

煉瓦目地のせん断試験方法および破壊基準に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SHEARING TEST METHOD
AND CONSTITUTIVE LAW OF BRICK JOINT

中 浜 貴 生*, 畑 中 重 光**, 三 島 直 生***

Takao NAKAHAMA, Shigemitsu HATANAKA and Naoki MISHIMA

Main purpose of the present study is to propose a failure criterion for the brick structural element under combined stresses of normal and shear. Firstly, a series of experiments was carried out in which experimental factors include the method of shearing test, strength of mortar, angle of joint, and normal stress applied. Failure pattern observed in the most specimens was the interface failure occurred between a brick and jointing mortar, while two failure patterns are possible the interface failure and the jointing mortar failure. Next, based on the experimental data, a simple failure criterion formula was proposed in which both of the two types of failure patters can be considered.

Keywords : Brick, Mortar, Joint, Single Shearing Test, Double Shearing Test, Failure Criteria, Cultural Asset

煉瓦, モルタル, 目地, 一面せん断試験, 二面せん断試験, 破壊基準, 文化財

1. はじめに

近年、明治から大正にかけて建てられた煉瓦建築物の多くは、これらの歴史的価値から重要文化財として保存することが求められている。重要文化財などの耐震性を評価する基準としては、重要文化財（建造物）耐震診断指針¹⁾があるものの、同指針は純木造を対象としたものであり、煉瓦建築物の耐震診断方法までは記述されていない。このため有識者により、個々のケースに応じて歴史的煉瓦建築物などの耐震診断が実施されているのが現状である。各歴史的煉瓦建築物の保存修理工事報告書など^{2)~13)}の調査によれば、「鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針同解説」¹⁴⁾の一次診断に準じて耐震診断を行っているケースが多く、その場合、基本的には目地のせん断耐力から壁のせん断耐力を推定しており、煉瓦建築物の調査および耐震診断においては、目地のせん断強度の決定方法が重要になるといえる。

2. 煉瓦目地のせん断強度に関する既往の研究

2.1 煉瓦目地のせん断試験方法

煉瓦目地のせん断試験については、煉瓦建築物の保存調査時なども含めて比較的多くの試験が行われているが、試験方法などは統一化されていないのが現状である。表1に既往の文献で採用されている煉瓦目地の主なせん断試験方法を示す。

一面せん断試験の適用例^{15), 16), 17)}では、上部から鉛直力を載荷し

ながら水平方向にせん断力を加えるのが一般的であり、専用の載荷治具が必要になる。文献¹⁸⁾では、目地モルタルのすべり強度試験という位置づけで、目地と載荷軸のなす角度を変化させて圧縮することにより、一面せん断試験を行っている。

適用例が多いのは、二面せん断試験であるが、軸力を載荷しない試験例^{6), 7), 9)~12), 19)~22)}と軸力を載荷した試験例^{23), 24), 25)}の2種類があり、載荷しない事例のほうが多い。通常、煉瓦建築物の水平目地にせん断力が加わる場合には軸力がかかっているため、軸力を載荷しない場合は、結果としては安全側の評価となるものの、実際の煉瓦建築物のせん断耐力とは異なると考えられる。一方、実際の条件に近いものとなる軸力を載荷する場合には、それ専用の載荷治具が必要になる。さらに、軸力の有無に関わらず、目地幅に応じてせん断面に曲げモーメントが発生するために応力状態が不明確である。軸力を変化させて試験を行う際には軸力の水準数だけ試験体数が増えるため、標準試験としてそのまま採用するには問題がある。

壁体のせん断試験については、軸力を載荷しながらせん断力を加える試験^{29), 30), 31)}と、対角線圧縮加力試験^{26)~29)}の例とがあるが、実大試験となると加力装置が大きく、装置の設置が困難で費用もかかり、実際の建築物からの試験体採取も容易とは言えないため、調査および診断の際にはあまり現実的ではない。

以上のように、煉瓦構造体の力学特性を把握するための試験のうち、せん断強度の評価試験に関しては、必ずしも充分に確立されて

(本論文は文献38), 39)を取りまとめ、加筆・修正したものである。)

* 四日市市 工修

** 三重大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 三重大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

Yokkaichi City, M. Eng.

Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

Assist. Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

表 1 既往の文献で採用されている煉瓦目地のせん断試験方法

	一面せん断試験	一面せん断試験 (試験体に角度を付けた圧縮試験)	二面せん断試験 (軸力載荷なし)	二面せん断試験 (軸力載荷あり)	壁体せん断試験 (軸力載荷)	壁体せん断試験 (対角線圧縮加力試験)
文献 No.	15), 16), 17)	18)	6), 7), 9), 10), 11), 12), 19), 20), 21), 22)	13), 17), 25)	29), 30), 31)	26), 27), 28), 29)
試験概要図						

