

# 論文 セメントによる Adobe の品質改善および破壊基準に関する実験的研究

玉那覇 祐一\*1・畑中 重光\*2・三島 直生\*3

**要旨:** アドベ (Adobe) は土と水と場合によってはその他の有機素材混ぜ、型枠でかたどってブロックを作り、目地でブロック間を接着しながら積み上げ、構造物を形成する材料である。本報では、Adobe の強度および耐久性を改善することを目的として Adobe へのセメント添加による品質改善効果を把握した。さらに、Adobe-目地要素のせん断試験結果から、その破壊基準の推定を試みた。実験の結果、セメント添加による乾燥収縮率の低減、侵食抵抗性、圧縮強度、引張強度、およびせん断強度の改善結果が定量的に把握された。また、せん断試験結果に対する既往の破壊基準式の適用性を確認した。

**キーワード:** Adobe, セメント, 品質改善, せん断特性, 目地, 破壊基準式

## 1. 序論

アドベ (Adobe) (写真-1 参照) は土と水と場合によってはその他の有機素材混ぜ、型枠でかたどって、乾燥させることでブロックを作り、目地でブロック間を接着しながら積み上げ、構造物を形成する材料である。地球上に現存する最古の建築材料の一つとされ、おおよそ 1000 年もの間、世界の各地で、生態学的にも、環境保護の立場から見ても安全であり低コストかつ多量に入手できる材料として用いられてきた。しかし、工業化と近代的な材料の開発が進むとともに、多くの先進国で Adobe 構造物は用いられなくなった。一方で、金銭的に余裕のない途上国では、現在でも現地の住民が伝統的な手法で Adobe 構造物を製造、建設し、主に住居建築として使用し続けられている。しかし、近年、2003 年のバム地震など、巨大地震による甚大な被害を出していることから、Adobe は材料としての脆弱性や非工学材料であることなどの問題点が改めて取りざたされてきている。こういった背景から、Adobe の品質改善は、Adobe 構造物で生活する発展途上国の人々にとって、非常に重要な問題である。

## 2. 研究目的

本研究では、Adobe を工学材料として安全に使用できるようにすることを目的としている。現在の Adobe は、地域で入手できる材料を使い、地域の技術で作られるもので、工学材料としての強度および耐久性などの信頼性は十分には明らかにされていない材料、すなわち非工学材料として位置づけられる。

本研究では、Adobe を工学材料として安定的に使用できるようにすることを目的としている。まず、既往の研



写真-1 Adobe

究<sup>1) 2)</sup>に引き続き、Adobe の強度および耐久性を改善することを目的として、実験 I では、Adobe へのセメント添加による品質改善効果を把握する。実験 II では、Adobe が構造要素として使用される状態を想定して、Adobe-目地要素のせん断強度の評価試験を行い、その破壊基準の推定を試みる。

## 3. 実験概要

### 3.1 使用材料

本研究で使用した材料を以下に示す。砂は粒径 0.3mm 以下に分級された乾燥珪砂 7 号 (密度 2.55g/cm<sup>3</sup>) を、粘土は平均粒径 20μm の岐阜県土岐市産中山粘土粉末 (密度 2.55g/cm<sup>3</sup>)、水は水道水を用いた。強化剤としては普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>) を用いた。本来であれば、自然状態の土砂を用いて試験体の作製を行う必要があるが、この場合、ばらつきが多く、要因の変化に対する傾向を把握することが困難となるため、本実験では粘土および砂の材料を固定し、調合も管理して試験体を作製した。

### 3.2 調合

本研究で使用した調合を表-1 に示す。本研究では、セメント置換率 (粘土に対するセメントの容積置換率)

\*1 三重大学大学院工学研究科 建築学専攻 (学生会員)

\*2 三重大学大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

\*3 三重大学大学院工学研究科 准教授 博士 (工学) (正社員)

