

小野田徳利窯の基本形状に関する調査研究

河原 利江 (感性デザイン工学科)

馬場 明生 (感性デザイン工学科)

台信 富寿 (設計工学専攻)

An Investigational Study on The Basic Form of ONODA Bottle Kiln

Rie KAWAHARA (Department of Perceptual Design and Engineering)

Akio BABA (Department of Perceptual Design and Engineering)

Tomikazu DAINOBU (Division of Design Engineering)

This paper deals with the preservation of Onoda Bottle Kiln which was built in Taiheiyo Cement Factory in Onoda City. October 2000, the excavation started around the kiln so that three clay brick masonry foundations connected with the existing kiln and two small foundations in the east and one foundation in the west were found. And many brick masonry units and prisms were also found in this investigation. From results of uniaxial compression tests about these units and prisms, it was clarified that the brick masonry units and prisms used for Onoda Bottle Kiln had large capacity of deformation. And it was also clarified that about 126,000 bricks had been used for construction of 1 bottle kiln by detailed dimensional measurement of this kiln.

Keywords: brick masonry, preservation, modernization heritage, Portland cement, bottle kiln, Onoda City

1. はじめに

小野田徳利窯は、山口県小野田市にある太平洋セメント小野田工場（旧小野田セメント）内に残存する、明治初期のセメント焼成用堅窯であり、当時のセメント製造技術を現代に伝える唯一の象徴と言える建造物である。1999（平成 11）年の徳利窯保存調査委員会設立以来、同窯を「近代化遺産」として保存するために必要な調査が進められてきた。

予備調査を含め、4 ヶ年にわたる数々の調査によって、これまでに現存する 1 基の徳利窯が 1883（明治 16）年完成の第 1 号窯であるという歴史的事実が明らかになった他、2000（平成 12）年 10 月に山口県埋蔵文化財センターの協力で行った徳利窯周辺発掘調査では、現存する徳利窯を含め合計 7 基の窯基礎が発見され、創業当時の徳利窯の建設された位置や焚き口の形状および排水溝の位置など貴重な歴史的資料を得ることが出来た。さらには操業当時の徳利窯の写真資料から小野田セメント創業以来徳利窯がどのように増設または改造されてきたのかという歴史の変遷も明らかになることができた。

本報では、現存する徳利窯の詳細な寸法測定調査、

出土した窯基礎に使用されている煉瓦の材質に関する実験などを行うことによって、同窯に関して新たに得ることができた事実について述べるとともに、現在同窯に生じている劣化現象について調査した結果も報告する。なお、徳利窯の建設年代の推定および周辺発掘調査の概要については「小野田徳利窯の建設年代の推定に関する研究」¹⁾ で発表している。

2. 研究の経緯

2000（平成 12）年 7 月下旬から 8 月の中旬まで、徳利窯煙突部の接触方式による寸法測定調査および劣化状態の調査のために煙突部に足場がかけられた。この調査では徳利窯煙突部の外形寸法の測定、煙突部に用いられている煉瓦の寸法測定ならびに典型的な劣化現象の観察を行った。すなわち、徳利窯の基本形状、煉瓦寸法、ボンディングなどの構法の解明、さらに補強鋼製バンドの劣化状態の観察を行うことによって徳利窯の現状を把握することを目的として行われたものである。その後に行われた徳利窯周辺発掘調査では、前述のように 6 基の窯基礎が出土し、その際には大量の煉瓦および煉瓦と目地が組積されたままの塊が出土したため、これらの煉瓦および組積体を使用した材料実

験をする機会を得ることができた。周辺発掘調査の結果を図1に示す。

3. 接触方式による煙突部寸法測定調査

3. 1 調査項目および調査方法

調査項目およびその方法を表1に示す。また、それぞれの項目についての具体的な調査方法を図2~4に示す。寸法測定調査は基本的にスチールテープを用いて行った。まず、図2に示すように東西南北4方向(1~4)に煙突頂上部から水糸を張り煙突部を4エリアに分割し、煙突部の煉瓦に段数が分かるように頂上部を基準としてラベルを貼った。この水糸とラベルによって方向と段数を把握しながら調査を行った。各段の周長の測定および煉瓦寸法の測定は原則として図3に示すようにスチールテープを煉瓦の高さの中心に合わせて測定した。図2に示すように煉瓦上面の傾斜角度の測定は8方向について、煉瓦の高さについては4方向について測定した。傾斜角度の測定の際には、水準器を図4に示すように煉瓦上面において右を+、左を-として測定した^{注1)}。

3. 2 調査結果

1) 現存する徳利窯の基本形状

① 基本寸法

徳利窯の外形寸法を図5に示す。徳利窯は主に直方

体(ほぼ立方体)の焼成部と円錐状の煙突部とから構成されている。焼成部の寸法は東西方向6.7m、南北方向6.6m、高さ6.7mであり、若干(煉瓦の小口寸法煉程度)東西方向に大きい直方体である。また、煙突部の高さは11.1mであり、徳利窯全体では17.8mとなっている。同窯の基礎底盤面は焼成部北面の焚き口部周辺発掘調査により高さ基準線より約570mm程度下に位置していることが確認されている。

また、煉瓦の段数は焼成部が103段、煙突部が160段となっており、焼成部は高さ基準となる地点から85段がフランス積み、その上の18段がオランダ積みとなっている。煙突部は頂上部を基準として40段目までが円筒状に、それより下の120段は円錐状に組積されている。以下、頂上部から40段目までを円筒部、41段目以降160段目までをテーパ部と呼ぶこととする。

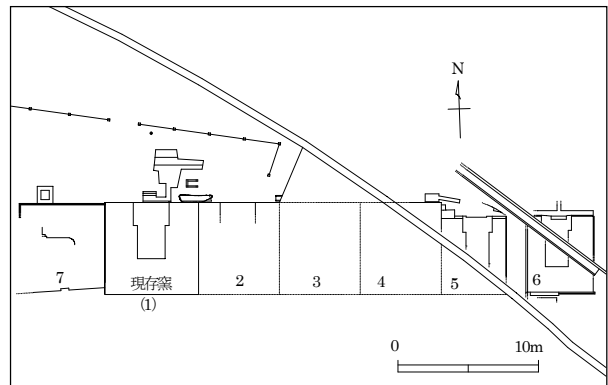
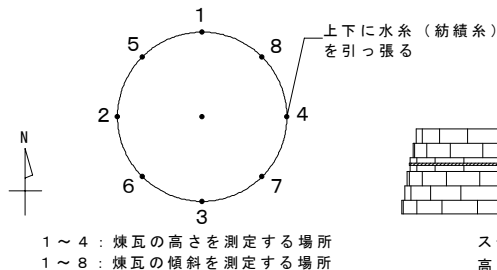


図1 周辺発掘調査の結果



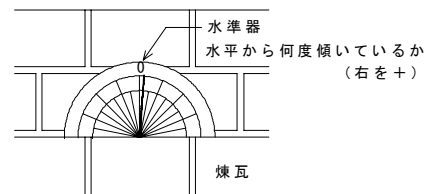
1~4: 煉瓦の高さを測定する場所
1~8: 煉瓦の傾斜を測定する場所

図2 煉瓦の高さ・傾斜の測定方法 (上から見た図)