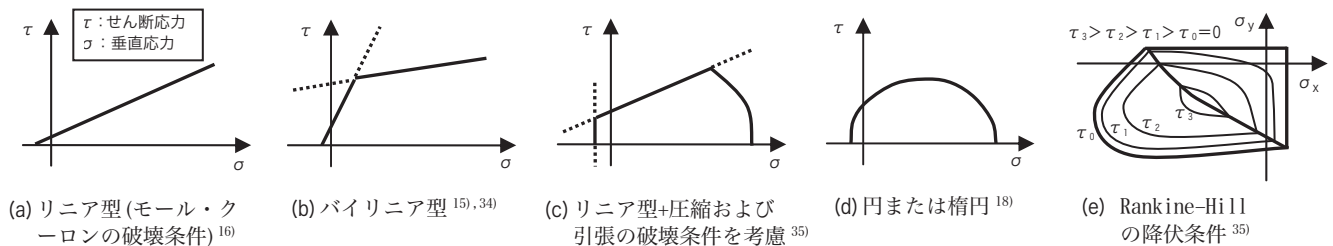


図 1 既往の研究に見られる煉瓦構造要素の破壊基準の形式

いるとは言えない。

2.2 煉瓦目地のせん断破壊基準

煉瓦構造体は、煉瓦と目地の複合体であるため、コンクリートのような連続体と仮定できる材料と比べて、煉瓦と目地の境界部分などの施工時における品質のばらつきも大きいと考えられる。このため、耐震診断の際など、コア採取による試験によってある程度の妥当性のあるデータを得るためには、試験体数を相当数に増やす必要がある。しかし、既存構造物から多数の試験体を採用するのは現実的でなく、また、せん断強度特性の直接測定には特殊な処理および荷重治具が必要となる。そのため、これらの問題を軽減する現実的な対策としては、比較的測定が容易な物理量から一般的なせん断強度特性を推定する手法の確立が有効であると考えられる。また、このとき、建物の階数が異なる場合などのように垂直応力 σ が異なる条件についても評価できるようにするためには、単にある荷重条件でのせん断強度としてではなく、必要な範囲の応力状態(主として、垂直応力の変動)をカバーした破壊基準としてせん断強度特性が得られる必要がある。

(1) 既往のせん断破壊基準

図 1 に、既往の研究において採用されている煉瓦構造要素に対するせん断破壊基準の主な形式を示す。

最も簡単なものとしては、モール・クーロンの破壊基準をそのまま適用して線形近似したものがある[図(a)参照]¹⁶⁾。ただし、煉瓦目地の破壊時のせん断応力 τ -垂直応力 σ 関係は、一般に $\sigma=2\sim 5$ N/mm²を超える範囲で勾配が低下する特徴^{15), 34)}があり、モール・クーロンの破壊基準を直接適用できるのはこれ以下の σ の小さい領域に限られる。一方、高 σ 領域まで表現できるものとして、バイリニアで近似した例^{15), 34)}[図(b)参照]が報告されている。ただしこの場合、2 直線を決定するために必要な係数が多くなるという欠点がある。また、引張および圧縮破壊の条件をモール・クーロンの破壊基

準に加えたもの[図(c)参照]³⁵⁾や、これらを 1 本の曲線として近似するために円や楕円として近似したもの[図(d)参照]¹⁸⁾もある。前者は係数が多くなること、後者は σ の範囲により精度が大幅に低下する恐れがあることなどが問題として挙げられる。さらに、応力状態を 2 軸に拡張したもの(Rankine-Hill の降伏条件[図(e)参照])も提案されている³⁵⁾。同基準は、広範囲な応力状態に適用が可能で、数値解析などに用いるモデルとして有効であるが、やはり各種係数の決定が困難である³⁶⁾という問題が残る。

以上の様な破壊基準は、現状では、各係数を得るためにせん断試験を実施する必要があるものが殆どである。今後は定量化に要する試験体数が少なく、かつ構成要素の特徴(目地モルタル強度など)を容易に考慮できる実用的な破壊基準の推定手法が望まれる。

煉瓦目地の破壊時の τ - σ 関係の推定式として、具体的に構成要素の特徴を考慮した提案式は多くないが、例えば、T. Paulay ら³⁷⁾は目地モルタルの圧縮強度を用いた次式を提案している。

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma \quad (1)$$

一般的な係数の値： $\tau_0=0.04 F_c$ 、 $\mu=0.5$

一般的な係数の存在範囲： $0.1 < \tau_0 < 1.5$ 、 $0.3 < \mu < 1.2$

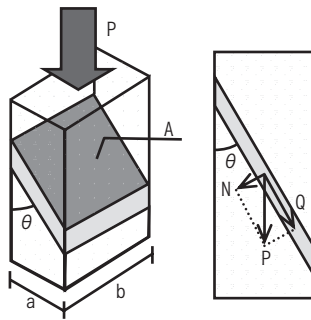
ここに、 F_c ：目地モルタルの一軸圧縮強度(MPa)

σ ：垂直応力(MPa)

上式は比較的低 σ 領域に対するものであり、通常時の煉瓦構造物に加わる σ の範囲を想定したものとなっていると考えられるが、地震時にはさらに大きな σ が加わることも予想され、その際には前述のように推定精度が低くなると考えられる。

(2) 試験体のせん断破壊モードについて

図 1 に示した破壊基準は、実験結果に基づきそれぞれ定量化されているが、その際の試験体の破壊性状は、おおよそ以下の通りであ

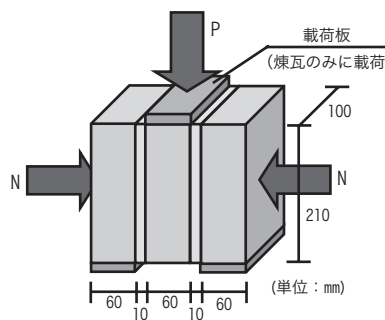


(a) 試験体および荷重方法

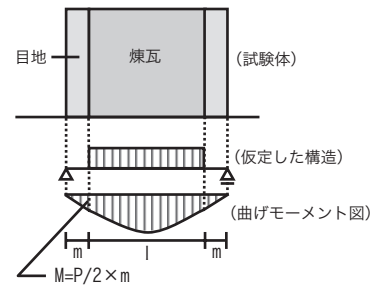
$Q = P \cos \theta$ $N = P \sin \theta$ $A = a \cdot b / \sin \theta$ $\tau = Q / A$ $\sigma = N / A$	P : 荷重 (N) Q : せん断力 (N) N : 垂直力 (N) A : せん断面積 (mm ²) τ : せん断応力 (N/mm ²) σ : 垂直応力 (N/mm ²) θ : 目地角度
---	---