の違いによる各特性の変化を調べる。全体に対する水の容積率を38%、固体材料に対する砂の容積率を50%に固定した。空気量は、モルタル用エアメータを用いて実測し、3回の実測値の平均を表-1に示す。フロー値はJIS R 5201によって測定した。

### 3.3 試験体の作製方法

本研究における試験体は実験室で作製した。揺動攪拌型ミキサで砂および粘土を順次投入し、空練りを2分間、その後に、所定量の水を投入し、練混ぜをさらに2分間行った。練り上がった材料を型枠に打ち込み、その直後に脱型し、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内で気中乾燥養生した。

## 4. セメント添加による Adobe の品質改善効果の把握(実験 I)

### 4.1 実験概要

セメントを強化剤として加えることにより、Adobe の材料としての品質改善効果の把握を試みる。試験方法と材齢を表-2に示す。

### 4.2 要因と水準

要因と水準を表-3に示す。本実験ではセメントの置換率の違いによる各特性の変化を調べる。セメント置換率以外に、促進浸食試験のみ、試験時間を要因に加えた。

### 4.3 実験方法

#### (1) 乾燥収縮試験

試験体は210×100×60mmのAdobeブロックを用いた。乾燥収縮量は試験体の長手方向の寸法の変化を、ノギスを用いて0.01mm単位で3箇所計測し、その平均値から乾燥収縮率を算出した。

#### (2) 促進浸食試験<sup>3)</sup>

セメントによるAdobeの浸食抵抗性の改善効果を目的とし、試験体はφ100×60mmの円柱供試体を用い、供試体の側面に硫黄コーティングを施し、試験に供した。試験体から470mm離れたφ2mm×33穴のスプレーノズルから水圧0.038MPaの水流を、試験体中心部にさらし、浸食深さを0、20、40、60(min)後にレーザー変位計を用いて測定した。

#### (3) 圧縮試験および割裂引張試験

両試験はφ50×100mmの円柱供試体を用いて行った。圧縮試験では両端面に硫黄キャッピングを施した。

### 4.4 実験結果

#### (1) 乾燥収縮試験

図-1、図-2に乾燥収縮率と材齢の関係、材齢21日における乾燥収縮率とセメント置換率の関係をそれぞれ示す。図-1から、材齢1週までの乾燥収縮がとくに大きいことが分かる。図-2から、乾燥収縮率はセメント置換率の増大とともに減少し、セメント置換率5%で無

表-1 Adobe の調査

セメント置換率(%)	単位重量(g/l)			V <sub>w</sub> /V <sub>a</sub> *1 (%)	V <sub>s</sub> /V <sub>sol</sub> *2 (%)	Air (%)	フロー値
	水	セメント	粘土 砂				
0	380	0	791 791	38	50	3.0	135
5	380	49	751 791	38	50	2.7	130
15	380	147	672 791	38	50	2.5	131
25	380	245	593 791	38	50	3.3	129
50	380	490	395 791	38	50	3.0	124

[注]\*1: V<sub>w</sub>/V<sub>a</sub>は、材料全体に対する水の容積率

\*2: V<sub>s</sub>/V<sub>sol</sub>は、固体材料に対する砂の容積率

表-2 試験方法と材齢 (実験 I)

試験方法	材齢(日)
乾燥収縮	0 - 21
侵食試験	21
圧縮試験	7, 14, 21, 28, 35, 42
割裂試験	7, 14, 21, 28, 35, 42

表-3 要因と水準 (実験 I)

