後、モルタルが軟らかいうちに)、直ちに型枠を取り外して移設再利用する施工法を実験することである。

次に、このような施工で造るトンネル・ヴォールトがフリーハンド応用工法として位置づける理由、つまり技術史的系譜について説明しておこう。ビザンチンのドーム状ヴォールトの大きな特徴は、ベイ工法という点である。この点については既知のことであるが、その要旨を述べると次の通りである。四隅の支点(支柱)に四つのアーチをかけて、四周アーチを造り、これらのアーチに囲まれた矩形(これをベイという)を埋める方法で石造天井を造る工法である。ベイ区画を埋めると言う工法は、アーチの曲率や方向を限定していないので、これを、前述のモルタル目地調整工法と組み合わせると、自由な曲率を持ったアーチで造ることができ、しかも、石層の方向(四周アーチに対する石層の方向)も自由に造ることができる。また、モルタル目地調整工法の側からベイ工法を考えると、ベイ区画の形は、正方形のような整形の区画でなくとも良く、自由な区画(自由な平面の形)が可能なのである。このような施工上の自由は、極めて重要であり、ドーム状ヴォールトの変化や発展の可能性、つまり、技術史的展開の豊かな可能性を秘めているということである。^{注6} 古代ローマ建築の技術を継承しているビザンチン建築以後の、西欧石造天井架構の技術史は、フリーハンド工法の検討を抜きにしては考えられない。古代ローマ型トンネル・ヴォールト(石層が直線状のもの)の、ロマネスク・トンネル・ヴォールト(図20参照)については、全くフリーハンド工法とは無縁のものと考えられているのが実情である。型枠を用いたくさび型工法で施工された全く疑問もなく思われている。それは、迫石の状況(形状)を観察すればわかることであるが詳細の報告がなされていないのが現状である。ロマネスク・トンネル・ヴォールトにモルタル目地が存在することからモルタル目地調整工法を推察することができる。くさび型工法と考えることの理論上の限界は、ロマネスク・トンネル・ヴォールトにベイ工法を示す横断アーチが存在することを立証できないという点から理解できる。ところが四周アーチを持ったドーム状ヴォールトの施工法の技術史的展開過程を考えれば横断アーチの存在が説明できるのである。このことは、ロマネスクの教会堂が、石造天井の種類に関わりなく、共通の設計法をもっていたと推定することができることから説明できる。設計法に関しては稿を改めて論じる。

モルタル目地調整工法で本研究が最も中心的な課題としているのは、型枠の取り外しの時期である。モルタル硬化後に取り外すという考えは通念になっているが、いかに強いモルタル目地をつくるかという施工法の技術からすると、モルタル硬化前に型枠を取り外し、モルタルを締め固めたと考えるのが自然である。このような締め固めの工法がフリーハンド応用工法なのである。ここでモルタル硬化前というのを本研究で煉瓦積み終了直後と解釈している。以上のことを別の角度から再述すると、ゴシック・リブ・ヴォールトは、古代ローマ型の石層に類似しているが、石層はアーチ状に湾曲している。これがフリーハンド工法の痕跡を示している。石層はアーチ状になっているので、リブ・ヴォールトでは、石層ごとに一時的に型枠を用いる方法を採用することができるためである。

ロマネスク・トンネル・ヴォールトでは、石層アーチが直線で、古代ローマ型の石積みのヴォールト(直線状の石層の構成されたもの)を示している。それで、ロマネスク・トンネル・ヴォールトで

は、ベイ毎に一時的に型枠で支える方法を採用したと考える。以上で述べたことは、仮説であって、事実かどうかは実験によって検討しなければならない。すなわち、煉瓦積み終了直後のまだモルタルが軟らかい時点で、アーチ(ヴォールトの一部)が自立するかどうかを確かめるのである。本研究の実験は、このような意義と目的を持って実行したものである。実験は、平成元年、及び平成2年の2回に分けて、2種類のアーチ製作を行った。安全性を考え、木製型枠の作製にも工夫を凝らした。以下、2種類のアーチ製作実験について報告する。

第2章 フリーハンド応用工法によるアーチ製作実験

西欧の石造建築、なかんずく石造天井は、パンテオン図法(古代ローマのパンテオンの断面の解析により推定した当時の設計法)^{注1)}を適用して設計施工されたと筆者たちは、推定している。それ故、実験に関わる部材や、装置の寸法は、パンテオン図法の適用によって決定したものである。この決定方法が、西欧の石造天井をシュミレータ的に実験する本研究の前提となっている。本章ではスパン2mの煉瓦造アーチ製作実験を行った。その内容について述べる。