(b) 各応力の計算方法

図2 一面せん断試験の概要



(a) 試験体および荷重方法



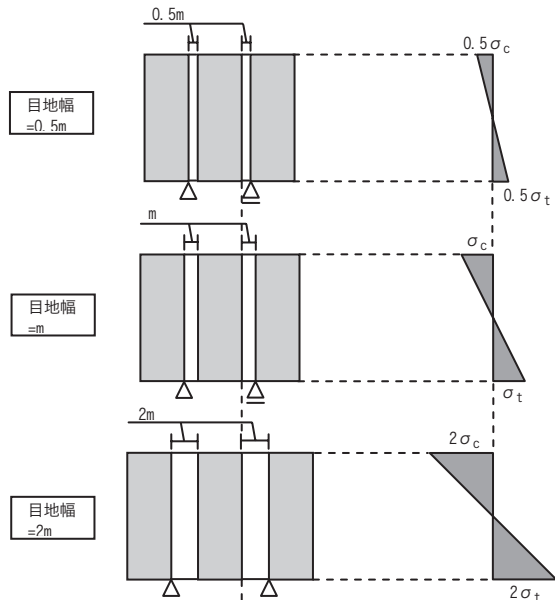
(b) 断面に働く曲げモーメントの算出方法

σ_c σ_t τ_m	$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} y$ $\tau = \frac{Q \cdot S_y}{b \cdot I}$	M : 曲げモーメント (N・mm) N : 軸力 (N) P : 荷重 (N) σ : 垂直応力 (N/mm ²) τ : せん断応力 (N/mm ²) A : せん断面積 (mm ²) I : 断面 2 次モーメント (mm ⁴) S_y : y より外側の部分の断面 1 次モーメント (mm ³)
--------------------------------------	--	---

τ_m : モーメントを考慮した場合のせん断応力 (N/mm²)
 σ_c : 圧縮側垂直応力 (N/mm²)
 σ_t : 引張側垂直応力 (N/mm²)

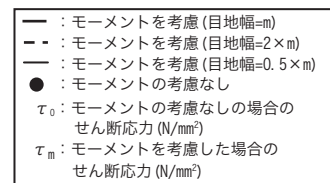
(c) 各応力の計算方法

図3 二面せん断試験の概要



(a) 各目地幅の仮定

(b) 各目地端 A の垂直応力分布 (σ_c, σ_t : 目地幅 m のときの圧縮側・引張側垂直応力)



(c) 断面 A におけるせん断応力分布の比較

図4 目地幅が異なる場合の二面せん断試験時における断面内の応力状態

った。

文献¹⁵⁾では、新規製作と既存壁の切出しの2種類の試験体について実験が行われており、新規製作の試験体は目地モルタル内部が破壊し、既存壁の切出し試験体は目地と煉瓦との界面で破壊している。文献¹⁶⁾では、3種類の目地について実験が行われており、セメント目地および石灰セメント目地の場合には、目地と煉瓦との界面で破壊し、石灰目地の場合には、目地が破壊している。文献¹⁸⁾では、載荷角度を変化させた一面せん断試験が行われ(前述の2.1参照)、全ての試験体が目地と煉瓦との界面で破壊している。以上のように各文献で、目地モルタルの仕様などによって、試験体の破壊モードに

違いが生じている。

3. 本研究の目的

前項で示したように、既往の文献では、限られた条件下での実験結果からせん断破壊基準を近似したものがあるが、破壊モードを踏まえていないことから、実験定数の汎用性には問題がある。

そこで、本研究では、歴史的煉瓦建築物の耐震診断時におけるせん断耐力の推定に資することを目的に、目地モルタルの強度特性と破壊モードから煉瓦構造体のせん断破壊基準を簡易かつ精度良く推定する手法の提案を試みる。なお、本報では、破壊部分を目地モル

表2 実験の要因と水準

要因	水準
試験方法	一面せん断試験 二面せん断試験
モルタル強度 (N/mm ²)	5, 10, 20
目地角度 (°)* ¹	15, 20, 30, 45, 90
垂直応力 (N/mm ²)* ²	0, 0.15, 0.3

[註] *¹: 一面せん断試験のみ、*²: 二面せん断試験のみ

アンダーラインは、他の要因の水準を変化させる場合の固定値

表3 モルタルの調合

設計強度 (N/mm ²)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	P
5	138	274	198	1479	248
10	114	277	243	1479	194
20	67	291	435	1479	-

[註] W/C: 水セメント比, W: 水, C: セメント, S: 砂, P: 石灰石微粉末

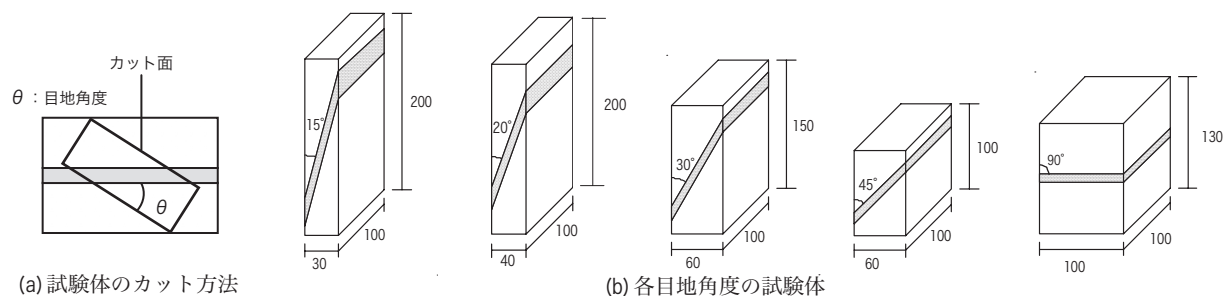
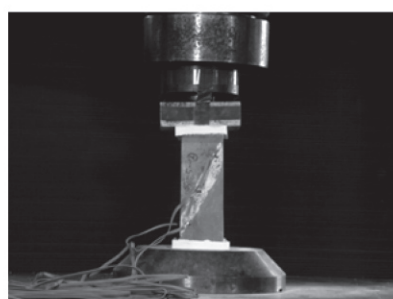
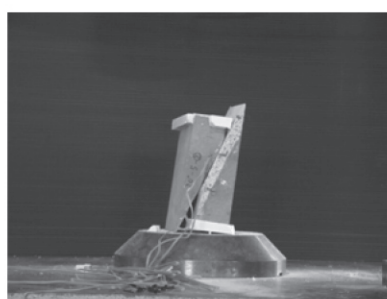