スチールテープを煉瓦の高さの中心に合わせて

図3 周長および煉瓦寸法測定方法 (横から見た図)



水準器
水平から何度傾いているか (右を+)

図4 煉瓦上面の傾斜測定方法 (横から見た図)

表1 調査項目および方法

調査項目	方法	備考
煙突部の基本寸法	基本的な外形寸法をスチールテープで測定する。	
各段の周長	頂上部を基準として5段毎に測定する。その際、煉瓦の高さの中心にスチールテープをあてて測定する。	図2参照
煉瓦の個数	周長を測定した際、同時にその段の個数を数える。	
扇形煉瓦の外周円弧長・目地幅	周長の測定と同様に、煉瓦の高さの中心にスチールテープをあてて煉瓦と目地の寸法を測定する。個数は測定しやすい場所について30個以上測定する。	図1・2参照
煉瓦の高さ	東西南北、各方向において30段以上測定する。	図1参照
煉瓦上面の傾斜	円を8等分した各方向において、煉瓦上面に水準器をあて時計回りを正として、水平から何度傾いているかを測定する。	図3参照
煙突の厚さ	頂上部において確認できる煙突の厚さを測定する。	
ボンディングの記録	煙突部の基本的なボンディングパターンをスケッチする。	
劣化現象	煙突部全体に生じている典型的な劣化現象を観察し、位置を確かめながら写真撮影する。	
補強構成バンドの状態	煙突部に取り付けられている構成バンドの劣化状態をそれぞれ記録、写真撮影をする。	

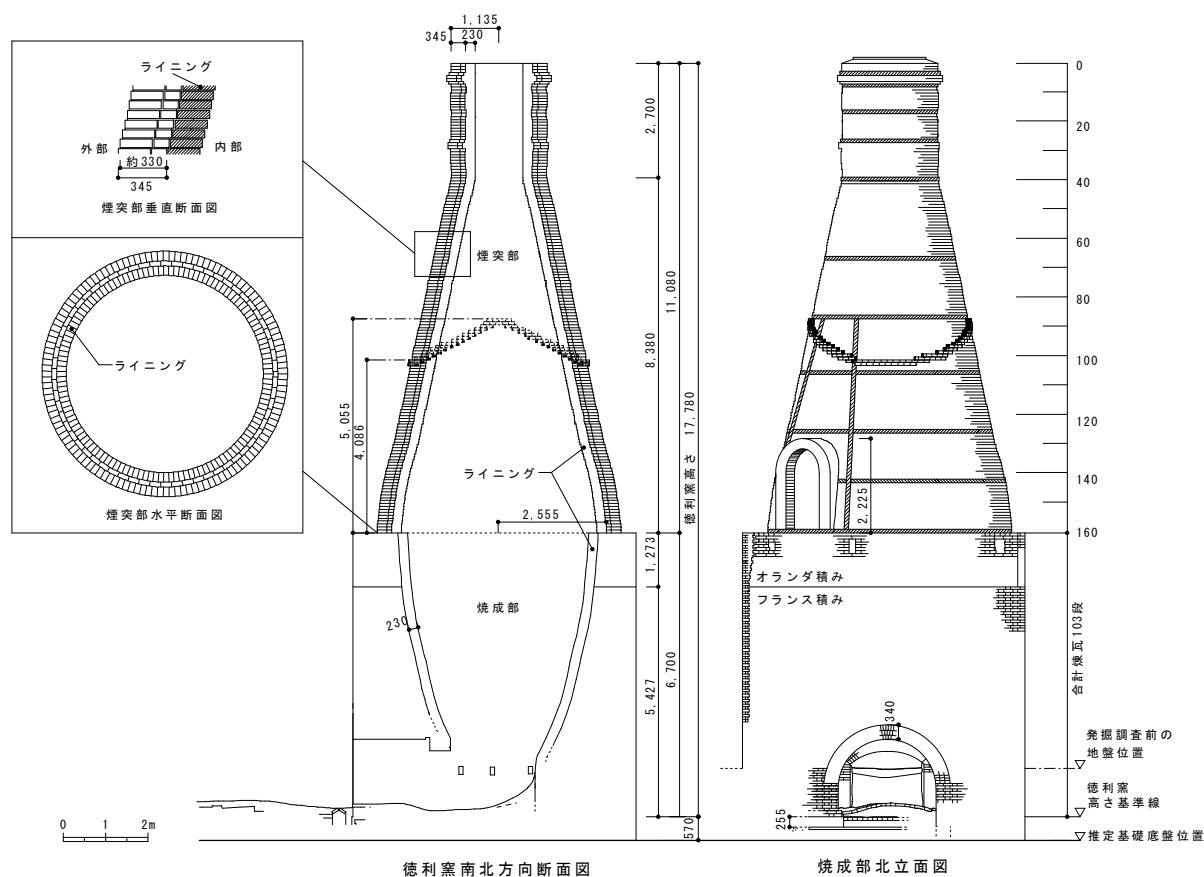


図5 徳利窯寸法測定調査結果（北立面図および南北断面図）

円筒部の5段目～7段目までと27, 28段目は一回り大きくつくられていることから、水切りの役割を果たしているのではないかと考えられる。またテーパ部の88段目～103段目には、創業当時屋根がかけられていたと思われる部分が凸状に一周している。

② 煙突部各段の外周長、煉瓦の個数

煙突部の外周長を測定した結果を図6-1に、各段の煉瓦の個数を測定した結果を図6-2に示す。図6-2における第130段から160段の部分は開口部があるので、これを補正したものを図6-3に示す。これらの結果から分かるように、円筒部つまり1～30段は周長が一定しておらず、また130段～150段付近には大きな膨らみが見られる。この膨らみは意図して作られたものではなく、創建当時煙突は直線で施工されたが、窯使用時に高熱を受ける場所が次第に膨らんでいったものであると考えられる。

③ 焼成部内の寸法測定

周辺発掘調査終了後、焼成部内の寸法測定調査を行った。煙突部外周とは異なり、内部はセメントを焼成した際のアンザツが多量に付着しているため、煉瓦そのものの個数および煉瓦と目地の寸法測定を行うこと

はできなかったが、火床部からの高さとその高さにおける直径を測定することによって焼成部内部の寸法測定を行うことができた。

④ 徳利窯全体に使用されている煉瓦の個数の推定

今回の詳細な寸法測定調査の結果をもとに、徳利窯1基当りに使用されている煉瓦の個数の計算を行ったところ、約14万6千個の煉瓦が使用されているという結果となった^{注2)}。また、現存する徳利窯は1883(明治16)年の建設後、焼成部の大型化を行っていると考えられ、その大型化したオランダ積みで組積された部分の個数を除くと、約12万6千個という結果となった。すなわち、創業時に建設された徳利窯1基には約12万6千個の煉瓦が使用されたと言える。このことは、小野田セメント創業五十年史において「一基の窯を築造するに十二万五千個の煉瓦を要したといふ」という記述²⁾における個数と近い数字となっている。この記述が、当時12基存在した徳利窯のうち、創業時に建設された4基の徳利窯建設に関する数字であれば、かなり正確な記述であると位置付けることができる。