1、アーチの設計と鉄骨製実験装置

パンテオン図法にもとづいて、半円アーチを設計し、下半部分(中心より45度以下)は、腰固め部分になるので、鉄骨で補強し、その上半部分が本当のアーチとなるので今回の実験の対象とした図(1、2)。本当のアーチは4分の1円で、スパン2m、アーチ肉厚はスパンの20分の1の10cm、モルタル目地厚は平均1cmとした。アーチの奥行きは煉瓦3個分で60cmとした。

図1 パンテオン図法にもとづくアーチ設計図、点描部分が製実験のアーチ部分、45° 以下は鉄骨製で上部にターンバックルをとりつけた。

図2 実験装置：アーチ下半分の腰固め部分を鉄骨製とし、上部の鉄筋はターンバックルで、左右の溝型鋼の上にアーチが製作される。

2、アーチの材料 市販の煉瓦(全形210×100×60及び半ます105×100×60)を使用した。また、目地材(モルタル)として、石灰モルタル

ル(消石灰12kg、川砂48kg、水12ℓ)の調合、重量比1:4:1)を使用した。石灰モルタルの調合比は、本稿筆者の1名である五島のゴシック・リブ・ヴォールトの施工法に関する実験で使ったものと同種である。^{注2)} 低質の石灰モルタルを実験の条件として設定したものである。

3、木製型枠

4mスパンのアーチ製作時の木製型枠を詳細に述べており、その方式と変わらないので、ここでは説明を省略する。

4、実験経過

実験は、平成元年11月22日(水)に大同工業大学白水校舎造形室で行った。

(1) 煉瓦積み作業経過(図3、4、5、6参照)

10:00AM:モルタル練り始め

11:00AM:煉瓦積み始め

1:00PM:煉瓦積み完了

- ① 煉瓦は直方体であるので、煉瓦と煉瓦の間の目地モルタルをくさび状にして積んだ。
- ② 煉瓦は角材と角材の間に架けわたすようにし、目地モルタルが下に落ちないようにした。
- ③ モルタル塗厚は、煉瓦に適度な厚さで一様に塗布し、次の煉瓦を据え付け、ベニヤ片でモルタルをつきながら詰め込んだ。
- ④ 煉瓦は初めに約5分程、水に浸した上で利用した。煉瓦積み中モルタル内の水分の吸湿が強く、乾燥が著しい時は、上から雑巾で水分を補充した。

図3 煉瓦積み作業風景を示す。

図4 本研究の実験：フリーハンド応用工法によるアーチ製作実験におけるアーチ積み途中の全景を示す。

(2) 型枠の取り外し

- ① 始めに煉瓦と角材の間のくさびを取ることで2～3mm程度の空をつくり、この時点でアーチに変形がないかどうかを確認した。
- ② 次に、角材を抜き煉瓦とコンパネの間を12mm程度空けた。①、②の作業の結果、アーチが完全に自立することが確認された。
- ③ 足場の上に設置した2段のまくら木上部とコンパネとの間のくさびを取ることで、煉瓦下面と型枠の間にさらに約15mmの空をつくり、まくら木を取り除くことができるようにした。
- ④ 型枠取り外し完了：まくら木を取り除き、コンパネを取り外すことによって型枠取り外し作業が完了した。型枠取り付け、取り外しの手順については図7に示した。

図5 製作中のアーチを下から見上げた状況、型枠の形状及び角材とその下のくさびの関係を示す。

図6 煉瓦積み作業が完成した様子を示す。下半の腰め部分の実験装置(鉄骨製・左右に煉瓦積み)と型枠の関係がわかる。

第3章 スパン4mの煉瓦造アーチ製作実験

本章では、実物の大きさにより近い規模で、実験を行うために前回のアーチの2倍の大きさとし、スパン4mの煉瓦造アーチ製作実験を行った。但し、モルタル目地厚は前回と同様の約1cmとした。この実験では、下半部分の、鉄骨補強部分を削除して、上半部分の4分の1のみのアーチ製作実験の装置とした。