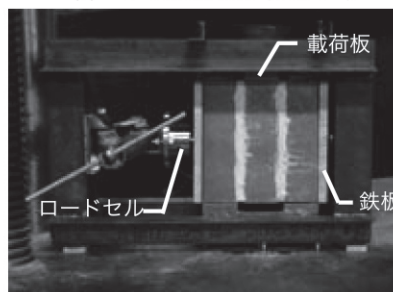
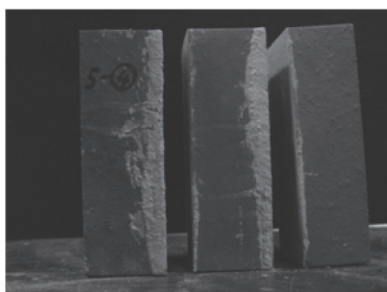
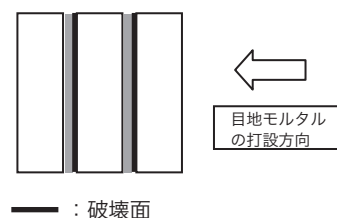
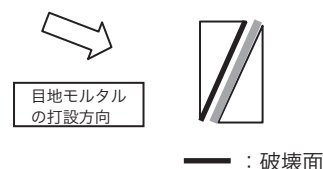
図5 一面せん断試験の試験体の作製方法



(a) 一面せん断試験 (θ=30°)



(a) 一面せん断試験 (θ=30°)

(b) 二面せん断試験
写真1 各せん断試験状況(b) 二面せん断試験
写真2 破壊状況の例

タルまたは目地モルタルと煉瓦の界面に限定する。

4. 目地せん断実験

4.1 せん断試験方法

本実験では、一面および二面せん断試験の2種類を行った。それぞれの試験方法の概要を図2および図3に示す。

一面せん断試験には、2段に積んだ煉瓦を斜めに整形し、せん断試験を行う方法を採用した。同手法は、切断機などによる事前の整形作業が必要になるものの、目地の角度を変化させて通常の圧縮試験を行うことにより、垂直応力の異なる目地のせん断強度が得られることや、せん断面に曲げモーメントが発生しないといったメリットがある。

二面せん断試験については、せん断面に発生する曲げモーメント

を図3(b)のように仮定し、図3(c)の式(2)から算出されるせん断断面内の垂直応力 σ およびせん断応力 τ の関係から断面内の応力分布を得た。目地幅が異なる場合の二面せん断試験時における断面内の応力状態を計算した例を図4に示す。図4(a)は、仮定した目地幅、図4(b)は、煉瓦と目地の界面(図4(a)中のAの位置)の垂直応力分布、図4(c)は、同界面のせん断応力分布を示したものである。また図4(c)には、既往の研究において一般に用いられている平均せん断応力(図中の●)も併示した。

図4(b)に示すように、目地幅が異なる場合の応力分布を比べると、図3(b)の曲げモーメント算出方法を用いた場合、目地幅が大きくなるにつれ曲げモーメントが大きくなるため、図3(c)の式(2)で求めた垂直応力 σ の絶対値も大きくなる。

4.2 実験の要因と水準

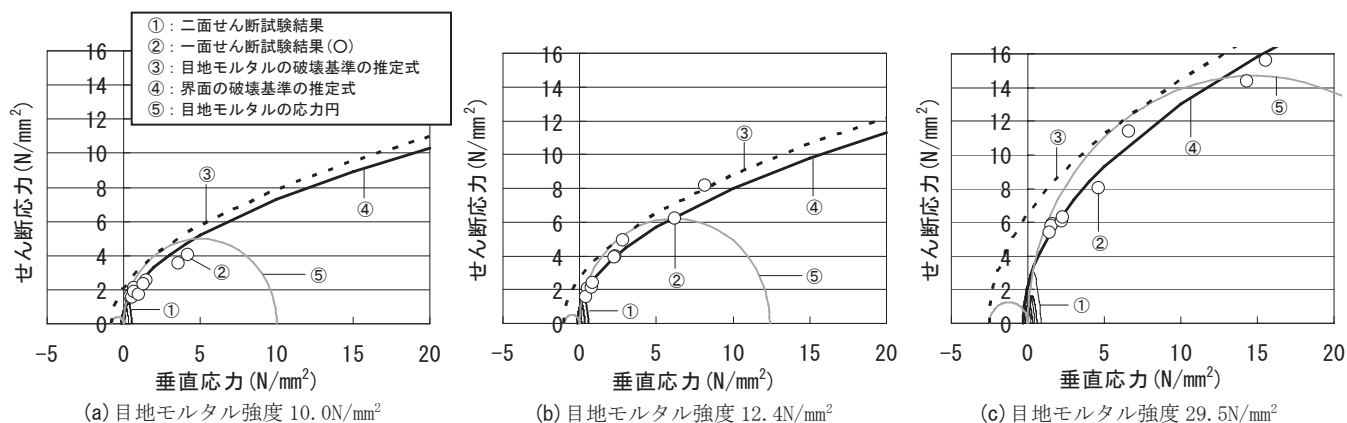


図6 せん断試験結果および破壊基準式による計算結果 (全データ)