③ 補強鋼製バンド

煙突部には締付け用の補強鋼製バンドが合計で13

本取り付けられている。そのうち横方向のものが 11 本、縦方向のものが 2 本ある。横方向のものは、頂上部を基準として 4、8、17、26、40、67、87、106、126、143、160 段に取り付けられている。縦方向のものは開口部を挟むように 2 本取り付けられている。第 26 段目に取り付けられているものはリベット接合であり、第 143 段目に取り付けられているものは縦方向のバンドと溶接されている。その他のものはボルト接合である。

劣化状態は、同じ接合方法のバンドでも腐食の激しいものとそうでないものがあり、表 2 に示すように、大きく 3 種類のものを使用されていた。これらはそれぞれ製造年代の異なるものと考えられ、移動時に何度か補修が行われたことをあらわしていると考えられる。また、バンド締付け部は締付けのために変形しており、締付け剛性が不足し、加熱による損傷を拘束することが不十分となっていることも考えられる。

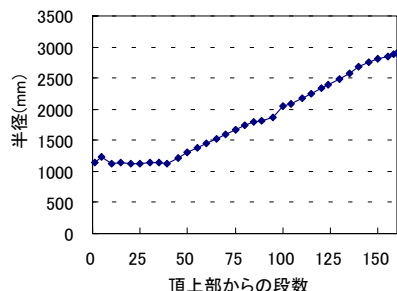


図 6-1 各段の半径の推移

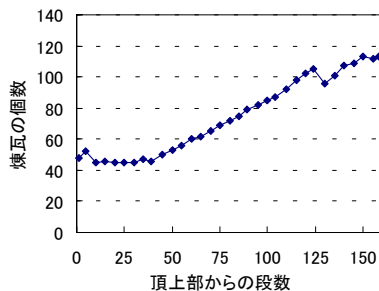


図 6-2 各段の煉瓦の個数の推移

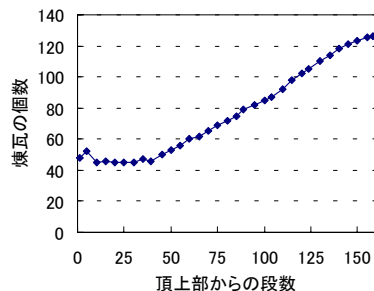


図 6-3 各段の煉瓦の個数の推移 (修正)

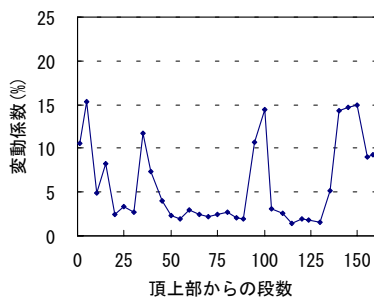
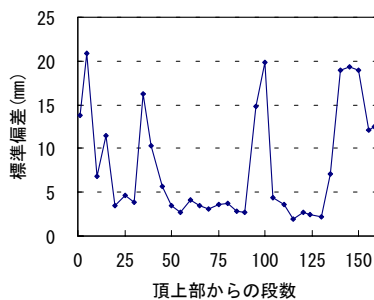
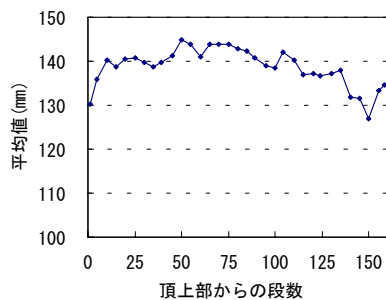


図 7 各段の扇形煉瓦の外周円弧長における諸数値の推移

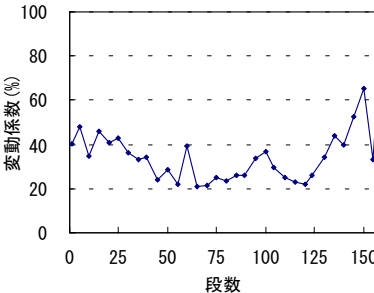
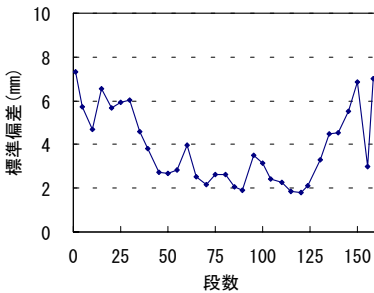
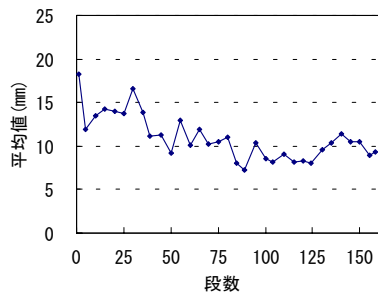


図 8 各段の垂直目地幅における諸数値の推移

表 2 補強構成バンドの種類

①		<p>第 26 段目の鋼製バンド。リベット接合であり、ほとんど劣化していない。創建当時 (明治 26 年) のものであると考えられる。</p>		<p>第 40 段目の鋼製バンド。ボルト接合であり劣化がほとんどない。最も新しいものではないかと考えられる。</p>
②		<p>第 8 段目の鋼製バンド。ボルト接合であり最も劣化が激しい。明治 30 年代に取り換えられたものではないかと考えられる。</p>		<p>開口部横の縦方向の鋼製バンド。ひび割れを生じており、内部が腐食している。</p>

2) ボンディングパターン

現存する徳利窯焼成部のボンディングパターンは、前述のように焼成部の下部はフランス積み、上部はオランダ積みと異なるボンディングパターンとなっている。また、焼成部東面および西面の一部は長手積みで補修されていることが明らかになっている¹⁾。

煙突部における、基本的な煉瓦のボンディングパターンを写真1、2、3に示す。円筒部は外部については小口積みで、目地が広がってはいるが基本的に破れ目地となっている。しかし、テーパ部に入るとその規則が次第にくずれ、所々が芋目地となっている部分もあった。内部は長手積みで、その内部のライニングの煉瓦は小口積みとなっている。全体の厚さはこのライニングを除いて1枚半となっている。

一方、発掘調査で出土した6基の窯基礎は、図に示す1~4号窯までが連続した煉瓦壁で一体となっており、現存する窯の下部と同様フランス積みであるのに対し、5および6号窯はオランダ積みとなっている。7号窯は変則的な積み方となっている¹⁾。

