

論文 既存煉瓦造建築物の壁体の強度試験法に関する研究

劉 可^{*1}・塩屋 晋一^{*2}

要旨：本研究は、小型の抜き取り試験片の強度試験結果から、既存煉瓦造壁体の各種強度が評価できるシステムを整備することを目的としている。既存の煉瓦造建築物の耐震診断・耐震補強を行う際に検討すべき煉瓦壁体の各種強度と、壁体を構成する材料の基本強度の関係について述べ、それらの基本強度を推定するための小型の抜き取り試験片の試験方法を提案している。施工不良による材料強度のバラツキの影響については別途検討することを前提に、小型試験片の強度から実大寸法の壁体の圧縮強度と水平目地のモルタルのすべり強度特性を推定するための補正係数を示している。

キーワード：組積造、耐震診断、圧縮強度、せん断強度、耐震補強

1. はじめに

明治から大正末期までに建設され、今後も使用される煉瓦造建築物の耐震診断を行う際にも、煉瓦造壁体の各種強度を、現場抜き取り試験片の強度試験に基づいて設定する必要がある。このような煉瓦造壁体は煉瓦と目地モルタルが複雑に組積されるため、煉瓦や目地モルタルの単体の強度試験だけで壁体の各種強度を推定するのは難しく、大規模の煉瓦造壁体の強度実験が必要になる。

しかし、そのような大規模の強度実験は実験作業も困難で、費用・試験期間もかなりかかる。また、既存煉瓦造壁体にはほとんど補強筋が配筋されていないため比較的大きな煉瓦壁試験体の抜き取りが困難になる場合がある。

本研究は、小型の抜き取り試験片の強度試験結果から、煉瓦造壁体の各種強度が評価できるシステムを整備することを目的としている。本研究では、まず新規の煉瓦とモルタルで製作された小型試験体による強度試験方法を検討し、そして研究代表者らが既に行っている既存煉瓦造建築物の実大壁体の強度試験結果でその評価システムを検証する。

本論文では、耐震診断時に必要となる壁体の各種強度、小型試験体による基本強度の試験方法、その結果について述べる。なお、既存煉瓦造建築物では煉瓦の不整形さや目地モルタルの施工不良および材料強度のバラツキが壁体の強度を低下させることも十分考えられるが、この影響の調査方

法については、別途検討する計画にしている。

2. 既存煉瓦造壁体の破壊形式と基本強度

既存の煉瓦造建築物の構造形式は、壁体を煉瓦造として壁式構造を形成する形式と、架構部を鉄筋コンクリート造として壁体を煉瓦造とする形式に分類される。海外では、後者の形式は現在でも組積造建築物で多く採用されており、それらの形式の終局強度設計法も整備されている。

しかし、ここで対象にしている既存の煉瓦造建築物では、煉瓦壁体内に補強筋がほとんど配筋されていないこと、壁体内の煉瓦の積み方がイギリス積やフランス積のように複雑なものになっていることなどの点で、現在の海外¹⁾のものとは異なっており、それらの設計方法を準用するだけで既存煉瓦造建築物の耐震診断を行える状況にない。以下に、耐震診断時に事前調査として調べるべき煉瓦壁体の基本強度について述べる。

(1) 鉛直荷重に対する検討では、煉瓦造壁体の鉛直方向の圧縮強度が必要になる。

(2) 地震時の構面外水平力に対する検討では、構面外曲げ強度とせん断強度が必要になる。その時の壁体の変形・応力状態は図-1のようになる。図-1(a)のようにRC架構がない場合には曲げモーメントに対して壁体の自重と煉瓦と目地モルタルの引張接着強度で抵抗し、水平力に対しては水平目地のすべり接着強度で抵抗する。また図-1(b)

*1 鹿児島大学大学院理工学研究科物質生産工学専攻・工修（正会員）

*2 鹿児島大学工学部建築学科助教授・工博（正会員）

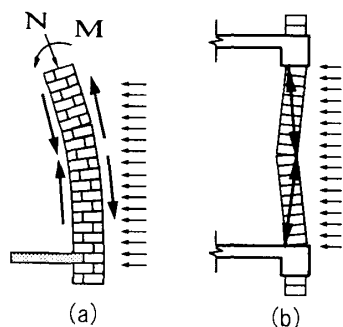


図-1 構面外水平力を受ける時の
壁体の変形・応力状態

のように RC 架構がある場合には、梁と上階の自重により壁体の鉛直方向の変形が拘束され、壁体内に斜めの面内圧縮力が生じその水平成分が抵抗する。この水平成分を評価するためには、壁体の鉛直方向の圧縮強度、水平目地モルタルのすべり強度特性が必要となる。

