

論文

[1070] れんがブロックからなる組積プリズムの圧縮強度の発現機構に関する研究

正会員 ○平松道明 (近畿大学大学院)

正会員 村上雅英 (近畿大学理工学部)

正会員 窪田敏行 (近畿大学理工学部)

1. はじめに

組積プリズムの圧縮強度を推定するために、数多くの実験研究が行われている。しかしながら、ユニットの形状の多用性や材料強度のばらつきなどの影響が大きいため、理論的な研究は数が少ない。A.A.Hamidら[1]や馬場[2]は、特に、ユニットと目地モルタルの材料特性の違いによるグラウトしてないプリズムの圧縮強度の低下を考慮したプリズム圧縮強度の推定式を提案した。しかし、目地モルタルの強度が十分あり、ユニットがその圧縮強度まで圧縮力を負担できる場合でも、グラウトのポアソン効果による膨張のため、ユニットの割裂破壊によってグラウトとの一体性がなくなり、ユニットの負担圧縮力がその圧縮強度に達しない場合がある。このようなポアソン効果による破壊をとらえる方法として、馬場、千歩らは、ユニットとグラウトの圧縮破壊時の歪の大小関係より、破壊モードを判別して、それぞれの場合を対象とした推定式を弾性並列バネモデルから導き、推定結果が実験結果とほぼ対応することを示した[3]。

組積プリズムの圧縮強度を推定するに当たり、ユニットとグラウトの力学的性質の相違、すなわち、破壊寸前のグラウトの膨張によるユニットのグラウトへの拘束効果は無視できないものと思われる。そこで筆者らは、圧縮破壊時の歪がほぼ同じユニットとグラウトからなる組積プリズムについて比較実験を行い、圧縮破壊する付近ではユニットがグラウトの膨張を拘束しグラウトの圧縮強度が上昇することを、実験的に確認すると共にその理論的裏付けを行ってきた[4,5,6]。

本研究では、グラウトの膨張とユニットの拘束に注目することにより、圧縮破壊時の歪の異なるユニットとグラウトの組み合わせからなる組積プリズムの圧縮強度が素材の累加強度より低くなる原因を解明するとともに、既往の圧縮強度の推定式の妥当性を検討することを目的とする。

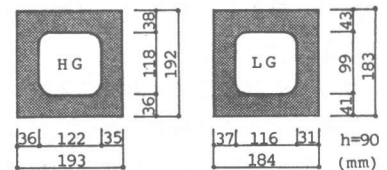


図-1 れんがブロックの形状寸法

表-1 プリズム試験体

NAME	NC	NN	JC	JN
SECTION				
NET AREA	Ac	Ac	Ac+Ab	Ac+Ab
BRICK	Cut	—	Cut	—
JOINT	—	—	Mortar	Mortar
	HG:Ab=232.86cm ² LG:Ab=231.73cm ²	Ac=144.65cm ² Ac=126.25cm ²	h=90mm j=10mm	

2. プリズム圧縮試験

閉鎖型空洞部に充填されたグラウトの圧縮強度は、ユニットがグラウトを拘束するため、1軸圧縮強度よりも高くなるのが、筆者らの比較実験によって確認されている[4,5]。そこで、本実験では、れんがの拘束圧が直接測定でき、また、解析の容易さを考慮して、図-1に示すような口型のユニットを用いた。れんがブロックは、その製造過程で製品ロットごとに外形寸法や力学的性質が微妙に異なる。本実験では、2種類のロットかられんがブロックを抽出し、表-1に示すようなプリズム試験

体を製作した。ロットによるユニットの識別は形状により行い、形状の良い方をHG (High-Grade)、悪い方をLG (Low-Grade) とした。累加強度式の各項の影響を調べるために、それぞれのプリズム試験体に用いるユニットを表-1に示すように加工した。NC (No joint & Cut) はグラウトの1軸圧縮強度を調べるものであり、NN (No joint & No cut) はグラウトの3軸圧縮強度を調べるものである。また、JC (Joint & Cut) はグラウトが1軸圧縮状態となる時のプリズム強度を調べるものであり、JN (Joint & No cut) はグラウトが3軸圧縮状態となる時のプリズム強度を調べるものである。グラウト (コンクリート) 設計基準強度については、RM設計規準を参考に $F_c = 180, 225, 270 \text{ kgf/cm}^2$ の3種類とした。