1、アーチの設計と鉄骨製実験装置

アーチ製作用の鉄骨製実験装置は、図9-1, 2に示した。溝型鋼(250×90×7および150×75×6.5)を使用した。アーチのスパンは4mで、

図7 型枠の組立の過程と角材とアーチが接する部分を図解した。型枠の解体過程は、くさびを抜き、アーチ下側と角材との間に約15mmの空をつくりアーチに変形しないかを見る。この時点でアーチの自立が確認できる。次いで、角材を抜きとり、側板(コンクリート・パネル)を取り払う。

図8 アーチ(スパン2m)の成立

煉瓦積み終了直後目地モルタルが、軟らかい時点で型枠を取り外し、アーチが成立した。モルタル初期圧縮塑性強度を利用したモルタル目地調整工法によるアーチ製作実験が成功したことを示す。この状態でモルタル目地の硬化を待つ。

その曲線の長さは、内輪で4.55m、外輪で4.78mである。図1のパンテオン図法に基づくアーチ設計図の、45°以上の点描部分のみを実験対象とし、45°以下の部分を省略した。従って、図1のスパン2mを4m、煉瓦厚20cmとなるように、鉄骨で実験装置を製作した。図2の写真のターンバックルを溝型鋼鉄骨に置き換えたと考えれば良い。

図9-1 実験装置設計図

図9-2 実験装置設計図

2、アーチの材料

市販煉瓦(全形 $210 \times 100 \times 60$ 、半ます $105 \times 100 \times 60$)を2層積みとした。1層目の煉瓦本数346.5個、2層目煉瓦本数346.5個、計693個、この内126個は半ますを使用した。石灰モルタル(消石灰130kg、川砂520kg、水130ℓを調合、重量比1:4:1)を使用した。目地層は内輪で1.1cm、外輪で1.6cmである。アーチの全重量は、煉瓦重量1872kg、石灰モルタル重量780kgの合計で2652kgである。

3、木製型枠 型枠は、3つの箱型より構成した。この型枠を鉄骨装置に据え付けたときの状態を図9-2に示した。型枠のベニヤ厚は2.1cmである。目地部分を支える角材は、 $40\text{mm} \times 27\text{mm}$ 、長さ120.5cm、計62本作製した。前回と同様、歯車状側板凹部に小さくさび(図10)、側板下に大きいくさびと、ジャッキ(10個、自動車用のもの)を併用して使用した。(図11)型枠の取り付けには、水準器をあてて、水平を微調整した。また、型枠の安全性を確かめるために、煉瓦の空積みを行った。(図14参照)

4、実験作業の経過

実験は、平成2年11月24日大同工業大学白水校舎造形室で行った。アーチを市販の煉瓦で積む方法と、完成に至るまでの時間経過を示す。

図10 歯車凹部に小さいくさびを置いた状況を示す。この上に角材を置く。

図11 型枠の側板の下部に大きいくさびとジャッキを取り付けた様子

図12 型枠の細部

図13 型枠の全景

図15 スパン4mの煉瓦造アーチの製作途中の作業風景
(本研究のフリーハンド応用工法)

図14 煉瓦の空積みの様子

(1) 煉瓦積み作業の時間経過(図15)は次の通りである。

8:00AM:モルタル練り始め

8:10AM:煉瓦積み始め

4:00PM:煉瓦積み完了

- ① 煉瓦を小端だけにして2層に積み、それぞれの層を1丁と半ますを使い、互い違いにし、目地との厚さを1cm(円弧を描くくさび状目地は、下部1.1cm、上部1.6cm)として積んだ。
- ② 煉瓦は角材と角材の上に掛けわたすようにし、目地モルタルが下に落ちないようにした。
- ③ モルタル塗り厚は、煉瓦に適度な厚さで一様に塗布し、次の煉瓦を据え付けベニヤ片でモルタルをつきながら詰め込んだ。
- ④ 煉瓦は始めに、約5分程水に浸した上で利用した。

(2) 型枠取り外し経過(図16)

4:20PM:ダイヤルゲージ設置

5:45PM:型枠取り外し作業開始

5:50PM:煉瓦造アーチ完成(図17)

- ① 煉瓦を置く角材の下のくさびを外から内側に落とすことにより中央に僅かな隙間ができる。
- ② さらに、型枠を受けるまくら木を取り外すことにより、型枠とアーチの間に隙間ができる。
- ③ まくら木を手前に引張り、型枠全体を前方に取り外す。
- ④ 以上により、煉瓦造アーチの製作実験を完了する。