(3) 地震時の構面内水平力に対する検討では、せん断破壊が支配的になるため、壁体のせん断力が必要になる。せん断破壊の形式としては、壁の補強筋がほとんどない場合には図-2に示すように3種類の破壊モードに分類される。RC 架構が存在しない場合には壁体に斜め引張りひび割れが発生し破壊する形式Aとなる。RC 架構が存在する場合には壁体の斜め引張りひび割れが左右の柱に進展して破壊する形式Bと、煉瓦壁の中央高さの水平モルタルで水平滑りが生じ、左右の柱が曲げ降伏またはせん断破壊する形式Cに分かれる。

破壊形式AとBの壁体の平均的なせん断強度を評価するために煉瓦の引張強度特性、煉瓦と目地モルタルと引張接着強度特性が必要となる。また、破壊形式Cの場合には煉瓦と目地モルタルのすべり強度特性が必要になる。

以上のことから、既存煉瓦造建築物の耐震診断時に調査すべき基本強度としては、壁体の平均的な圧縮強度、煉瓦とモルタルの引張接着強度特性とすべり強度特性が必要になる。

3. 煉瓦壁体の圧縮強度試験

3.1 試験体の形状

壁体の圧縮強度を推定するための小型の試験体として図-3に示す3種類を取り上げた。壁体か

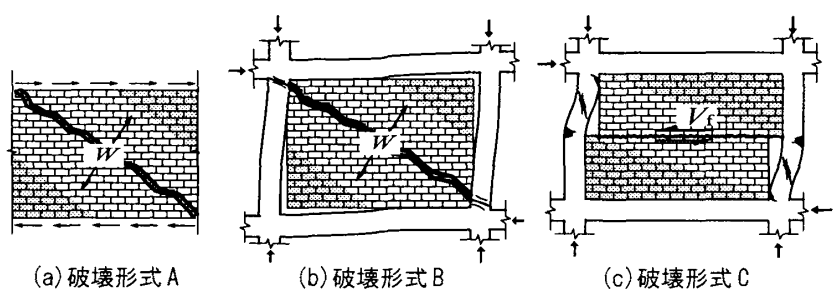


図-2 構面内水平力を受ける時の壁体のせん断破壊形式

表-1 煉瓦とモルタルの強度特性

	E (10^3 N/mm^2)	σ_B (N/mm^2)	ε_B (%)	σ_t (N/mm^2)
煉瓦	11.57	49.3	0.43	1.26
モルタル	9.38	9.6	0.10	0.88

E:ヤング係数, σ_B :圧縮強度, ε_B :圧縮強度時ひずみ
 σ_t :引張強度

らコアドリルでコアを抜き取って切断して、高強度のモルタルで整形するコア試験体、煉瓦の小口の幅(100mm)を一辺とする正方形を水平断面する煉瓦を二段積みした二段積試験体および三段積みした三段積試験体の3種類である。煉瓦との間には目地モルタルが敷かれている。このほか、実大寸法の煉瓦壁体の圧縮強度を調べるために六段積みにした実大煉瓦壁試験体(以後、実大壁試験体と称す)も製作している。表-1に煉瓦直方体とモルタルシリンダーの力学的材料特性を示す。煉瓦は赤煉瓦で、目地のモルタルの配合は重量比でセメント:石灰:砂:水の比が1:1.1:7.4:1.5としている。コア試験体の整形用モルタルの圧縮強度は煉瓦の強度とほぼ同じとしている。セメントには試験期間との関係で早強セメントを用いている。

3.2 試験方法

図-4に示すように圧縮载荷を行い载荷鉄板間の圧縮変形を測定している。加圧面のキャッピングについては、コア試験体では整形用モルタルを打設する際に型枠に平ガラスを設置して形成し、それ以外についてはセメントペーストで行っている。