3) 煉瓦の種類およびその材質

現存する焼成部下部に使用されているフランス積みの煉瓦は白みの強いオレンジ色の型枠成形の煉瓦であるのに対し、上部のオランダ積みの煉瓦は赤みの強い押出成形の煉瓦となっている。煙突部の煉瓦については、オランダ積みの部分と同様の色調の煉瓦であった。これら異なる部位に使用されている煉瓦はそれぞれに固有の力学的特性をもつと考えられる。

発掘調査で出土した6基の窯基礎については前述のボンディングパターンの変化に伴い、2~4号窯までは1号窯と同様の白みの強いオレンジ色の型枠成形の煉瓦であり、5および6号窯は下部の数段に平面の少しくぼんだプレス成形の煉瓦をオランダ積みで組積し、その上に1~4号窯の下部に使用されているものより若干濃いオレンジ色の煉瓦がオランダ積みで組積されていることが明らかになっている。7号窯の煉瓦はやや赤みの強いオレンジ色の煉瓦が使用されている¹⁾。

4) 煉瓦および目地寸法調査

① 扇形煉瓦の外周円弧長

扇形煉瓦の外周円弧長については周長を測定した段における煉瓦の幅を測定した。また、それぞれの場合において目地幅もあわせて測定した。図7は各段における外周円弧長の実寸法の、平均値と標準偏差および変動係数の推移を表したものである。扇形煉瓦の外周円弧長の平均値は全体で138.7mmであった。各段の平均値にはかなりの差があるが、煙突の中間部の寸法が大きく、最上部・最下部にいくにつれて小さくなると

表3 煉瓦の高さ

調査箇所	平均値(mm)	標準偏差 (mm)	変動係数(%)
東	57.79	1.51	2.62
西	57.47	2.03	3.54
南	57.21	1.51	2.65
北	57.59	1.48	2.57

表4 水平目地幅

調査箇所	平均値(mm)	標準偏差 (mm)	変動係数(%)
東	10.41	2.08	19.94
西	10.25	2.59	25.27
南	9.74	3.01	30.90
北	9.56	2.61	27.28

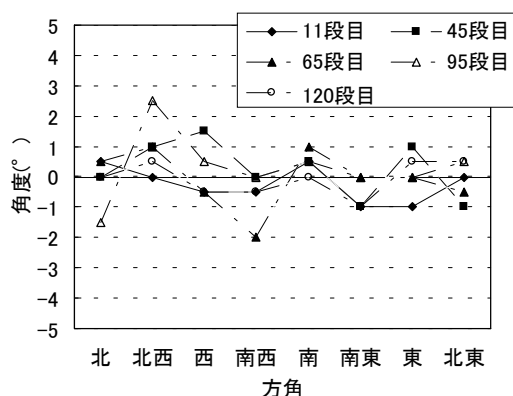


図8 各段における煉瓦上面の傾斜角度の比較

いう傾向が見られる。円筒部の第1~40段およびテーパ部の第140段~160段は他の部分と比べて寸法のばらつきが大きいこれは熱膨張による損傷であると考えられる。また、第40段~100段および第100段~140段の間はばらつきが少ない。それぞれの場所に使われている煉瓦の個数を換算するとどちらも1300個程度でほぼ同じであることから、煉瓦が2~3バッチに分けて生産されていたことを表していると考えられる。

②煉瓦の高さ

表3に示すように、煉瓦の高さは東西南北ともほぼ同じ寸法であり、約57mm程度のものが使用されていることが分かった。標準偏差・変動係数ともに小さく、精度が良いという事が分かった。

③垂直目地および水平目地

図8は垂直目地幅について同様に統計を取ったものである。垂直目地幅の平均値は頂上に近づくにつれ大きくなるという傾向が見られた。また標準偏差・変動係数については、円筒部の第1段~30段およびテーパ部の第130段~150段付近にかなりのばらつきがあることが分かる。これは施工後に目地がひび割れるなどの破損を受けたことを明確に表している。水平目地幅は表4に示すように、東西南北とも9~10mmであったが、東西面のほうが南北面よりも目地幅が大きいという結果になった。

5) 煙突部煉瓦上面の傾斜角度

煉瓦上面の傾斜を8方向について測定した結果を、図8に示す。全体的にそれほど大きな傾きはなかったが、所々局部的な凹凸があり、2度以上傾いている場所が発見された。

6) 劣化状態調査

A. 損傷

①煉瓦の凍害、剥落

凍害は煙突部全体に見られる。中でも特に、写真4に示すような、テーパー部にある凸部の下段の煉瓦にはひどくその現象が見られる。補強鋼製バンドの取り付けられている段の下の煉瓦については、さらにその現象がひどく、写真5に示すように煉瓦表層部が大きく剥落している箇所が発見された。

②目地のひび割れ

写真6に示すように、目地のひび割れは、南面の円筒部に最も多い。特に、バンドとバンドの間の部分に顕著に見られる。熱膨張によって目地が広がり、それを鋼製バンドが締付けることで破壊するという過程を繰り返していたと考えられる。

B. 汚染

円筒部、およびテーパー部の南面、西面の外表面には写真7に示すような黒い付着物が確認された。煉瓦が凍害を受けた後、その上に一面に付着していた。この物質は黒色で、円筒部には全面に付着しており、テーパー部については南・西面に多く、北・東面に少なかった。このような汚染を一度うけた後、さらに凍害を受け、その上に再び汚染を受けている箇所も発見された。この汚染は幾度にも重ねられているのではないかと考えられる。

この付着物が何かについては不明である。

C. その他

目地部分には所々雑草が生えている箇所や、蟻の巣ができている箇所が発見され、内部にはひび割れを生じていた。また、北面には写真8に示すように目地部および煉瓦表面に苔が生えていた。

4. 各窯基礎に使用されている煉瓦単体および組積体の材質に関する実験

2000(平成12)年10月に行われた周辺発掘調査では様々な色や形状の煉瓦や、煉瓦が組積されたままの大きな塊が出土した。これらの煉瓦を材質によって分類し、それぞれの吸水率および密度を測定し、さらに

力学的特性を明らかにするため一軸圧縮試験を行うこととした。

4. 1 煉瓦単体の吸水率および密度の測定

1) 実験概要

試験体は、煉瓦の数が限られており貴重なため、各種煉瓦を圧縮実験に使用できる大きさに加工したものを使用した。煉瓦の加工終了後、一度吸水・乾燥を行い、気乾状態に戻すことによって状態を安定させ、その後の吸水率測定および密度の測定を行った。測定項目は24時間静水質量吸水率、密度(絶乾、気乾、表乾)とした。

2) 試験体

本実験に使用する試験体は前述のように、発掘調査で出土した煉瓦からダイヤモンドカッターで切断・加工した試験体を用いた。試験体は全て、高さと底辺の



写真1 円筒部の
ボンディングパターン



写真2 テーパー部の
ボンディングパターン



写真3 円筒部からテーパー部にかけてのボンディングパターン



写真4 凸部下段の凍害
(北西側上から99段目)



写真5 凸部の剥落
(西側上から87段目)



写真6 目地のひび割れ
(南東側円筒部)



写真7 外表面の付着物
(南西側101段目)



写真8 目地部分に生えた苔
(北側149段目付近)