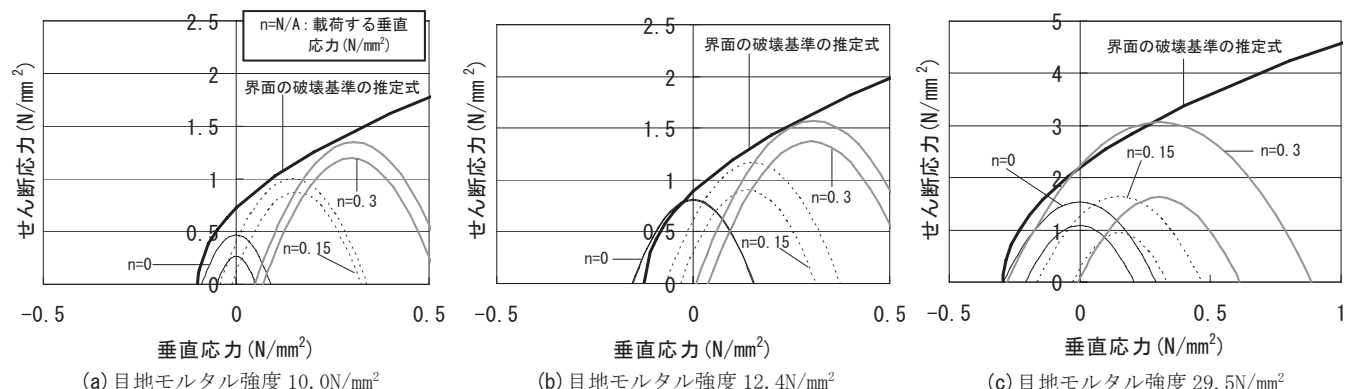


図7 二面せん断試験結果および界面の破壊基準式における計算結果 (図6の拡大)

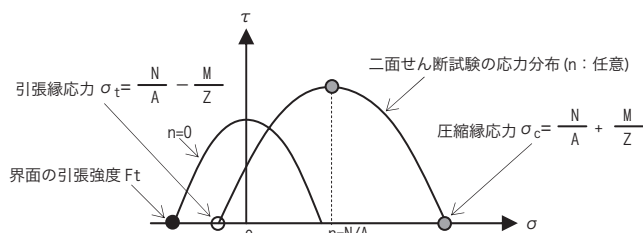


図8 界面の引張強度の算定 (z: 断面係数)

表2に、実験の要因と水準を示す。せん断試験方法の2水準以外に、目地モルタルの圧縮強度を3水準とした。また、一面せん断試験では目地角度を5水準[図5参照]、二面せん断試験では垂直応力を3水準とした。試験体は同じ水準のものを2体ずつ作製した。一面せん断試験の状況および二面せん断試験の状況を写真1に示す。

4.3 使用材料

モルタルの調査を表3に示す。セメントには試験材齢を短縮するために早強セメントを用いた。低強度の水準の目地モルタルでは、セメントを石灰石微粉末により置換した。煉瓦は、市販の焼き煉瓦(赤煉瓦で、焼成温度は1050℃、φ30×60mmに整形して計測した煉瓦単体の圧縮強度は82.7 N/mm²、静弾性係数は2.15×10⁴ N/mm²)を用いた。

4.4 試験体の作製方法

一面せん断試験体は、まず煉瓦(210×100×60mm)にモルタルを挟んで2段に積んだものを作製し、図5に示すように、目地モルタルの硬化後に所定の角度で固定できる治具を用いて、目地を含む煉

瓦をカットした。その後、載荷面に硫黄キャッピングを施した。二面せん断試験体は煉瓦を3段に積んで作製した。

煉瓦の打込み前の養生として、明治および大正時代の当時の建築工事の仕様書的な文献^{32), 33)}には、打込み前に十分に水に浸すことと記されているので、本実験では、水中で2時間吸水させた。打込み後の養生は20℃、60%の環境で気中養生とした。各種強度試験は材齢14日に行った。このほかに、目地モルタルの強度特性を評価するために、φ50×100mmの円柱供試体を作成し、圧縮および割裂引張強度試験を行った。養生は材齢14日まで水中養生とした。

5. 実験結果および考察

5.1 破壊状況と実測強度

試験体の破壊状況の例を写真2に示す。一面せん断試験の目地角度90°の供試体が圧縮破壊した以外は、二面せん断の場合を含め、ほぼ全ての供試体で目地と煉瓦の界面(以下、単に界面とする)で破壊した。また、破壊した界面は、全て打込み時に上側となっていた面であった。この理由として、目地打設後に吸水した煉瓦の水分が煉瓦下面に溜まった可能性、目地モルタルのブリーディングによって煉瓦下面に弱化層が生じた可能性などが考えられる。目地モルタルの圧縮強度と引張強度の測定方法と実測値を後述の表4に示す。

5.2 破壊基準の定式化に関する検討

図6に、2種類のせん断試験の結果、並びに本研究結果として得られた目地モルタルおよび界面の破壊基準式(後述)による計算結果を目地モルタルの強度ごとに示す。なお同図中には、円柱体を用