3.3 試験結果

(1) 破壊状況

写真-1にコア試験体と三段積試験体の破壊状況を示す。最大荷重以前の破壊としては、目地モルタルには破壊は生じないで、図-5に示すように煉瓦に縦ひび割れが生じた。このひび割れは、

文献1)で述べられているように煉瓦とモルタルのポアソン比の違いにより生じる。

(2) 圧縮応力-ひずみ関係

図-6に各試験体の代表的な試験体の圧縮応力-ひずみ関係を比較して示す。圧縮応力については圧縮荷重を水平断面で除し、ひずみについては煉瓦試験体ではひずみゲージによる値、その他の

試験体では変位計による値としている。煉瓦積の試験体の応力-ひずみ関係は、煉瓦とモルタルの応力-ひずみ関係と異なり、それらの中間的なものとなっている。

(3) 圧縮強度と補正係数

図-7に煉瓦、モルタルおよび煉瓦積試験体の圧縮強度の分布を比較して示す。表-2には試験体数・平均圧縮強度・標準偏差・変動係数を示す。

煉瓦6段積の実大壁試験体では、縦目地にモルタルを密実に充填できないことと、煉瓦とモルタルのヤング係数の違いを理由に、縦目地のモルタルは圧縮抵抗しないものとして抵抗断面積から縦目地の水平面積を差し引いた面積で、圧縮強度を求めた値も示している。

試験体の高さで試験断面寸法の形状比が、最も小さい二段積試験体の圧縮強度が最も大きくなり、煉瓦三段積試験体が標準偏差も最も小さく、圧縮強度が縦目地モルタルの抵抗を無視した六段積壁試験体のものに近くなっている。また、コア

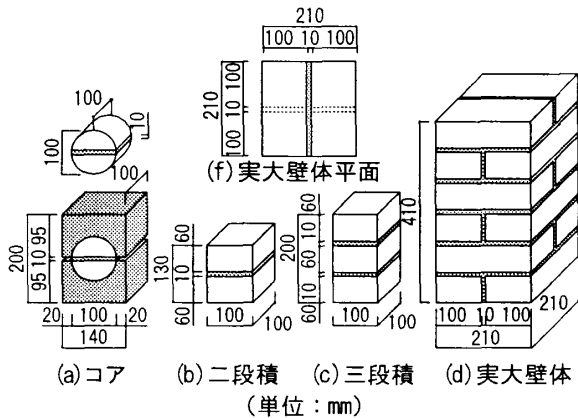


図-3 圧縮強度試験体の形状と寸法

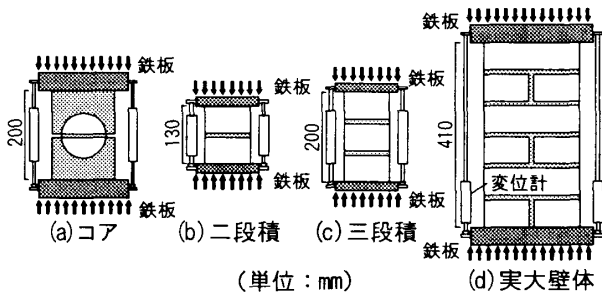


図-4 加力状況

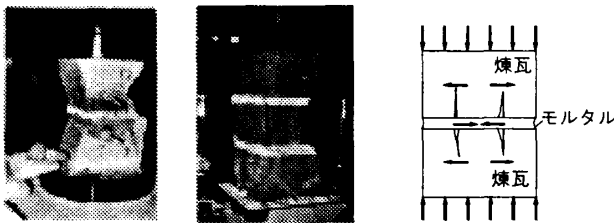


図-5 煉瓦のひび割れ

写真-1 圧縮強度試験体の破壊状況

表-2 圧縮強度試験体の数・平均圧縮強度・標準偏差・変動係数

試験体名	標本数 (個)	平均強度 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)	補正係数 κ
煉瓦直方体	3	49.28	1.2	2.4	—
モルタルシリンダー	9	9.51	0.5	5.3	—
コア試験片	6	36.24	8.3	22.9	0.65
二段積試験片	6	41.40	4.1	9.9	0.57
三段積試験片	6	29.54	1.6	5.4	0.80
実大壁体	2	21.49	0.5	2.3	—
(縦目地面積除く)	2	23.69	0.4	1.7	—