要因	水準
セメント置換率[%]	0, 5, 15, 25, 50
試験時間*3	20, 40, 60

[注]\*3: 促進浸食試験のみ

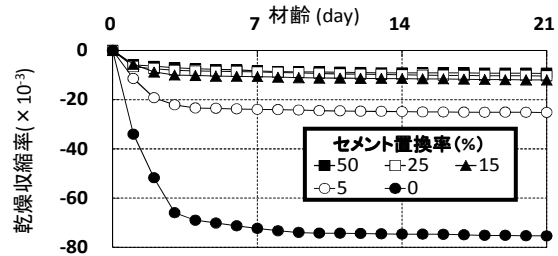


図-1 乾燥収縮率と材齢の関係

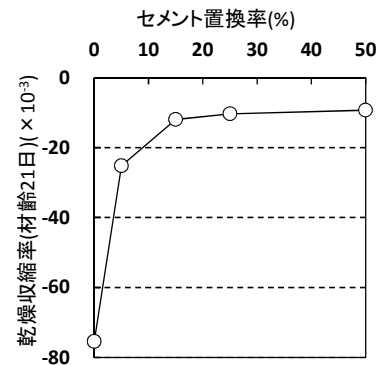


図-2 乾燥収縮率とセメント置換率の関係

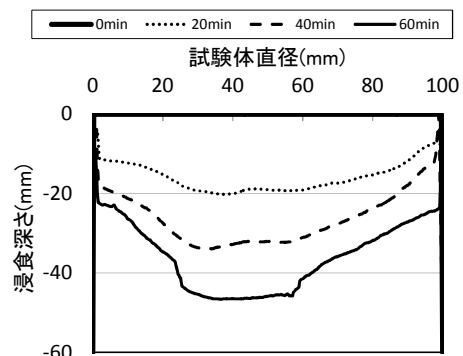


図-3 浸食深さの測定結果の例(セメント置換率0%)

置換の約 30%, セメント置換率 15%, 25%, 50% で無置換の約 15% に減少したことが分かる。

### (2) 促進浸食試験

図-3, 図-4 に促進浸食試験による浸食深さの測定結果, セメント置換率と最大浸食深さの関係をそれぞれ示す。浸食はセメント無置換の試験体のみに見られた。最も浸食の大きい中央部で 20 分ごとに 15mm 程度の浸食が発生し, 60 分後には 45mm となった。この時の浸食速度では約 0.75mm/min であった。一方, セメント置換した試験体では, 5% 置換しただけで, 試験終了時 (60min) においても浸食は発生せず, セメント置換により, 浸食抵抗性は飛躍的に改善された。これは, セメントの添加量が少量でも, Adobe の耐水性が飛躍的に, 向上することを示している。

### (3) 圧縮試験および割裂引張試験

図-5, 図-6 に, 圧縮強度とセメント置換率の関係および引張強度とセメント置換率の関係をそれぞれ示す。両強度共に, セメント置換率 5% の場合, 無置換に対して強度の低下が見られ, 置換率 15% 以上では強度は置換率の増加と共に増加した。置換率 5% で強度が低下した理由として, 乾燥収縮の低減によって空隙率が増加し, その影響がセメントによる結合力の増大効果を上回ったことが考えられる。

## 5. Adobe-目地要素の強度試験および破壊基準 (実験 II)

### 5.1 実験概要

Adobe 構造体のような組積造はブロックと目地からなる複合体のため, ブロック (要素 1) だけでなく, 目地 (要素 2) およびブロックと目地との境界部分 (要素 3. 以下, 界面と記載する) という各構成要素が存在する。構造体としての強度の把握には, 上記 3 要素を含む試験体としての性能が重要となってくる。そこで, ブロックと目地から成る要素で目地の引張付着試験およびせん断強度に関する評価試験を行い, その結果を用いて, 強度特性の把握および Adobe-目地要素の破壊基準の推定を試みた。試験方法および材齢を表-4 に示す。