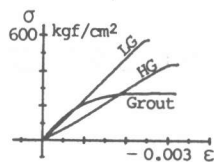


図-2 グラウトと組積単体の応力-歪関係

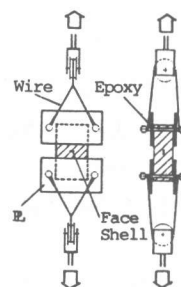


図-3 引張試験方法

グラウト (シリンダーによる) とユニットの材料試験結果を表-2に示す。同表に示すようにグラウトしてないプリズムの強度に悪影響を及ぼさないように、RM設計規準に従い目地モルタルの設計基準強度を設定した。図-2にグラウトとユニットの圧縮時の応力-歪関係を示す。ユニットの引張り試験は、図-3に示すように、ユニットのフェイスシェルを板状に切り取りエポキシで鉄板に接着し、ワイヤーと滑車を介して偏心荷重が作用しないように工夫した。

プリズム試験結果を表-3と図-4に示す。JNの圧縮強度は累加強度であるNNの圧縮強度とユニットの圧縮強度の和よりも低い。NCとNNでは $F_c = 225 \text{ kgf/cm}^2$ を除いて、ユニットの拘束のため3軸圧縮状態によるグラウトの強度増加の傾向が確認された。また、JNとJCでも圧縮強度の増加が認められた。しかし、JNとJCの強度増加の割合が、NN、NCの場合よりも大きい理由は、ユニットの拘束によるグラウト強度の増加の他に、後述するようにJCとJNの破壊モードが異なったためと考えられる。なお、本実験ではJNとJCの圧縮強度に関しては、グラウト強度の違いによる影響は見い出せなかった。

破壊状況に関しては、グラウトが1軸圧縮状態となるNCとJCでは、最大荷重に至る以前から徐々に横方向に膨張し始め、ユニットとグラウトの一体性が失われたのに対して、グラウトが3軸圧縮状態となるNNとJNでは最大荷重付近でユニットの隅角部に縦方向にひびが入り (割裂破壊)、その後、一瞬にしてユニットが弾き飛ばされて急激に強度が低下した。

表-2 材料試験結果一覧

(a) 圧縮強度

Name	Average	S.D.
Fc-180	232.5	5.7
Fc-225	275.2	4.5
Fc-270	335.9	11.2
Mor.	364.1	9.9
HG *	459.4	-
HG	(441.5)	2.7
LG *	606.4	-
LG	(575.5)	16.4

(): coupon test $3 \times 3 \times 6 \text{ (cm)}$

Mor.: joint mortar

* unit test Unit: kgf/cm^2

(b) 引張強度

Name	Average	S.D.
HG	34.3	0.8
LG	47.0	4.8

Unit: kgf/cm^2

表-3 プリズム試験結果一覧

Unit: ton (Pmax Average)

Prism	Unit	Pmax	Pieces
JN-180	HG	105.3	2
JN-180	LG	141.2	3
JC-180	HG	102.9	3
JC-180	LG	126.0	3
NN-180	LG	48.0	2
NC-180	LG	44.3	3
JN-225	HG	120.0	2
JN-225	LG	149.3	3
JC-225	HG	100.0	3
JC-225	LG	134.4	3
NN-225	LG	41.5	2
NC-225	LG	48.0	3
JN-270	HG	102.5	2
JN-270	LG	132.2	3
JC-270	HG	87.8	3
JC-270	LG	115.7	3
NN-270	LG	53.0	2
NC-270	LG	48.3	3