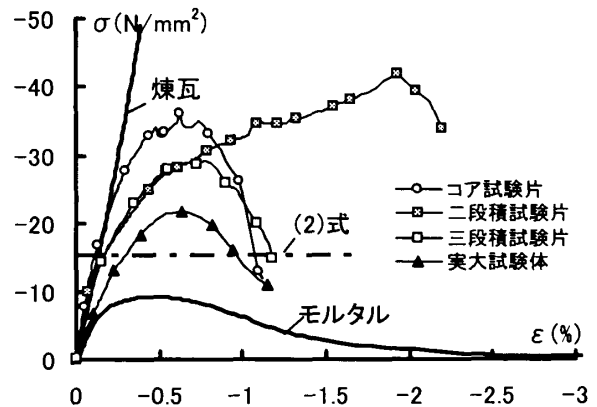


図-6 圧縮応力-ひずみ関係

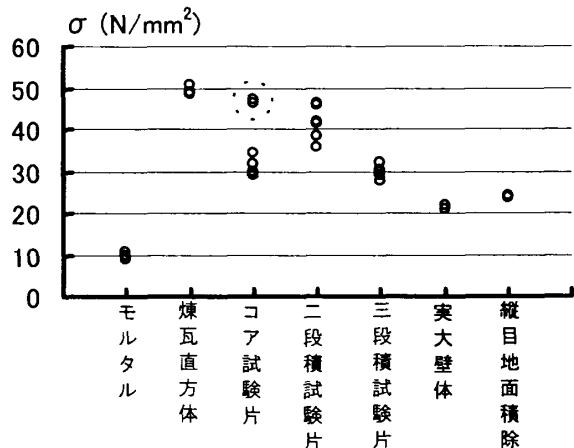


図-7 圧縮強度の分布

試験体の強度も、点線で囲む2個のデータを除くと、三段積試験体の強度に近くなっており、実大煉瓦壁体の圧縮強度を推定するデータとして有効であると考えられる。縦目地モルタルの抵抗を無視した六段積壁試験体の平均圧縮強度を各試験体の平均圧縮強度で除した値を補正係数 κ として表-2中に示す。この補正係数と小型試験体の圧縮強度を用いて、実大煉瓦壁体の平均圧縮強度 σ_{BW} は(1)式で表される。

$$\sigma_{BW} = (1 - \alpha) \cdot \kappa \cdot \sigma_{test} \quad (1)$$

ここに、 α ：縦目地の水平面積が煉瓦壁体の水平断面積に占める割合、 κ ：強度補正係数(表-2参照)、 σ_{test} ：小型試験体による圧縮強度

また、文献1)では煉瓦とモルタルの強度特性から壁体の圧縮強度を推定する評価式が(2)式で紹介されている。これによる値を図-6中に一点鎖線の水平線で示す。その計算による圧縮強度は実大煉瓦壁体の実験値の72%となり、過小評価する結果となっている。

$$\sigma_p = F_{cb} \cdot (F_{tb} + \alpha \cdot F_j) / U \cdot (F_{tb} + \alpha \cdot F_{cb}) \quad (2)$$

ここに、 $\alpha = j/4.1h$ 、 h ：煉瓦一枚の高さ、
 j ：目地幅、 F_{cb} ：煉瓦の圧縮強度、
 F_{tb} ：煉瓦の引張強度、 U ：1.5の定数
 F_j ：モルタルの圧縮強度

4. 煉瓦と目地モルタルの引張接着強度試験

4.1 試験体形状と試験方法

小型の試験片としてコア試験片と二段積試験片の2種類を取り上げている。図-8に示すように試験片の煉瓦側面に6mm厚の帯鉄板をエポキシ系接着剤で接着して、上下の帯鉄板に固定されたボルトをピン支持する状態で引張载荷を行っている。接着強度は、煉瓦と目地モルタルの接着面に対して垂直に引張力が作用する状態と、45°に作用する状態について調べている。その他、図-9中に示すようにモルタルの一軸引張強度の試験も行っている。