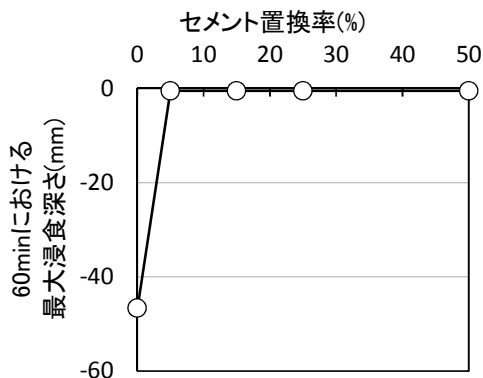


図-4 セメント置換率と最大浸食深さの関係

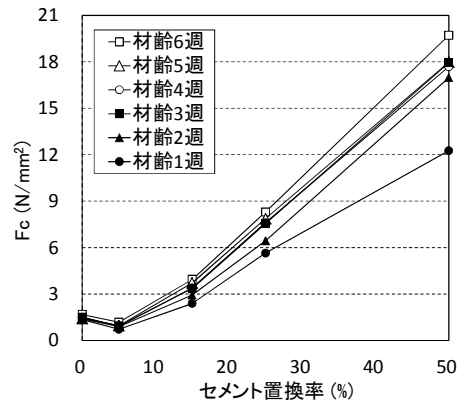


図-5 圧縮強度とセメント置換率の関係

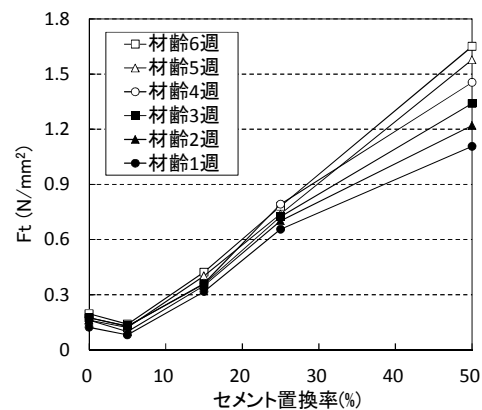


図-6 引張強度とセメント置換率の関係

表-4 試験方法と材齢 (実験 II)

試験方法	材齢 (日)
目地の引張付着試験	21(目地)
一面せん断試験・二面せん断試験	42(ブロック)

表-5 要因と水準 (実験 II)

要因	水準
セメント置換率 [%]	[Aシリーズ] 0, 5, 15, 25, 50 [Bシリーズ] 50(0)*4, 0(50)
角度*5 [°]	15, 30, 45
垂直応力*6 [N/mm²]	0, 0.05

[注]\*4: B シリーズにおいて, ( ) 外は目地のセメント置換率, ( ) 内はブロックのセメント置換率

\*5: 一面せん断試験のみ, \*6: 二面せん断試験のみ



写真-2 目地の引張付着試験状況

## 5.2 要因と水準

要因と水準を表-5に示す。セメント置換率はブロックと目地で同じ置換率を用いたもの(以下、Aシリーズ)、ブロックと目地で異なる置換率を用いたもの(以下、Bシリーズ)の2種で実験を行った。一面せん断試験においては目地角度を3水準、二面せん断試験においては、1階建ての建物の下端付近に発生する最大垂直応力と同等になる垂直応力  $0.05\text{N/mm}^2$  と、垂直応力なしの2水準に変化させた。

## 5.3 実験方法

### (1) 目地の引張付着試験

写真-2に目地の引張付着試験状況を示す。試験体は  $50 \times 50 \times 50\text{mm}$  (目地幅  $10\text{mm}$  含む) の角柱供試体とし、目地の接着面積は  $50 \times 50\text{mm}$  とした。両端面に鋼製プレートにエポキシ系接着剤で接着し、水平に配置して試験をした。1水準当たり、5体ずつ行った。

### (2) 一面せん断試験および二面せん断試験

一面および二面せん断試験の供試体概要と応力算定方法を、それぞれ図-7, 8に示す。一面せん断試験は、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。目地角度1水準当たり、3体ずつ行った。二面せん断試験については、ブロックに荷重  $P$  を載荷した状態を図-8(b)のように単純梁と仮定した。その構造に発生する曲げモーメントをせん断面に発生する曲げモーメントと仮定し、図-8(c)の計算方法から算出されるせん断面内の垂直応力  $\sigma$  およびせん断応力  $\tau$  の関係から断面内の応力分布を得た。垂直応力1水準当たり、2体ずつ行った。