表 4 実験結果および定数 a

項目	目地モルタル（実測値）			破壊基準： $\tau = a \times (\sigma + Ft)^{1/2}$			
				モルタル		界面	
	圧縮強度Fc (N/mm ²)	引張強度Ft (N/mm ²)	脆度係数 (=Fc/Ft)	a	Ft (N/mm ²) (モルタル)	a	Ft (N/mm ²) (界面)
結果	10.0	0.78	12.8	2.40	0.78	1.97	0.09
	12.4	1.01	12.3	2.65	1.01	2.62	0.15
	29.5	2.50	11.8	4.10	2.50	3.93	0.29
算出方法	圧縮強度Fc：円柱供試体による圧縮強度試験により算出 引張強度Ft：円柱供試体による割裂引張強度試験により算出			a：目地モルタルの圧縮および引張強度から得られる応力円の包絡曲線となるように算出 Ft：目地モルタルの引張強度Ft		a：式(3)を用いて、最小二乗法により一面せん断試験結果を近似した値 Ft：二面せん断試験結果から計算された引張線の軸応力の最大値	

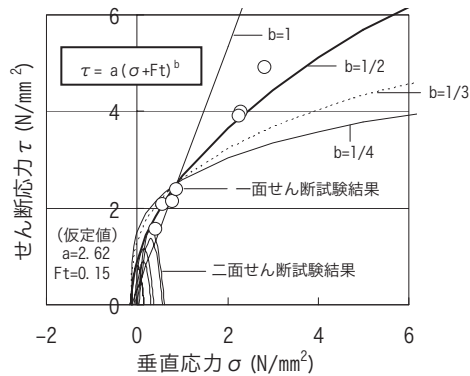
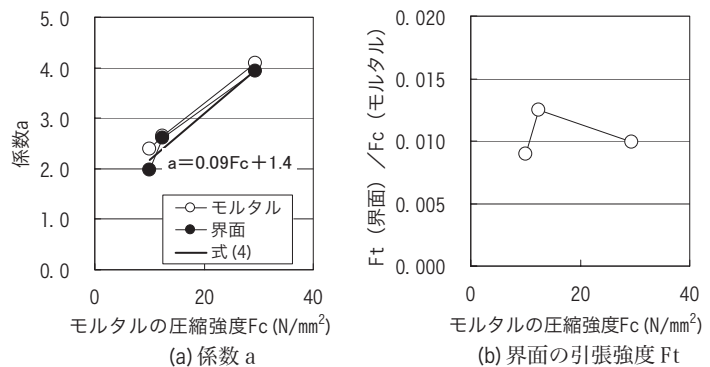
図 9 式 (3) の破壊基準式における乗数 b を変化させた計算例 (目地モルタル強度 12.4N/mm²)

図 10 係数 a および界面の引張強度 Ft に及ぼすモルタル強度の影響

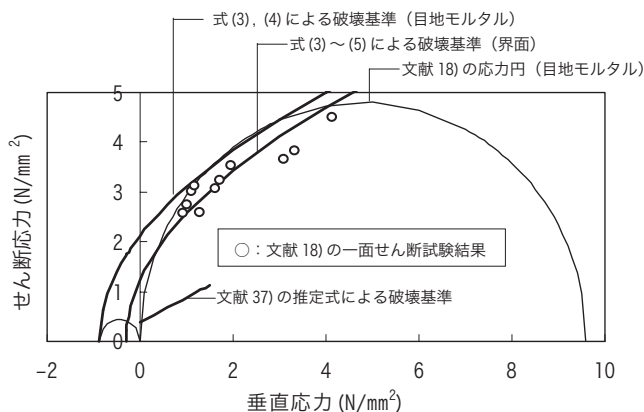


図 11 既往の実験データとの比較

いた目地モルタルの圧縮および割裂引張試験結果から求めた応力円も併示してある。

図 7 は、二面せん断試験の応力が小さいため、二面せん断試験結果のみを取り出し、本研究結果として得られた界面の破壊基準の推定式（後述）とともに示したものである。同推定式は、以下の (1) ～ (3) の手続きにより求められたものであり、界面の破壊基準を目地モルタルの強度から簡単に推定することができる。

(1) 破壊基準式の形式の決定

本研究では、二面せん断試験で得られた断面内の応力状態（図 7 に示す上に凸の放物線）を包絡し、なおかつ一面せん断試験結果（図 6 に示す○印）に相関の良い曲線として、以下の形の式を用いることとした。

$$\tau = a(\sigma + Ft)^b \quad (3)$$

ここに、 τ ：せん断応力 (N/mm²)、 σ ：垂直応力 (N/mm²)、
Ft：目地モルタルの引張強度または目地モルタルと煉瓦の界面の引張強度 (N/mm²)、
a、b：実験定数

また図 9 に、式 (3) の破壊基準式において乗数 b のみを 1 から 1/4 に変化させた計算例を示す。図によれば b=1/2 とした場合に一面せん断試験結果および二面せん断試験結果を比較的良好に表示できるといえる。したがって本報では、b=1/2 として以下の議論を進める。

(2) 実験定数 a の近似式（界面および目地モルタル）

式 (3) を用いて、一面せん断試験結果を最小二乗法により近似して求めた実験定数 a の値（界面）を表 4 に示す。同表には、目地モルタルの強度試験結果から求めた実験定数 a（圧縮および引張強度から得られる応力円の包絡曲線となるように決定）も併せて示した。

図 10 (a) に、得られた実験定数 a とモルタルの圧縮強度 Fc の関係を示す。図によれば、両者の関係はモルタルと界面でほぼ同様であり、いずれも以下の式で近似できる。

$$a = 0.09Fc + 1.4 \quad (4)$$

ここに、Fc：モルタルの圧縮強度 (N/mm²)