比が2.0となる直方体(約3.0×3.0×6.0cm)に整形した。

煉瓦の種類からA～Cのシリーズに分けた。

A：創業当時の煉瓦(明治16年製造；型枠成形、1種類)・・・1～4号窯下部に使用

B：ハンター煉瓦(明治21年製造；プレス成形、1種類)・・・5および6号窯下部に使用

C：A,Bに属さない煉瓦(明治25年頃製造；押出成形、5種類)・・・改造・増設時に使用されたと考えられる煉瓦^{注3)}

3) 実験方法

気乾状態の試験体の質量を測定し気乾質量とした。次に105°Cの乾燥機内で24時間乾燥させ、24時間経過後デシケーター内で自然冷却した。このときの質量を測定し絶乾質量とした。次に20°Cの静水中に試験体を24時間浸漬し、24時間経過後、試験体表面の水分を拭き取り質量を測定した。さらに試験体を水中に浸漬し質量が安定した時点で取り出し水分を拭いて質量を測定した。このときの質量を表乾質量とした。また、密度計算のために表乾状態の試験体の水中質量を測定した。なお、密度の計算には以下の式(1)(2)(3)(4)を使用した。

$$\text{質量吸水率(静水)} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \cdots (1)$$

$$\text{絶乾密度} = \frac{W_1}{W_5 - W_3} \cdots (2)$$

$$\text{気乾密度} = \frac{W_2}{W_5 - W_3} \cdots (3)$$

$$\text{表乾密度} = \frac{W_3}{W_5 - W_3} \cdots (4)$$

W_1 ：絶乾質量， W_2 ：気乾質量， W_3 ：水中質量，

W_3 ：24時間吸水後の質量， W_5 ：表乾質量

4) 実験結果

実験結果を表5に示す。シリーズAは吸水率が14～16%と高く、密度も絶乾状態で1.75 g/cm³程度であった。創業当時の煉瓦製造の苦心がうかがわれる。

シリーズBは吸水率が10～14%とややばらつきが大きい。密度も同様にばらつきが大きく絶乾状態で低いものは1.8 g/cm³程度、高いもので2.0 g/cm³程度となった。製造期はシリーズAのものより6年ほど後のものであり、煉瓦の品質としては若干ではあるが上昇していることがうかがわれる。

シリーズCは煉瓦それぞれによって結果が異なり、C-3およびC-5については吸水率が11%程度と他のものより低い結果となった。密度は全体的に絶乾状態で1.8 g/cm³程度となった。C-2は明治22年に操業

した5および6号窯に使用されている煉瓦であると考えられ、シリーズAの頃のものと比較すると品質の向上がみられる。以上のように窯の各部分に使用されている煉瓦には製造された年代、成形方法によってその品質に傾向があり、製造技術の習熟度の高まりが見られる結果となった。

4. 2 煉瓦単体および組積体の圧縮実験

1) 実験概要

本実験では煉瓦単体(ユニット)、組積体(プリズム)それぞれについて圧縮実験を行い、応力ひずみ関係とヤング係数、ポアソン比等を検討した。

実験では煉瓦の圧縮強度Fは次の式(5)から求めた。

$$F = P_{\max} / A \cdots (5)$$

ここで、 P_{\max} ：最大荷重(kg)、A：断面積(cm²)

ヤング係数E、およびポアソン比 ν は次の式(6)および(7)から求めた。

$$E = \sigma_{1/3} / \varepsilon_{1/3} \cdots (6)$$

ここで、 $\sigma_{1/3}$ ：最大強度の1/3における一軸応力

$\varepsilon_{1/3}$ ： $\sigma = \sigma_{1/3}$ の時の一軸ひずみ

$$\nu = \varepsilon_{2(3)} / \varepsilon_1 \cdots (7)$$

ここで、 ε_1 ：一軸ひずみ、

$\varepsilon_{2(3)}$ ：二軸(三軸)ひずみ

2) 試験体

① ユニット

4. 1の2)に示す試験体を使用した。

② プリズム

ユニットのシリーズA(創業当時の煉瓦)から成る煉瓦塊から切出した試験体を用いた。寸法は10.0×10.0×20.0cmで、横目地を2カ所含む、3段積み組積体である。

表5 煉瓦単体の吸水率および密度測定結果

	24時間静水 吸水率(%)	絶乾密度 (g/cm ³)	気乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)
A-1	14.6	1.75	1.76	2.04
A-2	13.2	1.76	1.76	2.02
A-3	16.1	1.76	1.76	2.06
B-1	13.4	1.91	1.92	2.19
B-2	10.3	2.02	2.02	2.24
B-3	14.4	1.88	1.88	2.16
C-1	13.2	1.83	1.83	2.10
C-2	12.7	1.76	1.76	2.01
C-3	11.1	1.88	1.88	2.11
C-4	12.2	1.81	1.82	2.06
C-5	11.4	1.86	1.86	2.09

3) 実験方法

① ユニット

20 t 容量の油圧式アムスラーを用いた。試験体は上下2面をα石膏でキャッピングし、図9に示すように鉛直・水平方向それぞれ2枚のひずみゲージを相対する2面に貼った。また、変形特性は、単体の応力ひずみ曲線、破壊時の最大ひずみ、および弾性係数等から求めた。

② プリズム

100 t 容量の油圧式アムスラーを用いた。試験体には、ユニット同様にキャッピングを行い、図9に示すように相対する2面の中段の煉瓦にひずみゲージを2枚ずつ、計4枚貼った。組積体の試験では、これに加え、2本の変位計を相対する2面に用い、偏心を緩和できるように工夫した。また、組積体としてのプリズムの変形性状を観察するために、写真9に示すように鋼製の治具を作成し、それに変位計を取り付け測定した。

4) 実験結果

① ユニット

圧縮試験から得られる情報として σ_1 と ϵ_v との関係における、破壊が始まる点と考えられる比例限界、崩壊開始点と考えられる変曲点を図10に、実験結果および各ユニットの応力ひずみ曲線をそれぞれ表6、図11に示す。表6のヤング係数 E_u 、ポアソン比 ν については、最大応力度の1/3における割線弾性係数とした。図3において、 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_v はそれぞれ一軸ひずみ、二軸ひずみ、体積ひずみを示す。全体的には圧縮強度が約10~30MPaと、一部、現代使われている煉瓦と同等の強度を持つものがあつた。一軸応力と一軸ひずみの関係は初期においてはほぼ直線となり、二軸ひずみには個々のユニットの製造年代および製造方法によって相違があつた。

・シリーズA

本実験で用いた試験体の中で最も年代の古い、創業当時の煉瓦3体について調査した。その結果の範囲は、圧縮強度13.95~25.76MPa、ヤング係数2.85~7.64GPa、ポアソン比0.01~0.07となった。破壊の状態は、A-1、2ではカット面に対して斜めにひび割れが入る、典型的な破壊であつた。A-3については他のものに比べひび割れ、剥離ともに多く見られ、また、最大強度が1、2よりも非常に弱く、荷重初期におけるポアソン比が極めて小さい、という結果が得られた。