## 5.4 実験結果

### (1) 目地の引張付着試験

全ての試験体において、ブロックと目地の界面で破壊した。図-9(a)に目地の引張試験結果(全試験体)を示す。

試験結果は、ばらつきが非常に大きいものとなった。ブロックと目地との材料同士の境界部分は、施工時における品質のばらつきも大きいと判断できる。Bシリーズにおいて、目地のみにセメント50%を置換した試験体(以下、50(0))では、セメントが入った目地を後から施工するので、水和反応により、弱点である目地の付着が補強され、セメント置換率0%の試験体よりも強度は大きくなる。しかし、試験体50(0)の強度が、セメント置換率0%の引張強度(図-6における材齢21日時のセメント置換率0%の  $F_t$  である  $0.174\text{N/mm}^2$ )を超えることはなかった。今回、目視では確認出来なかったが、破壊部にブロック材が非常に薄く付着し、界面ではなく、ブ

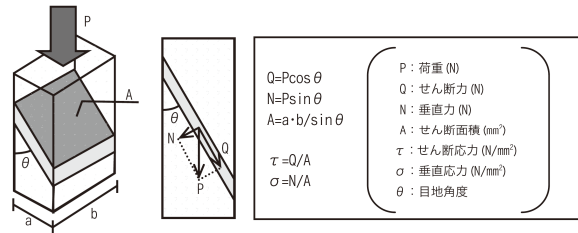
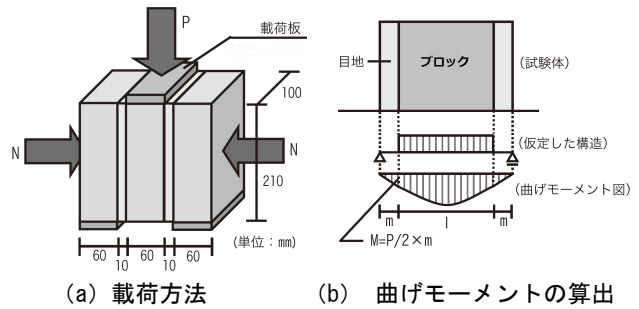
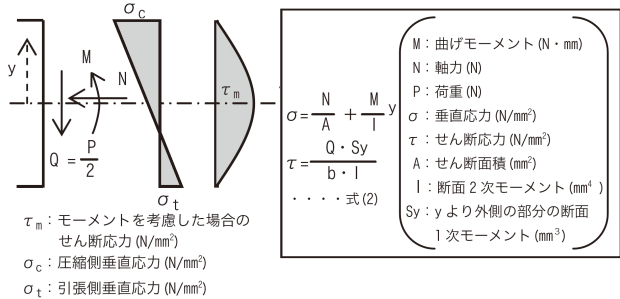