(3) 界面の引張強度 Ft の推定

本実験では、目地の直接引張試験は行っていないが、前述のように二面せん断試験時の破壊は全て界面破壊であった。このため、本報では、図 8 に示すように、軸力がゼロ (n=0) の二面せん断試験時

において計算された引張縁の軸応力（図 3(c) に示す下端の σ_t ）の最大値を、界面の引張強度 F_t と仮定した。試験結果から得られた F_t （界面）の値を表 4 に示す。

モルタルの圧縮強度（表 4 の F_c ）と界面の引張強度の推定値（表 4 の $F_{t(\text{界面})}$ ）の間にはある程度の相関が見られる。すなわち、界面の引張強度をモルタルの圧縮強度で除した値（ $F_{t(\text{界面})}/F_{c(\text{モルタル})}$ ）は図 10(b) のようになり、本実験の場合、界面の引張強度はモルタルの圧縮強度のおおよそ 1/100 であった。すなわち、

$$F_{t(\text{界面})} = F_{c(\text{モルタル})} / 100 \quad (5)$$

ただし、この値は本実験条件（早強セメントを用いて材齢 2 週）におけるものであり、材齢の経過とともに界面の引張強度は大きくなると考えられる。

5.3 破壊基準の適合性

前出の図 6 によれば、式 (3) は、目地モルタルの圧縮強度のみから簡単に決定できる破壊基準であるにもかかわらず、本実験で得られたほとんどの結果とよく適合するといえる。図 7 に示した二面せん断試験結果を見ると、応力状態が破壊基準より下方に存在しているものがあるが、この一因として、本実験では供試体の載荷面にキャッピングを行っていないかったために、ねじり等の計算外の外力が働いたことも考えられる。今後、載荷面の仕上げを正確に行うなど、試験精度の確保に留意する必要がある。

5.4 既往の研究結果との比較

図 11 に、既往の文献による結果と本実験で得られた推定式との比較例を示す。まず、文献¹⁸⁾の測定結果（一面せん断試験結果および目地モルタルの応力円）と本研究で得られた破壊基準を比較する。ここで、目地モルタルの圧縮強度および目地モルタルの引張強度は文献¹⁸⁾で報告されている値（それぞれ 9.6N/mm²、0.88 N/mm²）を用いた。目地モルタルの破壊基準は、モルタルの応力円をほぼ包絡する形となっている。また、界面の破壊基準は、垂直応力が 2.5N/mm²以上の領域において若干過大評価となっているものの、概ね良好な相関を示しているといえる。

同図中には、文献³⁷⁾で提案している推定式（2.2 (1) の式 (1) で、目地モルタルの圧縮強度は文献¹⁸⁾の 9.6N/mm²を用いた）も示す。比較的低 σ 領域に対するものであるため、その領域しか比較の対象とならないが、本研究で得られた破壊基準の推定式に比べて、条件の違いはあるものの、かなり低い値を示している。

6. まとめ

本研究では、煉瓦目地に関するせん断試験方法として一面せん断および二面せん断試験を行い、その破壊モードを踏まえた評価方法に関する検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 煉瓦目地の破壊モードについては、目地モルタルでの破壊および界面での破壊の 2 つのモードが考えられる。本研究では、これらの 2 つの破壊モードを包含する形の破壊基準の推定式の提案を試みた。
- 2) 本実験の条件下においては、せん断破壊は、目地モルタル内部の破壊ではなく、目地と煉瓦との間の界面破壊が卓越する結果となった。これは、目地打設後に煉瓦中の水分が煉瓦下面に溜

まったか、目地モルタルのブリーディングによって煉瓦下面に弱化層が生じた影響と推測されるが、このような現象は一般的な施工条件のもとで生じると考えられる。

- 3) 本実験におけるせん断試験の結果から、目地モルタル破壊および界面破壊の両者の破壊基準に対し、以下のような推定式が得られた。

$$\tau = a(\sigma + F_t)^b \quad (6)$$

ここに、 τ ：せん断応力 (N/mm²)、 σ ：垂直応力 (N/mm²)、
 a, b ：実験定数 ($a=0.09F_c+1.4$ 、 $b=1/2$)、
 F_t ：目地モルタルおよび目地モルタルと煉瓦の界面の引張強度 (N/mm²)

今後、界面の状態や目地モルタルの強度レベルなど、さらに広範囲な条件に対する試験を行い、提案した推定式の妥当性の確認および適用範囲の拡張を行いたい。また、最終的には、既存の煉瓦建築物の煉瓦壁を用いた試験結果との比較を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、長谷川哲也氏（日本診断設計）、青木孝義先生（名古屋市立大学）、守明子先生（名古屋工業大学）のご助言を頂いた。また、本研究を進めるにあたり、和藤浩氏（三重大学技術専門職員）、三和真弓さん（三重大学 2007 年度卒業生）、中川陽大君（三重大学大学院生）にご協力を頂いた。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 文化庁文化財部：重要文化財（建造物）耐震診断指針，2001
- 2) 京都府教育委員会：重要文化財同志社大学彰栄館修理工事報告書，1981
- 3) 京都府教育委員会：重要文化財同志社大学礼拝堂修理工事報告書，1990
- 4) 財団法人文化財建造物保存技術協会：山形県旧県庁および県会議事堂保存修理工事報告書，1990
- 5) 財団法人文化財建造物保存技術協会：重要文化財日本ハリストス正教会教団復活大聖堂（ニコライ堂）保存修理工事報告書，1998
- 6) 飛鳥村教育委員会、日本診断設計（株）：大宝「六角れんが蔵」保存修理調査事業調査報告書，1995. 12
- 7) 財団法人文化財建造物保存技術協会、日本診断設計（株）：重要文化財山口県旧県庁舎及び県会議事堂調査委託工事構造調査報告書，1996. 7
- 8) 財団法人建築研究協会、京都大学工学部建築学科、滋賀県立大学環境科学部：京都府立図書館構造診断報告書，1997. 3
- 9) 名古屋大学、半田市、日本診断設計（株）：旧カプトビール半田工場構造調査・診断報告書，1997. 8
- 10) 新日本製鐵（株）八幡製鐵所、日本診断設計（株）：旧日本事務所建物診断報告書，1997. 12
- 11) 日本建築学会九州支部：旧古河鋳業若松支店ビル構造等調査報告書，2000. 11
- 12) （株）大林組、日本診断設計（株）：旧日銀岡山支店ルネサンス事業改造工事煉瓦物理試験・壁体内鋼材探査等報告書，2004. 10
- 13) 独立行政法人酒類総合研究所、日本診断設計（株）：独立行政法人酒類総合研究所赤煉瓦造工場 構造・耐震調査報告書，2006. 3
- 14) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針同解説 1977 刊行，1990 改訂，2001 改訂，2001
- 15) 国弘仁、蓮田常雄、江戸宏彰、時野谷浩良：既存レンガ造建築物の耐震診断と耐震補強に関する研究 その 3. 直接せん断試験によるレンガ壁体の目地強度評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，C，pp. 1013-1014，1990
- 16) 富永善啓、西村泰志：煉瓦組積造建築物の構造性能に関する実験的研究 その 3. 組積要素体の摩擦試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp. 877-878，2007
- 17) Rots, J. G.: Structural masonry—an experimental/numerical basis for practical design rules, A. A. Balkema, 1997