・シリーズB

試験結果から圧縮強度13.61~21.96MPa、ヤング

係数2.05~6.54GPa、ポアソン比0.0034~0.07という値が得られた。破壊状態は3体全て典型的なものであつたが、B-1では剥落が多く見られ、最大強度は13.61MPaと他の試験体より小さく、最大ひずみは一軸、二軸共に非常に大きかつた。また、B-1はポアソン比が0.0034という非常に小さい値をとつた。

・シリーズC

シリーズCの試験はシリーズA、Bに属さない、押出成形によって製造された、比較的年代が新しく、製造時期の異なる5種類の煉瓦について行った。その結果、圧縮強度は10.69~29.93MPa、ヤング係数は3.89~9.94GPa、ポアソン比は0.02~0.23であつた。全体的に

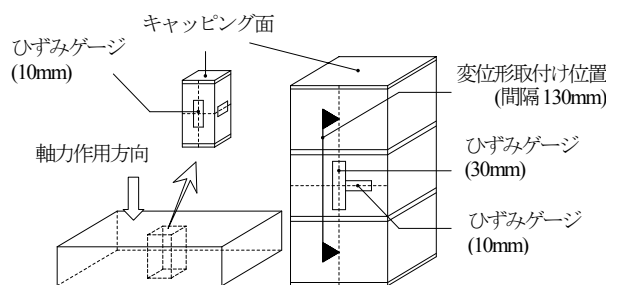


図9 ユニット、プリズムの一軸圧縮試験体

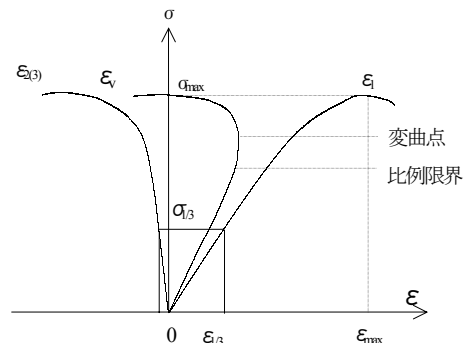


図10 応力ひずみ曲線の例

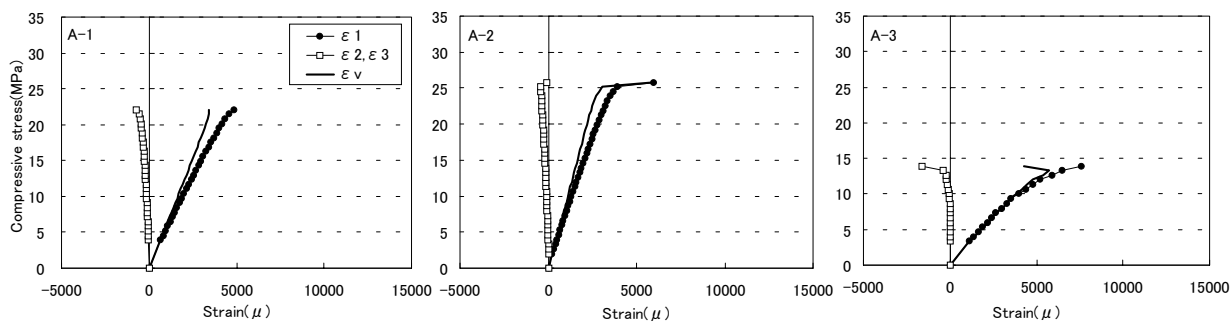
表6 単体実験結果

	F_u (MPa)	E_u (GPa)	ν	変曲点 (MPa)	比例限界 (MPa)	最大ひずみ ($\times 10^{-6}$)
A-1	22.09	5.15	0.06	21.44	21.44	4846.5
A-2	25.76	7.64	0.07	25.20	22.55	5974.5
A-3	13.95	2.85	0.01	13.33	8.67	7582.5
B-1	13.61	2.05	0.0034	7.56	4.54	11927.5
B-2	21.14	6.48	0.03	18.84	10.57	4502.5
B-3	21.96	6.54	0.07	19.19	17.68	6272.5
C-1	10.69	3.89	0.02	10.05	2.69	3148.5
C-2	29.81	9.94	0.08	25.46	16.20	7484.0
C-3	24.56	9.69	0.23	15.63	9.38	2639.5
C-4	21.61	5.83	0.14	14.89	10.51	3941.5
C-5	29.93	6.41	0.16	19.99	12.18	4990.5

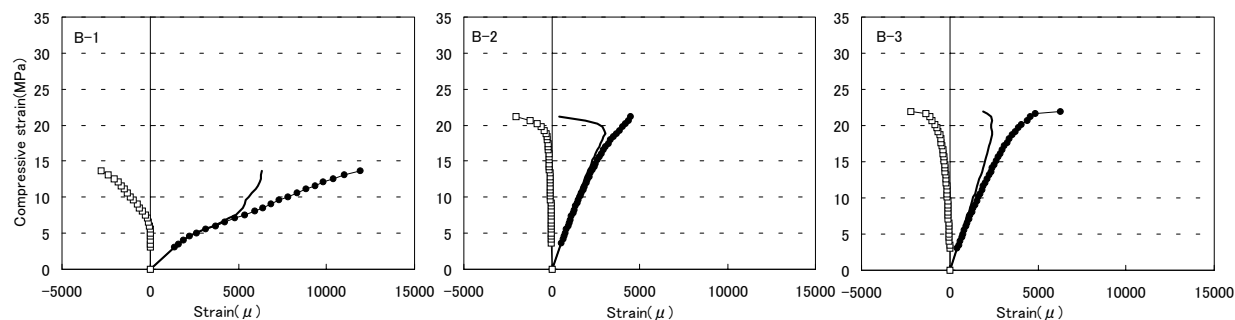
表7 プリズム実験結果

	F_m (MPa)	E_m (GPa)	ν	変曲点 (MPa)	比例限界 (MPa)	最大ひずみ ($\times 10^{-6}$)
P-1	14.00	6.14	0.13	8.50	3.50	5138.5
P-2	8.75	4.44	0.13	3.50	3.15	2646.2
P-3	12.60	9.06	0.03	10.50	4.50	2807.7

シリーズA(型枠成形)



シリーズB(プレス成形)



シリーズC(押出成形)