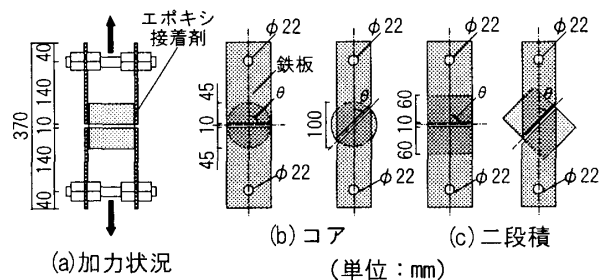


図-8 引張接着強度試験体の形状

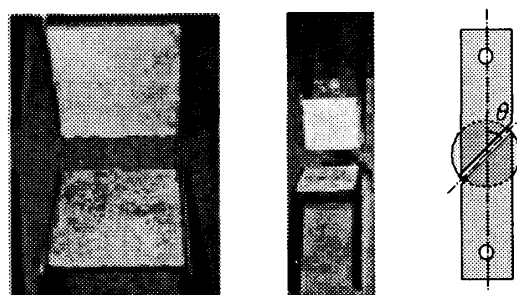


写真-2 引張接着強度試験体の破壊面

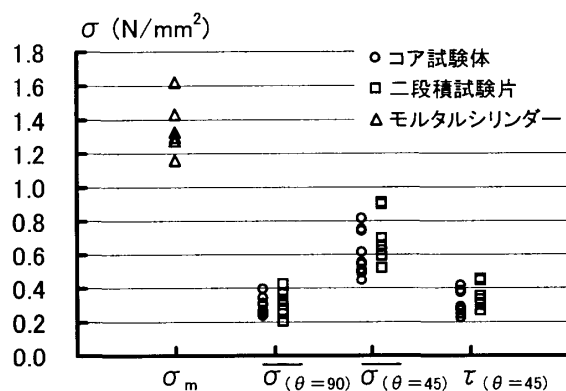


図-9 引張接着強度の分布

4.2 試験結果

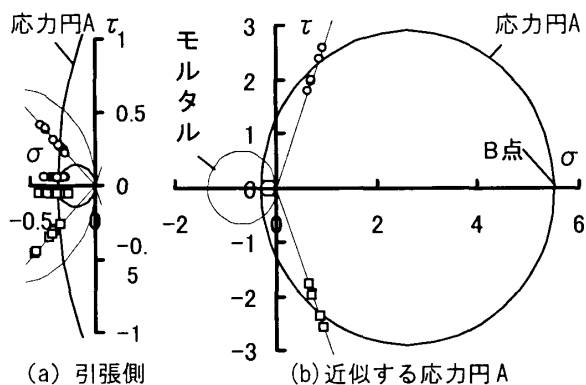
(1) 破壊状況と引張強度

写真-2に破壊状況を示す。全試験体とも、煉瓦と目地モルタルの接着面で剥離した。

図-9に引張接着強度の分布を示す。図中には接着面と载荷軸のなす角 θ が45°の試験体では、その接着面でのせん断応力と垂直応力の成分の分布も示している。また、表-3に試験体数・見掛けの平均引張強度・標準偏差・変動係数を示す。コア試験片と二段積試験片の引張強度と標準分散はほぼ同じであり、コア試験片に本試験方法を適用することにより煉瓦と目地モルタルの引張接着強度を推定できると判断される。またそのモルタル接着強度はモルタルの引張強度に対して約20%

表－3 引張接着強度試験結果

試験体名	θ	標本数 (個)	平均強度 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)
モルタル	90°	9	0.88	0.15	21.4
コア試験片	90°	9	0.29	0.05	17.9
二段積試験片	90°	9	0.31	0.07	22.4
コア試験片	45°	9	0.69	0.13	18.8
二段積試験片	45°	9	0.60	0.13	21.7

図－10 引張側の τ － σ 関係と接着強度分布

となっており、モルタルの引張強度から直接、接着強度を推定することは難しい結果になっている。

(2) モルタル接着面の引張域の τ － σ 関係

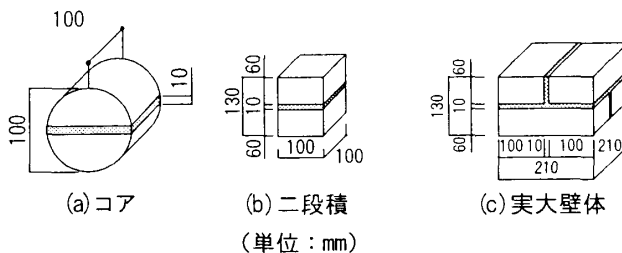
図－10 にモルタル接着面の垂直応力 σ が引張となる範囲の τ － σ 関係に実験データをプロットしたものを示す。同図には次章で後述される圧縮域のデータも一部プロットしている。○はコア試験片のもので、□は二段積試験片のものである。モルタル接着面の引張域の τ － σ 関係は、応力円 A で近似できそうである。圧縮側の応力点 B の値は、一軸引張接着強度の 20 倍としている。