unit HG: Pmax = 103.3 ton

LG: Pmax = 135.3 ton

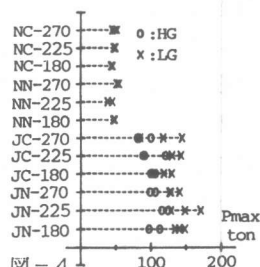


図-4 プリズム試験結果一覧

3. ユニットの拘束圧力によるグラウトの3軸圧縮強度の検討

ユニットの拘束力がグラウトの圧縮強度に及ぼす影響を調べることを目的として、図-5に示すようにユニットの内側からグラウトの膨張により生じる圧力に対応する油圧を空洞部に挿入したゴムチューブを介して作用させて、ユニットの拘束圧力を直接測定した。油圧（拘束圧力）はパスカルの原理を用いて圧縮試験機に表示される荷重の値より算出した。拘束圧力試験装置を圧縮試験機に挟む際、試験機とユニットの間の摩擦による影響を除くため、ユニットに圧縮力が作用しないように注意した。プリズム試験におけるNN、JNの破壊経過と同様、ユニットの隅角部に割裂破壊が発生した。すなわち、油圧による加圧試験時にユニットに生じている応力状態は、軸圧縮力による影響を除いてプリズム試験時のユニットに生じている応力状態をほぼ再現できているものと思われる。そこで、ユニットの内側の4隅に引張り応力の生じる方向（水平方向）の歪を測定し、引張り試験時の歪測定結果との比較を図-6に示す。拘束圧力試験では引張り試験の場合と異なり、かなりの曲げ引張り靱性が確認された。なお、本試験に用いたユニットは、個数の関係上HGのみである。

表-4に示すようにHGの拘束圧力の最大値は、 6.8kgf/cm^2 であり、引張り強度のばらつきが小さいため、油圧試験で得られた拘束圧力のばらつきも小さくなったものと思われる。

FEM弾性解析により得られる引張り主応力図を図-7に示す。また、油圧試験結果とFEMによる推定値の比較を表-5に示す。両者の相違は、FEMでは弾性状態であるのに対して、油圧試験では引張り側で塑性状態になっていたためである。

Mohr-Coulombの破壊基準 ($m = f_c / f_t = 4.1$ と仮定)を用いてグラウトの3軸圧縮強度を求め、NCとNNの実験結果との比較を表-6に示した。ここで、NCとNNに用いたユニットはLGであったため、LGによる拘束圧力をHGの油圧試験結果から得られた $P = 6.8\text{kgf/cm}^2$ にそれぞれの引張り強度の比を乗ずることにより、 $P = 9.4\text{kgf/cm}^2$ と推定した。 $F_c = 225\text{kgf/cm}^2$ では良好な実験結果が得られていないが、 $F_c = 180\text{kgf/cm}^2$ と 270kgf/cm^2 では実験結果

(NN)と解析結果はほぼ一致しており、ユニットの拘束によってグラウトの強度は約1.1倍になることが確認された。

4. プリズム圧縮強度の発現機構に関する検討

材料試験から得られたユニットとグラウトの応力-歪関係を図-8(a)に示す。また、同図(b)

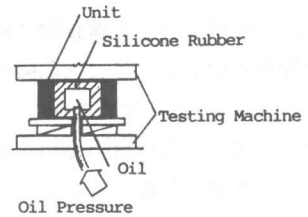


図-5 拘束圧の測定装置

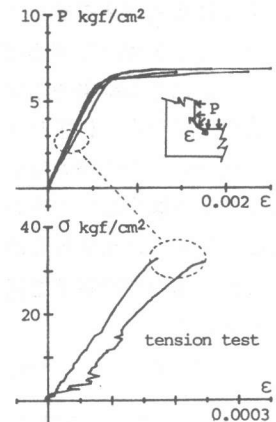


図-6 ユニット引張の応力-歪関係

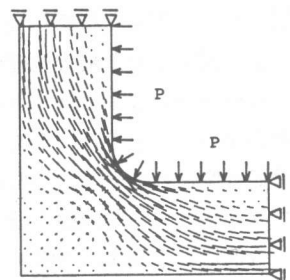


図-7 ユニット引張主応力図

表-4 油圧試験結果

Name	Pmax (kg)	σ max	Av.	S.D.
HG-1	995	6.9		
HG-2	973	6.7	6.8	0.1
HG-3	975	6.7		

Unit: kgf/cm^2

表-5 拘束圧と引張強度の関係

(kgf/cm^2)	Test	FEM
tension	34.3	66.0 *
Pressure	6.8	3.5 **

* Maximum tensile stress at corner when pressure is 6.8kgf/cm^2

** Pressure when tensile strength is 34.3kgf/cm^2

表-6 実験値と解析値の比較

F_c	NC	NN	cal.	*	**
180	44.3	48.0	49.2	1.1	1.1
225	48.0	41.5	52.9	1.1	0.9
270	48.3	53.0	53.2	1.1	1.1