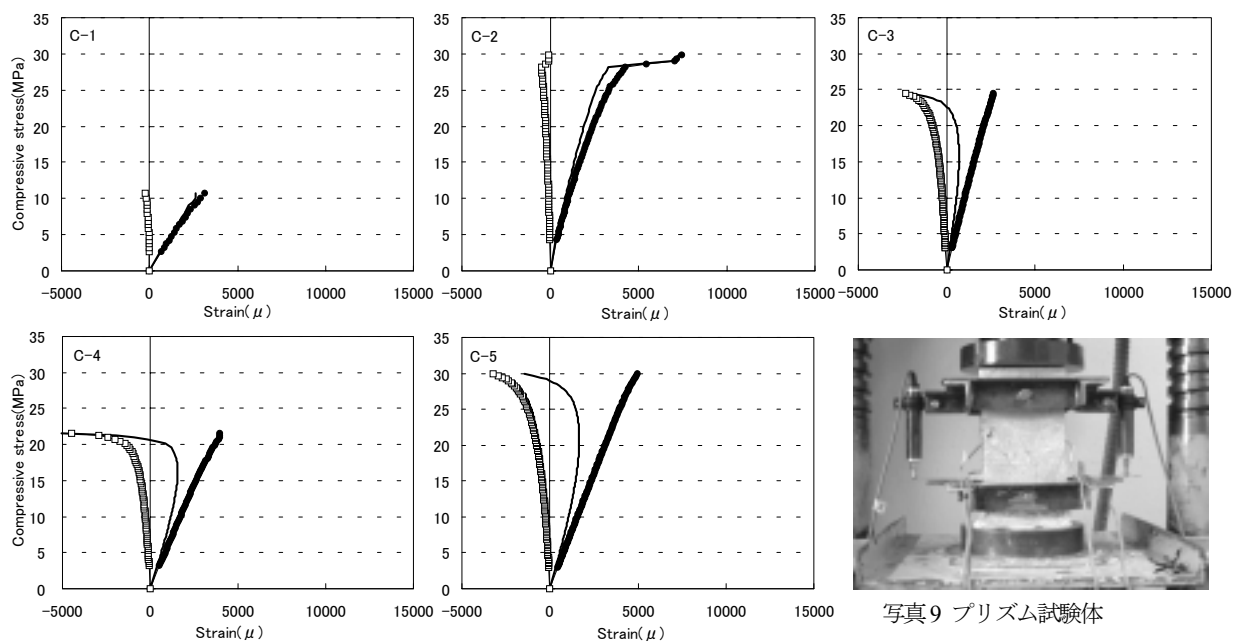


図11 ユニットの応力ひずみ曲線

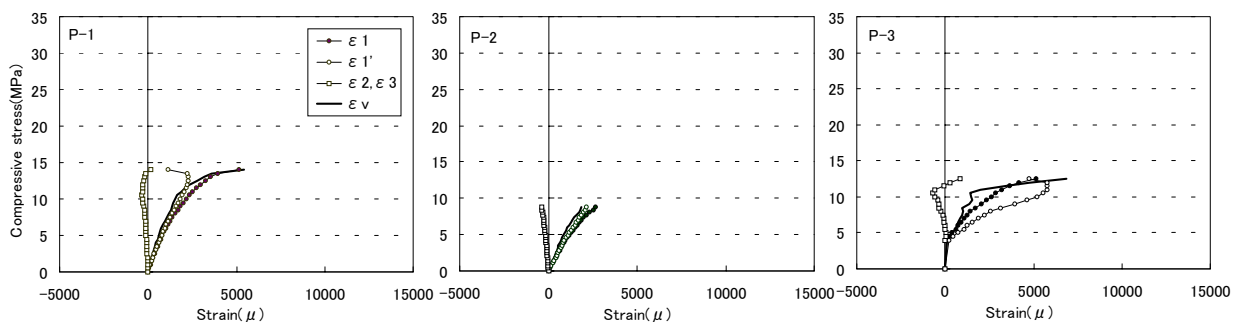


図12 プリズムの応力ひずみ曲線

高強度ではあるが、C-1のみが11体全ての試験体の中で最も弱い圧縮強度を示した。C-1については破壊状態も他の試験体に比べ、ひび割れが多く、剥落部分も大きかった。また、荷重初期のポアソン比が小さいという、シリーズA、Bでも見られた傾向がシリーズCにおいてもあてはまった。また、最大強度は同程度でもポアソン比に大小の差がある煉瓦ユニットも見られた。これは、煉瓦の製造段階における押出方向が関係すると考えられる。

② プリズム

ユニットと同様にプリズム試験の結果を表7、図12に示す。プリズム試験体は創業当時の煉瓦が3段に組積されたものに前述の機器を装着して用いた。図12において、 ϵ_1 は変位計、 ϵ_1' は一軸ひずみゲージによる応力ひずみ曲線を表している。実験結果の範囲は圧縮強度が8.75~14.00MPa、ヤング係数4.44~9.06GPa、ポアソン比0.03~0.13となった。

破壊状態はユニットとは異なり、ある強度に達するとひび割れと共に音をたてて崩壊した。その結果、P-2については予想よりも最大強度が小さく、かつ比例限界、変曲点も小さい値をとった。これも一部のユニットに見られた傾向と同様のもので、プリズムの内部または目地に欠陥があったと考えられる。また、P-3の応力ひずみ曲線は曲折したものとなった。

5) 考察

① 試験体に関する考察

本実験で用いた煉瓦には、各時期のものに内部欠陥

のあるものが見られた。図11のグラフで、A-3、B-1、C-1のように二軸ひずみが荷重の初期段階でy軸に重なるようになってきているものがある。このような煉瓦では最大強度が極端に小さく、荷重初期のポアソン比が低い。このことは、煉瓦の内部に潜在的に空隙が存在し、荷重の加わる初期ではこの空隙が満たされるだけで横には広がらない、ということで説明できる。このような煉瓦自体の欠陥は、ユニット、プリズムの強度に大きく影響することが分かった。図11において比較的正常な軌道を描いた、内部欠陥がないと考えられる煉瓦は、明治時代のものとしてはひずみが非常に大きかった。最大ひずみがシリーズAで6000~8000 μ 、シリーズBで4000~6000 μ 、シリーズCでは3000~6000 μ と、一般的なコンクリートの最大ひずみが2000 μ 程度であることを考慮しても、大変粘りのある特性が明らかとなった。以下は、欠陥がないと考えられる煉瓦について考察を進める。

② 一軸ひずみとポアソン比

図13、14にユニット、プリズムの一軸ひずみとポアソン比の関係を示す。一部の試験体を除いて、ポアソン比は一軸ひずみが小さい範囲で一定、その後上昇している。この上昇が破壊現象を表している。C-2、P-1のように右下がりのグラフは主にゲージのない部分でひび割れたと考えられる。