5. 目地モルタルのすべり強度試験

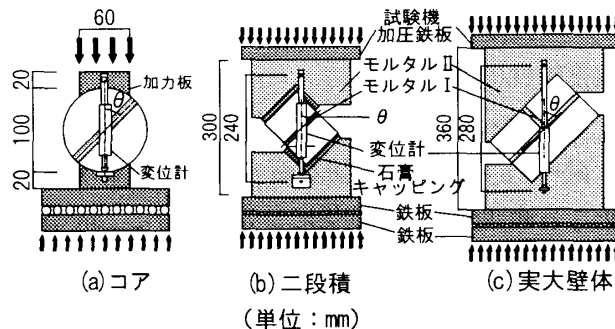
5.1 試験体形状

ここでは、図－11 に示すように小型の試験片としてコア試験片と二段積試験片の2種類を取り上げている。図－12 に示すように試験片を設置して、接着面と载荷軸のなす角度 θ が 45, 30, 20 度となる3種類について圧縮試験を行っている。この他、比較用として実大寸法の水平目地モルタルのすべり強度特性を調べる壁体試験体を、 θ を 45 度として作製している。

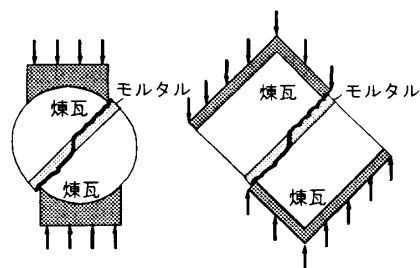
コア試験片ではコアの曲面に合わせた鋼材を試験片の上下の煉瓦に設置している。二段積試験片では



図－11 すべり強度試験の試験片の形状



図－12 すべり強度試験の加力方法



図－13 目地モルタルのすべり破壊状況

図－12(b)に示すように L 形鋼材が設置された高強度のモルタルブロックが、試験片の上下の煉瓦に設置されている。これらの試験体の煉瓦と鋼材の接触面では石膏によるキャッピングが行われている。実大壁試験体では、型枠内に二段積煉瓦壁体を設置して高強度のモルタルを打設して製作している。

5.2 実験結果

(1) 破壊状況とすべり強度

全試験体とも煉瓦とモルタルの接着面ですべり破壊が生じたが、図－13 に示すようにモルタルにほぼ鉛直の縦ひび割れ生じ、このひび割れの左右ですべり面が上側煉瓦接着面と下側煉瓦接着面に分かれた。図－14 にすべり強度の分布を示す。载荷軸の軸断面積で圧縮荷重を除いた見掛けの平均圧縮強度 $\bar{\sigma}$ 、接着面の垂直応力 σ およびせん断応力 τ 示している。また、表－4 に試験体数と見掛けの平均圧縮強度 $\bar{\sigma}$ およびその標準偏差・変動

係数を示す。コア試験片の強度が二段積試験片の強度より小さくなる傾向がある。 θ が 45° の場合には、コア試験片と二段積試験片の強度とも、実大試験体の強度より大きくなっている。縦目地モルタルの抵抗を無視した平均圧縮強度を各試験体の平均圧縮強度で除した値を補正係数 κ として表-4中に示す。この補正係数 κ を小型試験体のすべり強度特性に乗ずることで実大寸法のすべり強度特性に補正できる。