図-7 一面せん断試験の供試体と試験方法の概要



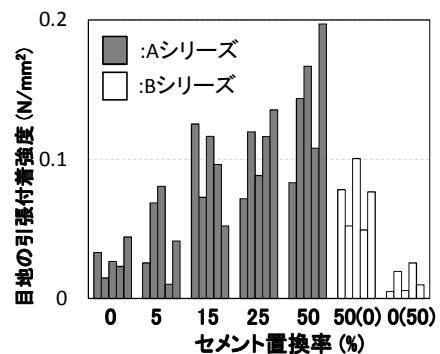
(a) 載荷方法

(b) 曲げモーメントの算出

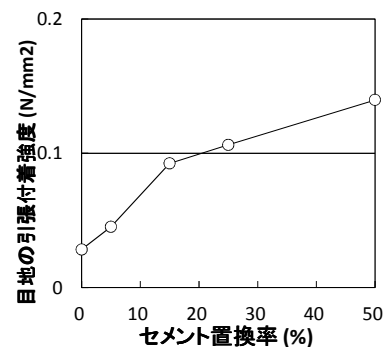


(c) 各応力の計算方法

図-8 二面せん断試験の供試体と試験方法の概要



(a) 全試験結果



(b) セメント置換率と  $F_t$  (平均値) の関係

図-9 目地の引張試験結果

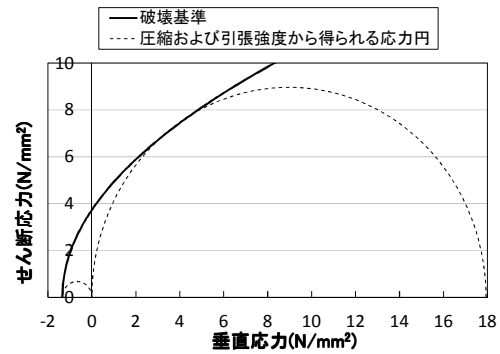
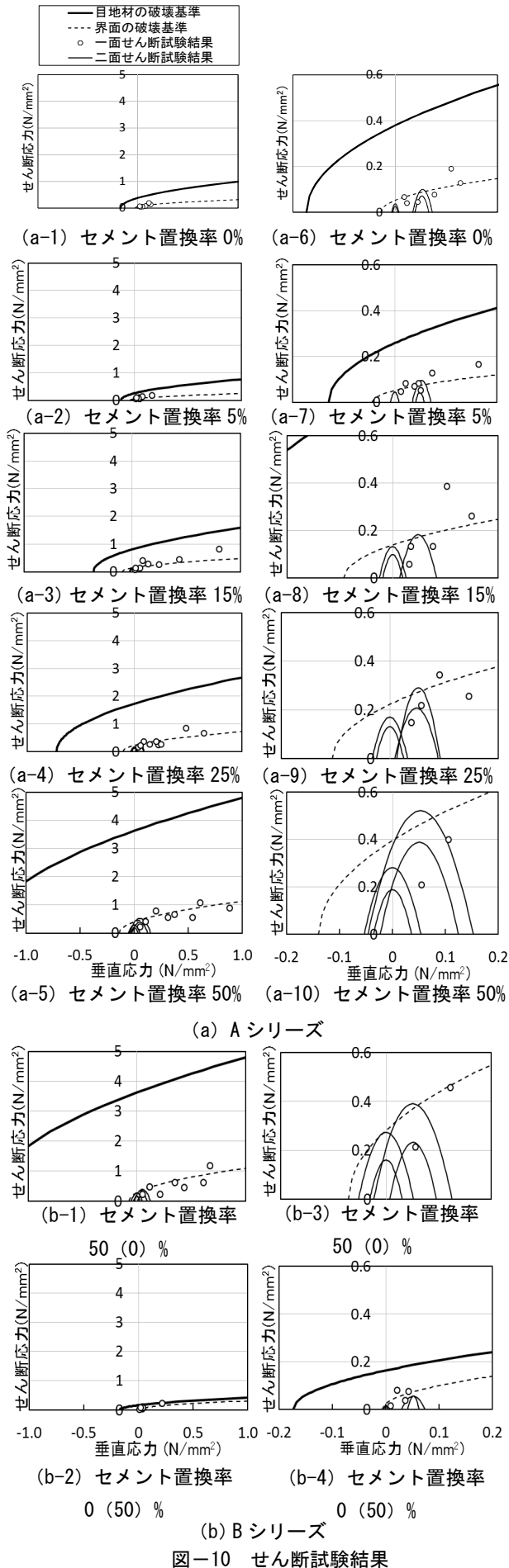
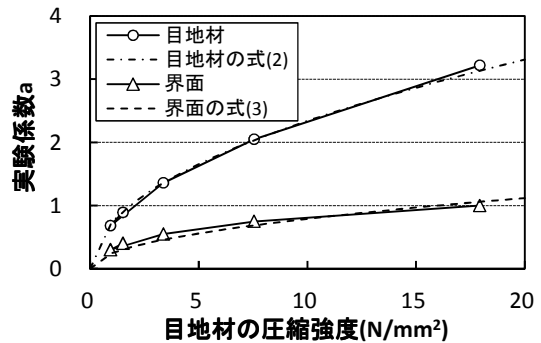