*: cal/NC, **: NN/NC, Unit: ton

にJNのプリズム圧縮試験で計測されたユニットの圧縮歪の推移を示す。プリズム試験体中のユニットの最大圧縮歪は $\varepsilon_{gmax}=0.001$ 付近であり、両図よりプリズムの圧縮破壊時にはユニットの負担圧縮力は圧縮強度の約半分であったことが推定される。そこで、ユニットとグラウトの応力-歪関係を図-8(a)に示すような式(1)と(2)で置換し、式(3)のように並列バネモデルで表現できるものと仮定して、各プリズム試験体の圧縮強度から、最大圧縮歪 ε_{gmax} を算出し図-9にその結果を示す。ここでは、プリズムが破壊する直前にグラウトに生じる拘束圧力はユニットに作用している圧縮応力が圧縮強度の約半分であることから、引張り強度の低下は少ないと仮定して、式(2)中のグラウトの強度には、表-6に示すNCの圧縮強度(1軸圧縮強度)からMohr-Coulombの破壊基準を用いて推定した3軸圧縮強度を採用した。

$$\sigma_b = E_b \cdot \varepsilon_{gmax} \quad \text{----(1)}$$

$$\sigma_c = \frac{E_0 \cdot \varepsilon_{gmax}}{1 + [(E_0/ES) - 2] (\varepsilon_{gmax}/\varepsilon_{cg}) + (\varepsilon_{gmax}/\varepsilon_{cg})} \quad \text{----(2)}$$

$$P_{max} = A_c \cdot \sigma_c + A_b \cdot \sigma_b \quad \text{----(3)}$$

図-9に示すようにプリズム中のユニットに貼られた歪ゲージで測定された最大圧縮歪の実験値が計算値よりも小さくなった理由は、並列バネモデルでは目地モルタルの影響を無視していること、また、実験中に偏心が生じ一様圧縮歪が計測されていなかったためと思われる。グラウトとユニットの応力-歪曲線、縦歪-横歪曲線と並列バネモデルから推定した最大圧縮歪 ε_{gmax} の最小値と最大値との対応を図-10に示す。計算により推定された最大圧縮歪の最小値は $\varepsilon_{gmax}=0.0014(=0.7\varepsilon_{cg} : \varepsilon_{cg}=0.002 \text{と仮定})$ 付近であり、その時の応力は、グラウトの圧縮強度の85~90%である。その点以降でグラウトが横方向に膨張し始め、それに伴い圧縮剛性が低下している。

5. 圧縮強度の推定式に関する検討

筆者らは圧縮破壊時の歪がほぼ等しいユニットとグラウトを組み合わせたプリズムの圧縮強度が式(4)で推定できることを文献[4,5]で実験的に示した。しかし、本実験では、ユニットの圧縮破壊時の歪がグラウトよりも大きいため、

$$P_{max} = A_c \cdot f_{cg3} + A_b \cdot f_{cb} \quad \text{-(4)}$$

$$P_{max} = A_c \cdot f_{cg3} + \alpha \cdot A_b \cdot f_{cb} \quad \text{-(5)}$$