(2) モルタル接着面の圧縮域の $\tau-\sigma$ 関係

図-15にモルタル接着面の垂直応力 σ が圧縮となる範囲の $\tau-\sigma$ 関係にコア試験片と二段積試験片の実験データを白塗りの記号でプロットして示す。同図中にはモルタルの一軸圧縮強度時の応力円と、前章で示された引張接着破壊基準を表す応力円Aも示している。また、黒塗りの記号は前節で述べた実大壁体のすべり強度特性を推定する係数で補正したデータの分布である。○と●はコア試験片のもので、□と■は二段積試験片のものである。文献1)では水平目地のモルタルの $\tau-\sigma$ 関係を設計で評価するものとして下記の(3)式が紹介されている。これによる関係を破線で図中に示す。それによる値は黒塗りのデータの下限値を評価している。

$$\tau = 0.17 \cdot \sqrt{\sigma_m} + 0.3 \cdot \sigma$$

$$\text{かつ } \tau \leq 1.3 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3)$$

ここに、 σ_m : モルタル一軸圧縮強度

6. まとめ

既存煉瓦壁体の各種強度を推定するための小型試験片として、コア試験片と煉瓦二段積試験片および煉瓦三段積試験片の3種類を取り上げ、それらの強度試験方法について実験的に検討した。その結果をまとめるとつぎのようになる。

- (1) 採取が容易なコア試験片の強度試験結果に補正係数を用いると、実大寸法の壁体の圧縮強度と目地モルタルのすべり強度特性($\tau-\sigma$ 関係)について推定できる。
- (2) 煉瓦とモルタルの引張接着特性は、モルタル

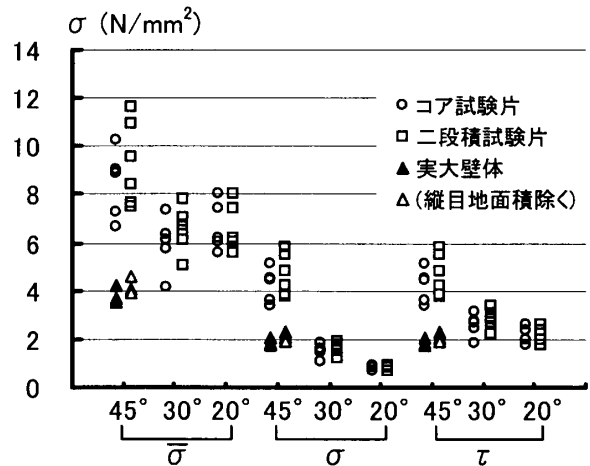


図-14 圧縮せん断すべり強度分布

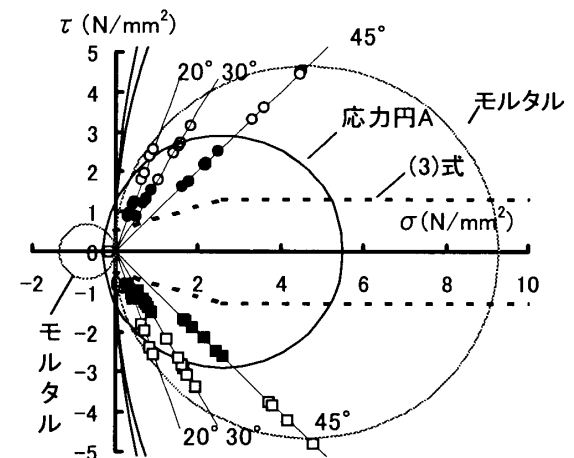


図-15 圧縮側の $\tau-\sigma$ 関係とすべり強度分布

表-4 圧縮せん断すべり強度試験結果

試験体名	θ	標本数 (個)	平均強度 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)	補正係数 κ
コア試験片	45°	6	8.51	1.31	14.5	0.49
	30°	6	5.90	1.03	17.5	—
	20°	6	6.89	1.07	15.5	—
二段積試験片	45°	6	9.26	1.74	18.8	0.45
	30°	6	6.54	0.92	14.1	—
	20°	6	6.89	1.07	15.5	—
実大壁体 (縦目地面積除く)	45°	3	3.79	0.33	8.7	—
	45°	3	4.18	0.37	8.9	—

の引張強度特性では推定が難しく、直接、引張接着強度試験を行う必要がある。コア試験片で容易に引張接着強度を調べることは可能であるが、実大寸法の壁体の引張接着強度を推定するための補正係数は今後、追加実験により調べる必要がある。

参考文献

- 1) T. Paulay, M. J. Priestley, Seismic Design of Concrete and Masonry Buildings, 1992