図-11 目地およびブロックの破壊基準の推定例 (セメント置換率 50%)

表-6 実験結果および実験定数

項目	セメント置換率(%)	破壊基準式: $\tau = a \times (\sigma + Ft)^{1/2}$					
		目地材			界面		
		a	Fc (N/mm <sup>2</sup> )	Ft (N/mm <sup>2</sup> )	a	Fc (N/mm <sup>2</sup> )	Ft (N/mm <sup>2</sup> )
結果	0	0.89	1.51	0.17	0.40	1.51	0.028
	5	0.68	0.94	0.13	0.30	0.94	0.045
	15	1.36	3.38	0.36	0.55	3.38	0.093
	25	2.05	7.55	0.73	0.75	7.55	0.106
	50	3.22	17.94	1.34	1.00	17.94	0.140
	50 (0)	3.22	17.94	1.34	0.95	17.94	0.071
算出方法	※	a: 目地材の圧縮および引張強度から得られる応力円の包絡線となるように算出			a: 式(1)を用いて一面せん断試験結果を近似して算出		
	粉体(粘土+セメント)中のセメントの容積置換率	Fc: 目地材の圧縮強度 Ft: 目地材の引張強度			Fc: 目地材の圧縮強度 Ft: 水平目地の直接引張試験から計算された引張線の軸応力の最大値		



ック部が破壊したと推察される。試験体 0 (50) は目地にセメントが入っていないため、界面の補強効果がなく、全試験水準の中で、最も低い引張強度となっている。

図-9 (b) に A シリーズにおけるセメント置換率と Ft (平均値) の関係を示す。試験結果を平均値と比較した場合、セメント置換率の増加と共に目地の引張強度は増加した。セメント無置換の試験体に対して、置換率 25% で約 3 倍、置換率 50% で約 6 倍まで強度は増加した。

## (2) セン断試験結果

図-10 に、一面および二面せん断試験結果と破壊基準推定式を併せて示す。また、図 10 (a-6) ~ (a-10) および (b-3) ~ (b-4) は、原点付近を拡大したものであ

り、それぞれ左図とセメント置換率が対応するように配置してある。また、一面せん断試験において、セメント置換率 0% で 2 体、5% で 2 体、15% で 1 体、50 (0) % で 2 体、0 (50) % で 4 体が載荷前に破壊したため、その分のプロットは割愛した。A シリーズでは、垂直応力に関わらず、セメント置換率の増大と共に、せん断応力は向上した。せん断応力はセメント無置換の試験体に対して、置換率 15%、25% で約 3 倍、置換率 50% で約 5 倍まで増加した。一方、B シリーズでは、目地の引張付着試験と同様に、目地だけにセメントを添加した場合には、A シリーズの試験体 0 (0) に比べ、改善効果が見られるが、ブロックのみにセメント添加した場合には、改善効果が見られなかった。

### 5.5 破壊基準推定式の形式の検討

前掲のせん断試験結果に対して、既往の破壊基準推定式<sup>5)・6)</sup> (1) の形式を適用して、破壊基準の推定を試みた。

$$\tau = a (\sigma + Ft)^b \quad (1)$$

ここに、 $\tau$ : せん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma$ : 垂直応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$Ft$ : 目地の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $a \cdot b$ : 実験定数