以上、煉瓦積み始めから10時間でアーチが完成し、モルタル初期圧縮塑性強度と一時的に型枠を利用したフリーハンド応用工法が実験的に証明された。

図16 アーチの形成直後に型枠を取り外す

図17 アーチ(スパン4m)の成立

煉瓦積み終了直後目地モルタルが、軟らかい時点で型枠を取り外し、アーチが成立した。モルタル初期圧縮塑性強度を利用したモルタル目地調整工法によるアーチ製作実験が成功したことを示す。この状態でモルタル目地の硬化を待つ。

第4章 アーチ製作実験結果の考察

2回のアーチ製作実験結果について考察する。初めに、2つのアーチの取り壊しについて説明する。

2mスパン・アーチは平成7年4月に取り壊した。安全性を考慮して、数人の手作業で少しずつ持ち上げ、ずらしながら、取り壊した。4mスパン・アーチは平成8年6月5日、解体業者に依頼して取り壊した。取り壊し作業は、9:00に始まり

10:00に終了した。向かってアーチ曲線の4分の1のところを削岩機で、2〜3列の煉瓦を崩していった。一列煉瓦でもまだ、アーチが壊れず、一列のアーチを崩し、アーチの接続がなくなるような状況に至った時に右側の4分の3が床に整然と落下した。床には畳を敷き、騒音防止をはかった。

これらのアーチの取り壊しで、石灰モルタルが完全に硬化していること、モルタルは付着力が弱く手では取れないが、落下ではげた目地の硬化モルタルは手で崩せるほど柔らかいものであることが確認された。以上、2種類のアーチ製作実験で、アーチを造れることが可能な点が実証された。

フリーハンド工法とは、型枠を使う代わりに、石灰モルタルの付着力を利用して、個々の迫石がずり落ちないようにして、石層アーチをつくる工法である。このずり落ちを防ぐために、石層アーチ又は迫石を傾けてモルタル付着力を補った。できあがった石層アーチを支持材として利用して、その上にタイルを貼るようにして新しい石層アーチを作る。この連続でヴォールトができる。このフリーハンド工法では、迫石は直方体で、迫石接触面の目地厚はモルタルで調整している。つまり、モルタルの初期圧縮塑性強度を利用してくさび型の迫石を代用している。

本研究では、このモルタルの初期圧縮塑性強度に注目した。すなわち、モルタル付着力と、石層アーチの支持材としての利用は木製型枠の利用に頼り、モルタルの初期圧縮塑性強度を利用してトンネル・ヴォールトが造れることを証明した。このことは、モルタルの乾燥まで型枠を取り付けておくという従来の施工法の考えを打破した。これをフリーハンド応用工法と称する。

この施工法によって、トンネル・ヴォールトにおいても、迫石の直方体(形は不整形でも良い)を自由な曲線や曲面に組み合わせてアーチ又はヴォールトが作れることがわかった。このことは、迫石の量産(同じ大きさでなくとも良く、また、仮組立や本組立のための番号付けも不要である)と現場での柔軟な施工法の確立を意味している。

本文の中でも述べたが、軟らかいモルタルのアーチに自重による圧縮力を加えることによって、圧密し、強度や付着力を高め一枚板の強い曲面板のようなアーチを造る施工法を当時の工匠は経験的に熟知していたと言えよう。そして、時間や日数が経つにつれて、モルタルが乾燥収縮するが、この乾燥収縮の初期段階で、モルタルに圧縮力を加え強い目地網をつくるのである。

ビザンチンのドーム状ヴォールトのフリーハンド工法の特徴をなす、モルタル目地調整工法とベイ工法は、西欧石造天井の原点であり、ロマネスク・トンネル・ヴォールトやリブ・ヴォールトの成立展開に強く関わっていることが、この2つの実験を通して理解することができた。

更に、フリーハンド工法及び、その応用工法の実験を多く重ね、中世当時の経験的施工法で示された合理的施工法をより深く解明し、上述の技術史的展開を更に強固に裏付けていきたい。

図18 ビザンチンドーム状ヴォールトコンス タンチノーブル、ハギヤ・エイレーネ(6世紀)