$$\alpha = \varepsilon_{gmax} / \varepsilon_{cu} \quad \text{-(6)}$$

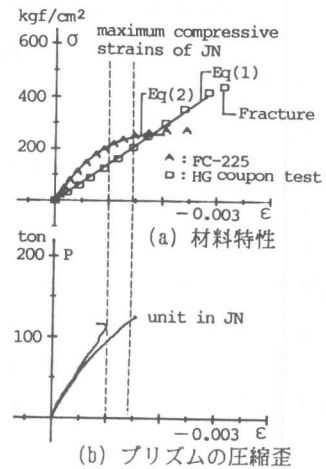


図-8 JNユニットの圧縮歪推移

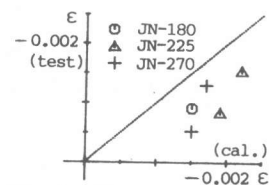


図-9 最大圧縮歪の計算値と実験値との比較

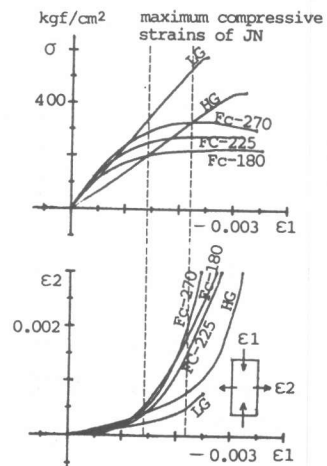


図-10 グラウトと組積単体の特性

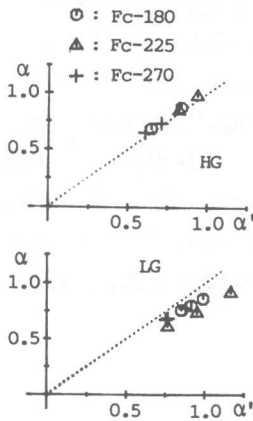


図-11 α の比較

表-7 推定値の算出方法

Prism	Unit	Grout + α X Ab.fb = Cal.			
JN-180	HG	44.3	14/28	102.8	95.7
		48.7	20/28	102.8	122.1
JN-180	LG	44.3	14/24	133.3	122.0
		48.7	20/24	133.3	159.8
JN-225	HG	48.0	14/28	102.8	99.4
		52.8	20/28	102.8	126.2
JN-225	LG	48.0	14/24	133.3	125.7
		52.8	20/24	133.3	163.9
JN-270	HG	48.3	14/28	102.8	99.7
		53.1	20/28	102.8	126.5
JN-270	LG	48.3	14/24	133.3	126.0
		53.1	20/24	133.3	164.2

Grout= Ac·fcg (for Min.) Unit:ton
Ac·1.1·fcg (for Max.) cm²
14/28=0.0014/0.0028, 20/28=0.002/0.0028
14/24=0.0014/0.0024, 20/24=0.002/0.0024

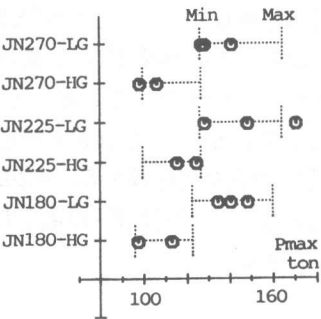


図-12

実験値と推定値の比較

プリズムが破壊する時にユニットの圧縮応力が圧縮強度に達していなかった。そこで、ユニットの負担圧縮力を求めるために式(5)に示すように低減係数 α を導入する。ここでは、プリズムが破壊する直前にはユニットの拘束によってグラウト強度が3軸圧縮強度になること、また、プリズムが破壊する時のグラウトの応力レベルは、グラウト圧縮強度の約90%であることを考慮して、グラウト強度としてMohr-Coulombの破壊基準から推定した3軸圧縮強度 f_{cg3} に0.9倍した値、すなわち、 $0.9 \times f_{cg3} = 0.9 \times 1.1 f_{cg} = f_{cg}$ (f_{cg} : 1軸圧縮強度)を用いて α の値を算出する。式(5)において、各プリズムの圧縮試験の実験値からグラウト強度に $0.9 \times f_{cg3} = f_{cg}$ を用いて逆算して得られた α' (横軸)とグラウト強度に f_{cg3} を用いて式(1)~(3)から得られた最大圧縮歪 ϵ_{gmax} より式(6)で算出された α (縦軸)の値は、図-11に示すようにほぼ一致している。

α の小さいプリズムは、グラウトが3軸圧縮強度に達する以前にポアソン効果によってユニットが割裂破壊して弾き飛ばされた試験体であり、 α の大きいプリズムは、ユニットの拘束によって、グラウトが3軸圧縮強度付近まで達した試験体である。そこで、破壊モード別にプリズムの圧縮強度の推定式を式(7)と式(8)に示す。

$$P_{max} = 0.9 \cdot A_c \cdot f_{cg3} + \alpha \cdot A_b \cdot f_{cb} = A_c \cdot f_{cg} + (0.7 \cdot \epsilon_{cg} / \epsilon_{cu}) A_b \cdot f_{cb} \quad \text{----(7)}$$

$$P_{max} = A_c \cdot f_{cg3} + \alpha \cdot A_b \cdot f_{cb} = 1.1 \cdot A_c \cdot f_{cg} + (\epsilon_{cg} / \epsilon_{cu}) A_b \cdot f_{cb} \quad \text{----(8)}$$

式(7)は3軸圧縮強度に達する以前にポアソン効果によってユニットが割裂破壊して弾き飛ばされる場合のプリズム圧縮強度の推定式であり、圧縮強度の最小値を与える。また、式(8)はグラウトが3軸圧縮強度に達するまで、ポアソン効果によるユニットの割裂破壊が生じなかった場合のプリズム圧縮強度の推定式であり、圧縮強度の最大値を与える。表-7と図-12に示すように大部分の実験値は両推定式の間にあり、推定式の本実験値への適応性は良好である。