- 18) 劉可、塩屋晋一：既存煉瓦造建築物の壁体の強度試験方法に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No2, pp. 1927-1932, 2003
- 19) 馬場明生、平石久廣、加藤聡：竣工後 70 年を経過した無筋れんが造倉庫の耐力調査 その 1. 調査手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 223-224, 1979
- 20) 三島直生、畑中重光、長谷川哲也、和藤浩、中浜貴生：醸造試験所の煉瓦の力学性能評価に関する実験的研究 その 1. 建物概要および実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 961-962, 2006
- 21) 中浜貴生、畑中重光、長谷川哲也、三島直生、和藤浩：醸造試験所の煉瓦の力学性能評価に関する実験的研究 その 2. 実験結果および考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 963-964, 2006
- 22) 中村由香里、富永善啓、西村泰志：レンガ組積造建築物の構造性能に関する実験的研究 その 2. 組積要素体のせん断試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp. 809-810, 2006
- 23) 宇田川公男、清水豊和、佐藤彰芳、金田和浩、井上正樹：明治中期竣工れんが造建物の壁体強度調査と耐震性の検討 その 1. れんが壁体の曲げ、せん断載荷試験および要素試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, pp. 1973-1974, 1992
- 24) 松田芳範、岩田道敏、八巻一幸、山内俊幸：既設レンガ部分の力学的性状について, コンクリート工学年次報告集, Vol. 19, No1, pp. 541-546, 1997
- 25) 岩下善行、森永英里、小川一郎、安達洋、松本惇、山中邦元、稲垣達夫、中西三和：三菱一号館の復元に伴う構造耐力試験 その 3. 本試験：圧縮試験、直接せん断試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp. 815-816, 2006
- 26) 広沢雅也、馬場明生、平石久廣、加藤聡：竣工後 70 年を経過した無筋れんが造倉庫の耐力調査 その 2. れんが壁体のせん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp. 1533-1534, 1979
- 27) 戸塚晃、長谷川直司、後藤健：旧内閣文庫庁舎について その 3. れんが壁体の強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, F, pp. 903-904, 1985
- 28) 佐藤聖三、藤井光治郎、勝俣英雄、遠藤文明：既存レンガ造建築物の耐震診断と耐震補強に関する研究 その 2. レンガ壁体試験の実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, pp. 1011-1012, 1990
- 29) V. Bosiljkov: Micro vs. macro reinforcement of brickwork masonry, Materials and Structures, 39, pp. 235-245, 2006
- 30) 青木孝義、宮村篤典、谷川恭雄、大橋幾世：組積造壁体の地震時挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No2, pp. 1105-1110, 2002
- 31) 山内成人、真田靖士、中村友紀子、松崎育弘、中埜良昭：インターロッキング機構を利用した組積造壁の静的破壊実験 その 3. URM 壁のせん断性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp. 777-778, 2006
- 32) 大建築学下巻, 三橋四郎著, 大倉書店, pp. 868-871, 1908
- 33) 大建築学第一巻, 三橋四郎著, 大倉書店, pp. 115-119, 1923
- 34) Page. A. W.: Finite Element Model for Masonry, Journal of the Structural Division ASCE, 104, (ST8), pp. 1267-1285, 1978
- 35) P. B. Lourenco: Computational Strategies for Masonry Structures, Doctor Thesis, Faculty of Engineering, University of Porto, 1996
- 36) 渡辺和明、永尾拓洋、花里利一、江草弘章：石・レンガ積み橋脚の耐震性に関する研究, 大成建設技術センター報, 第 39 号, pp. 10-1-10-6, 2006
- 37) T. Paulay, M. J. Priestley, Seismic Design of Concrete and Masonry Buildings, 1992
- 38) 和藤浩、中浜貴生、三島直生、中川陽大、畑中重光：煉瓦目地のせん断試験方法に関する実験的研究 その 1. 実験概要および破壊状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 129-130, 2008
- 39) 中浜貴生、三島直生、中川陽大、和藤浩、畑中重光：煉瓦目地のせん断試験方法に関する実験的研究 その 2. 実験結果および破壊基準の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 131-132, 2008

(2009年2月10日原稿受理, 2009年3月25日採用決定)