③ ヤング係数とポアソン比

ユニット試験から得た、最大応力度の1/3におけるヤング係数およびポアソン比を図15、16に示す。図

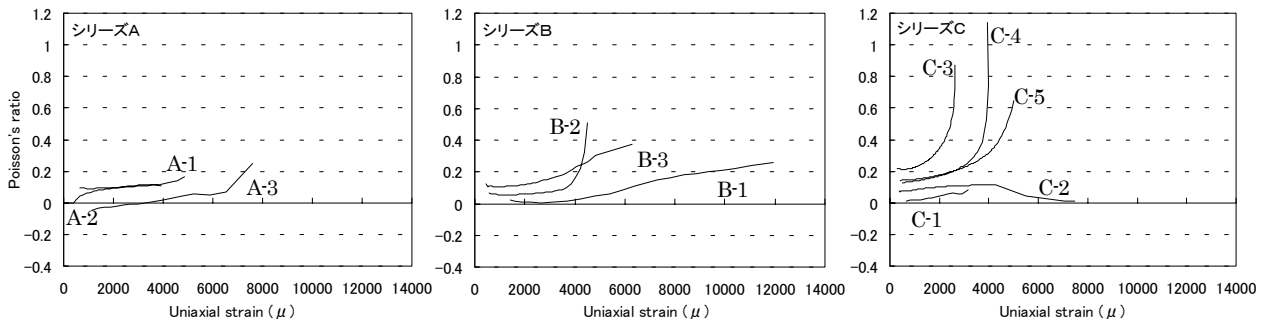


図13 ユニットの二軸ひずみとポアソン比との関係

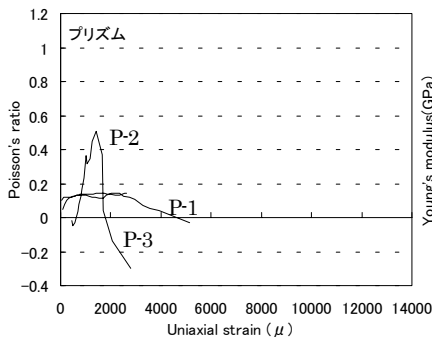


図14 プリズムの一軸ひずみとポアソン比との関係

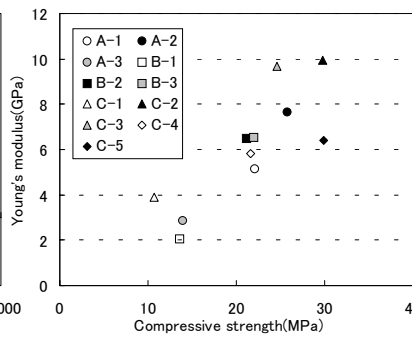


図15 ユニットの圧縮強度とヤング係数との関係

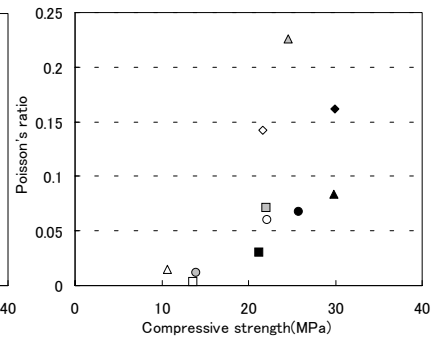


図16 ユニットの圧縮強度とポアソン比との関係

15 から、ユニットのヤング係数のデータは、既往の研究³⁾の通り、概ね直線的に並んだ。図 16 において、圧縮強度が 20~30MPa の範囲でポアソン比は 0.03~0.23 まで変動する。これは煉瓦の異方性によるものだと考えられる。このポアソン比における差は、一軸方向が押出方向に対して直行する方向において、ポアソン比が小さいものは押出方向に平行に、大きいものは押出方向に鉛直に測定用の二軸ひずみゲージを貼ったことによると考えられる。これらの異方性の結果を総合的に考察すると、当時の押出成形は小口を断面とする方向で実施されていたと判明した。

④ プリズム

組積造の評価尺度としての組積係数について考える。組積係数 e は次の式(8)から求める。

$$e = F_m / F_u \quad \cdots (8)$$

ここで、 F_m :プリズムの圧縮強度(MPa)

F_u :ユニットの圧縮強度(MPa)

シリーズ A とプリズムの試験結果から、組積係数は 0.49~0.63 となった。これは、通常の組積係数 0.5 を大部分超えておりユニットは組積状態で必要な強度を満たしている。

5. まとめ

今回の調査では、煙突部の周長を細かく測定することでテーパ一部分の形状を把握するとともに煙突部に使用されている扇形煉瓦の寸法を知ることができた。また、接触方式で調査することにより煙突部に生じている様々な劣化現象も把握することができた。特に、3種類の補強鉄骨バンド、煉瓦や目地の状態から、窯の使用時に何度も補修の手が加えられていたということが明らかになったことは大きな収穫であった。また、煉瓦単体および組積体の圧縮実験によって次のことが明らかとなった。

- 1) 明治 10~20 年代の煉瓦の粘り強い力学特性が明らかとなった。
- 2) 一部、製造欠陥による強度低下が見られ、当時の製造技術が安定していなかったことが分かった。
- 3) プリズムの組積係数は十分であり、組積造構造物として必要な強度を持つことが分かった。
- 4) 以上から、小野田徳利窯保存調査の補修・補強に必要な諸々の力学特性が明確となった。

現在、徳利窯本体の目地のひび割れ、補強鋼製バンドの交換、煉瓦壁表面への撥水材の塗布などの補修が施され、さらに今後の保存対策として焼成部保護のための上屋が設置されている。

今後は、これまで行なわれてきた一連の調査、実験からこれらの結果をもとにした補修および補強、さらには屋根設置工事までの一連の保存活動を整理し、更なる徳利窯の利用計画の提案を行っていきたいと考える。

謝辞

本研究の実施に当って、保存調査の御指導をいただいた沢田正昭奈良国立文化財研究所センター長、中村徹也山口県埋蔵文化財センター長に深く謝意を表します。さらに、保存調査委員会の実施・運営に御協力いただいた山口県、小野田市の文化財課の方々および太平洋セメント株式会社小野田工場の方々にも深く感謝いたします。

注

- 注 1) 現存する徳利窯の焼成部および周辺に出土した 6 基の窯基礎における煉瓦および目地寸法測定調査の結果は小野田徳利窯の建設年代の推定に関する研究¹⁾で発表している。
- 注 2) 煉瓦の個数の推定に当っては以下のような計算を行った。まず、寸法測定の結果から煙突部および焼成部の体積を計算する。次に各部分において測定した煉瓦および目地の寸法から煉瓦と目地を合わせたユニットモジュールを導き出し、1 ユニット当りの単位体積を計算する。この単位体積の計算は煙突部、焼成部それぞれにおいて計算する。全体の体積における単位体積の割合から窯全体に使用されている煉瓦の個数を算出した。
- 注 3) C-2 については明治 21 年頃に製造され、5 および 6 号窯増設時に使用されたものと考えられ、型枠成形のものと考えられる。

参考文献

- 1) 河原利江, 馬場明生, 台信富寿, 静村貴文:「小野田徳利窯の建設年代の推定に関する研究」, 山口大学工学部研究報告, Vol.53, No.1, 2002 年 10 月 pp.33~44
- 2) 井田幸治編著:「小野田セメント創業五十年史」, p.78, 昭和 6 年 5 月 3 日
- 3) Akio BABA, Osamu SENBU, Mitsuyoshi WATANABE and Yasuyuki MATSUSHIMA, MECHANICAL PROPERTIES OF MASONRY UNITS AND TEST METHODS FOR DETERMINING COMPRESSIVE STRENGTH, Building Research Institute Ministry of Construction December, 1985, pp.1~51

(平成 15 年 8 月 29 日受理)