図19 ショワジーによるフリーハンド工法の説明図

Bはオリエント型の石積み方法。石層も迫石も同じように傾いている。Cはビザンチン型の石積み方法。石層は鉛直面内で造られ、迫石のみ傾いている。Aは、石層も迫石も鉛直面内で造った場合で、この方法では、石層アーチが自立する前に迫石がずり落ちてしまう。それで、B、Cのように傾斜する方法が採用された。

Bはオリエント(ペルシア)の工法、Cはビザンチンの工法、Aは石層も迫石も鉛直にした場合。(この方法では石層アーチが自立する前に迫石がずり落ちてしまう。)

A.Choisy, Histoire de l'architecture, tome second, Paris, P, 12

Bのオリエント型の事例は注4参照 ヴォールト中央を通る断面図目地のある部分はヴォールト内輪面を示している。

図20 ロマネスク・トンネル・ヴォールトの施工例

石層が直線上の古代ローマ型石積み工法を示している。コルベラ・デ・リョブレガートのサン・ボンス教会堂(紀元1000年前後)のトンネル・ヴォールトの一部。太いアーチは横断アーチ(スペイン、カタルーニャ地方)

出典:Hans Erich Kubach, Romanesque Architecture(飯田喜四郎訳、本の友社P: 8) 8図9

トンネル・ヴォールトの実例はフランスでは、ボアトゥー、オーヴェルニュー、ブルゴーニュ地方に多くみられるが、上記のサンボス教会堂は、それらの先駆的例である。フランスのトンネル・ヴォールトは、モルタル内装がなされ目地が見えない例が多い。その中でトゥールズのサンセルナン教会堂(1080頃-12世紀、フランス、ラングドック地方)の石造天井は、交差部に隣接する5つのペイでヴォールト迫石積み状態の見える貴重な例である。本稿では図版の明瞭さの限界のため割愛する。

151 五島利兵衛「ヴォールト殻迫石積み形式の分類と表記法ーリブ・ヴォールトの殻施工に関する研究その1ー」日本建築学会計画系論文報告集、第353号昭和60年7月、PP. 129-140、図18参照 ヴォールトの曲面を構成している石材を迫石(せりいし) voussoirといい、迫石と迫石は直線又は曲線状に連なっており、この連なりを石層courseという。煉瓦の場合でも迫石、石層という言葉を用いる。ヴォールトやドームなどの石積み型式の分類と表記法では、迫石相互、石層相互の接触面について水平(H)、垂直(V)、傾斜(C)の記号を用いて表した。

152 18参照

153 五島利兵衛「ケルン大型堂内陣の平頭ヴォールトの実物大模型によるフリーハンド施工実験と施工法の検討」日本建築学会計画系論文報告集、第396号、1989年2月、PP. 85-99

154 本実験は、次の論稿をもとに作成した。

五島利兵衛「リブ・ヴォールトの迫石の大きさ、形状、比重ーゴシック建築研究(8)ー」大同工業大学紀要、第20巻1984年

11月、PP. 159-168

五島利兵衛「フリーハンド応用工法によるアーチの施工実験」大同工業大学紀要、第26巻1990年12月、PP. 133-138

五島利兵衛、堀田雄一郎「レンガ造アーチの施工実験(2)ーフリーハンド応用工法からの考察ー」大同工業大学紀要、第28巻1992、PP. 85-102

五島利兵衛、堀田雄一郎、青木伸浩、荘国備「レンガ造アーチの施工実験(3)ーフリーハンド応用工法からの考察」大同工業大学紀要、第29巻1993、PP. 165-207

155 オリエント・メソポタミアでは、アッシリアのヴォールト構造やテシフオンの宮殿正面イワンのヴォールト(スパン約26m、高さ約34m)が型枠なしで造られていたことが知られている。

156 ペイ工法における、自由な区画という技術から、区画の細分化という技術が発展する(これを分蓋工法という)。ここに、6分ヴォールトや交差リブヴォールトへと発展する可能性が存在する。分蓋工法と石層アーチの型枠機能という利用法から石造センタリングとしての交差リブの成立・発展が可能となる

157 五島利兵衛「古代ローマ・パンテオンの幾何学的比例についてー設計図法の考案とその適用に関する研究ー」日本建築学会計画系論文報告集第365号昭和61年7月P. 113-126

158 主3の文献参照

(1998年2月6日原稿受理、1998年11月18日採用決定)