馬場、千歩は圧縮プリズムの力学的性質を並列弾性バネモデルに置換して、プリズムの破壊モードの予測と圧縮強度の推定式を式(9)のように提案している[3]。

$$\eta' \geq 1 \text{ の場合} \quad \frac{F_{cm}}{(1-\beta) f_{cf}} = \frac{1}{\eta'} \left(1 + \frac{\beta \cdot E_g}{(1-\beta) E_f} \right)$$

$$\eta' \leq 1 \text{ の場合} \quad \frac{F_{cm}}{(1-\beta) f_{cf}} = 1 + \frac{\beta \cdot E_g}{(1-\beta) E_f} \quad \text{-----(9)}$$

式(9)中の η' は弾性バネモデルにおけるユニットとグラウトの圧縮破壊時の歪の比率であり、 $\eta' = (E_g/E_f) / (f_{cg}/f_{cf}) = \varepsilon_{cu}/\varepsilon_{cg} = \varepsilon_{cu}/\varepsilon_{gmax}$ を式(9)に代入してプリズム全断面積を乗じて、 $\alpha = 1/\eta'$ と関係づけることにより式(7)と同じ形式となる。ユニットの剛性がほぼ線形である場合には、式(9)はプリズムが破壊する時のグラウトの圧縮歪を $\varepsilon_{gmax} = f_{cg}/E_g$ として評価していることに対応する。そこで、本実験から得られたプリズム圧縮強度の下限値を推定する式(7)と式(9)の関係を調べるために、 $\varepsilon_{gmax} = 0.7 \times \varepsilon_{cg}$ と $\varepsilon_{gmax} = f_{cg}/E_g$ の関係を式(3)を用いて比較する。 E_g を $1/3 f_c$ 時の割線剛性とした場合、 $\varepsilon_{gmax} = f_{cg}/E_g = 0.44 \times \varepsilon_{cg}$ となり、式(9)は式(7)よりも安全値を与えている。なお、文献[4,5]で提案した式は、式(8)に対応する。

6. まとめ

グラウトの圧縮剛性の非線形性、ユニットの拘束によるグラウト圧縮強度の増加、また、プリズムの破壊に及ぼすポアソン効果の影響等を考慮して、グラウトが先に破壊する場合のプリズム圧縮強度の発現機構の解明を試みた。以下に本研究で得られた知見を示す。

本実験で用いたプリズムの圧縮強度は式(7)と式(8)でその下限値と上限値を推定することができる。式(7)はグラウトが圧縮強度に達する以前にポアソン効果によりプリズムが破壊するときの推定式であり、式(8)はユニットの拘束力による3軸圧縮状態でグラウトが圧縮強度に達した時の推定式である。

謝辞

実験に際しては、近畿大学理工学部建築学科卒業論文生、青木 靖弘、秋山 將陸、尾崎 勝昭、辻井 正氏の協力を得ました。また、試験体製作にあたり、セメントを大阪セメント(株)より提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] A.A.Hamid, R.G.Drysdale : Suggested Failure Criteria for Grouted Concrete masonry Under Axial Compression, ACI Journal Oct. 1979 [2] A.Baba : A Suggested Concept for Predicting Prism Strength, 7th International Brick masonry Conference, Feb. 1985, Melbourne, Australia [3] 馬場明生、千歩修：グラウトメーソリーの強度及び弾性係数の予測方法、コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1988 [4] 村上雅英、窪田敏行：れんがプリズムの圧縮強度に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1988 [5] 窪田敏行、村上雅英：圧縮力を受けるコンクリートブロックからなる組積プリズムの破壊挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1989 [6] 村上雅英、窪田敏行：圧縮力を受ける組積プリズムの破壊挙動に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1989

記号

A_c	グラウトの断面積	f_{cg3}	ユニットの拘束によるグラウトの3軸圧縮強度	F_m	プリズムの圧縮強度
A_b	ユニットの断面積			E_g	グラウトのヤング係数
β	ユニットの空洞率	ε_{cu}	ユニットの圧縮強度時歪	E_o	グラウトの初期剛性
P_{max}	プリズムの圧縮耐力	ε_{gmax}	プリズム破壊時のグラウトの圧縮歪 $=0.7\varepsilon_{cg}$	E_s	グラウトの圧縮強度時の割線剛性
f_{cg}	グラウトの1軸圧縮強度			$f_{cf} = f_{cb}$	
f_{cb}	ユニットの1軸圧縮強度	ε_{cg}	グラウトの圧縮強度時歪 $=0.002$		
E_b	ユニットのヤング係数	E_f	フェイスシェルのヤング係数 $=E_b$		