実験定数  $b$  については、既往の研究<sup>4)</sup> で用いられる 0.5 とした場合に、本実験結果においてもせん断試験結果と比較的良好な相関が得られた。したがって本研究においては  $b=0.5$  とした。

目地材およびブロック材における実験定数  $a$  については、図 11 に示すように、4.4. (3) 項における圧縮および引張強度試験から得た応力円の包絡曲線となるように決定した。界面の実験定数  $a$  は、目地の引張付着試験結果を X 切片とし、一面せん断試験に相関の良い曲線として最小二乗法を用いて近似した。その結果得られた、目地材および界面の実験定数  $a$  を表 6 に示す。図 12 に、実験定数  $a$  と目地およびブロック材の圧縮強度の関係を示す。各実験定数  $a$  は、目地材の圧縮強度の関数として以下のように表すことができた。

$$\text{目地およびブロック} : a = 0.74Fc^{0.5} \quad (2)$$

$$\text{界面} : a = 0.25Fc^{0.5} \quad (3)$$

ここに、 $Fc$ : 目地材およびブロックの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

また、図 10 に示す、界面の破壊基準と、二面せん断試験結果から得られた応力分布の放物線の比較からは、ばらつきはあるものの、二面せん断試験結果の最大値と破壊基準がほぼ接する位置にあり、両者は概ね対応していると見ることができる。ばらつきの一因として、図 9 (a) で示した目地の引張付着強度にばらつきが大きいことが挙げられる。

### 6. まとめ

本研究結果から以下の知見が得られた。

- 1) 乾燥収縮率は、セメント置換率の増大とともに減少し、セメント置換率 15%、25%、50% では、無置換の試験体の約 12~15% まで抑えることができた。
- 2) 浸食抵抗性は、セメント置換の試験体では 5% においても浸食は発生せず、セメントによる高い浸食抵抗性の改善効果が確認された。
- 3) 圧縮および引張強度は、セメント置換率 5% では強度の低下が見られた。強度が低下した理由として、乾燥収縮の低減によって空隙率が増加し、その影響がセメントによる結合力の増大効果を上回ったことが考えられる。置換率 15% 以上では強度は置換率の増加と共に増加した。
- 4) セメント置換率 15%~50% においては、乾燥収縮、強度、浸食抵抗の全てにおいて品質改善が可能であった。
- 5) セメントを加えることによる Adobe ブロック-目地要素のせん断強度の特性および改善効果が明らかとなった。
- 6) 実験 II において、本実験におけるせん断試験の結果から、Adobe 構造体のせん断強度に対して、既往の破壊基準式の適用が可能であることを確認した。
- 7) 本実験の範囲では、破壊基準式における係数  $a$  が目地材およびブロックの圧縮強度  $Fc$  の関数で表せることを示した。

### 参考文献

- 1) RASA Hashmatullah, MISHIMA Naoki, HATANAKA Shigemitsu : EFFECT OF COMBINED ADDITIVES ON IMPROVEMENT OF ADOBE BRICK CHARACTERISTICS , コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp549-554, 2009
- 2) 高橋宏幸, 三島直生, 畑中重光 : 普通ポルトランドセメントによるアドベの品質改善に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp. 955-956, 2011. 8
- 3) Regazzoni, P., Marot, D., Courivaud, J., Hanson, G.J., Wahl, T.L., : A COMPARISON BETWEEN THE EROSION TEST AND THE HOLE EROSION TEST, Inaugural International Conference of the Engineering Mechanics Institute, Minneapolis, Minnesota, pp1-7, 2008.5
- 4) 中浜貴生, 畑中重光, 三島直生 : 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, 日本建築学会構造系論文集 第 74 巻, 第 641 号, pp. 1225-1232, 2009. 7
- 5) 中浜貴生, 畑中重光, 三島直生, 旧三井製糸所の煉瓦および煉瓦目地の力学性評価に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻 第 658 号, pp. 2095-2104, 2010. 12