

論文 粗骨材にレンガを用いたコンクリートの圧縮強度と寸法効果

高橋 之^{*1}・鈴木 有美^{*2}・真田 靖士^{*3}

要旨: バングラデシュでは粗骨材に破碎したレンガを用いたコンクリートが使用されているが、その材料特性に関する知見は十分に得られていない。その一方で、建物の倒壊事故により耐震性能不足に対する懸念はあるが、耐震性能を評価する方法は確立されていない。本研究では耐震性能への影響が大きいコンクリート強度について、破碎レンガを用いたコンクリートを対象として圧縮強度を調べるための実験を行った。圧縮強度と水セメント比の関係を得るとともに、砂利を使用したコンクリートの実験結果に基づく寸法効果則が適用できることが分かった。

キーワード: コンクリート, 粗骨材, レンガ, 水セメント比, 寸法効果

1. はじめに

途上国では間仕切り用の壁がレンガで作られることが多いが、レンガを焼成する工程の中で、成形の観点から劣っているレンガや過剰に焼成されたレンガは不良品として扱われ、間仕切り壁に使用されない。石材が採れないバングラデシュでは、これらの不良品とみなされたレンガは破碎され、粗骨材としてコンクリートを作るために使用される¹⁾。破碎したレンガ（以下、レンガチップと呼ぶことにする）を使用したコンクリートは、鉄筋コンクリート構造の建物の構造部材にも使用されている。コンクリートの材料特性は、建物の耐震性能に大きく影響するにもかかわらず、レンガチップを用いたコンクリートの材料特性に関する知見は十分に得られていない。

本研究ではバングラデシュで使用されているレンガチップ入りのコンクリートを研究対象とし、円柱試験体の圧縮試験を行うことによって、圧縮強度およびヤング係数を調べることを目的とした。また、砂利を粗骨材とした一般的なコンクリートでは縮小試験体の実験で得られた知見をもとに建物の耐震性を評価しているが、レンガチップ入りのコンクリートを同様に扱うことが可能か検証するため、寸法効果に関する実験を行い、粗骨材に砂利を使用したコンクリートとの比較を行った。

2. レンガチップの作製

現在、日本で製造されているレンガは表-1に示す規格で分類されている。ただし、一般に流通しているレンガは最も吸水率が低く、また、最も圧縮強度が大きい上質なレンガである4種であり、その他のレンガは入手困難になっているのが実情である。一方、本研究の対象であるバングラデシュではレンガが1st Class

, 2nd Class および 3rd Class の3種類に分類されている。この中で最も品質が高いレンガが1st Class であり、吸水率および圧縮強度によって表-2²⁾に示すような3つのGradeに分類されている。また、1st Classの基準を満たさないもののうち、圧縮強度が7 N/mm²以上のものが2nd Class であり、これより圧縮強度が低く、吸水率が25%以下のものは3rd Class に分類される。

表-2に示す1st Classのレンガのうち、Grade Aのレンガがコンクリート用粗骨材として最も普及しているため、これを用いたコンクリートの材料特性を調べることにした。そのため、レンガを低温(およそ550℃)で焼成することによって日本で一般的に流通している表-1の4種のレンガよりも圧縮強度を低くすることを試みた。

レンガの寸法は、JIS規格では長手×小口×厚さが210 mm(±5.0 mm)×100 mm(±3.0 mm)×60 mm(±2.5 mm)と定められており(括弧内は許容差を表す)、本研究で使用したレンガもこの寸法で製造した。レンガの圧縮試験は文献2)にしたがって、乾燥状態のレンガを半分に切断し、上下面を平滑にするためにモルタルでキャッピングを行った(写真-1)。直径210 mmの隣接荷板を使用した圧縮試験後の様子を写真-2に示す。レンガの圧縮強度は20.5 N/mm²(2体平均)であり、

表-1 レンガのJIS規格

品質 \ 種類	2種	3種	4種
吸水率 (%)	15 以下	13 以下	10 以下
圧縮強度 (N/mm ²)	15 以上	20 以上	30 以上

表-2 BDS208²⁾による1st Classのレンガの分類

品質 \ Grade	B	A	S
吸水率 (%)	20 以下	15 以下	10 以下
圧縮強度 (N/mm ²)	13.75 以上	17.15 以上	27.45 以上

*1 大同大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科助教 Ph.D. (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科教授 博士(工学) (正会員)



写真-1 キャッピング後

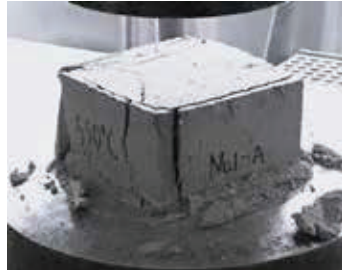


写真-2 圧縮試験後のレンガ



写真-3 破砕機



写真-4 篩い分け

表-2に示すGrade Aのレンガ相当の強度であった。また、レンガの吸水率試験(24時間常温の水中に保管)を行った結果、乾燥状態で2.96 kgのレンガ(実測した寸法は長手×小口×厚さ = 215 mm×103 mm×62.5 mm)が220 mlの水を吸水し、吸水率は7.4%となり、吸水率に関しては表-2のGrade S相当であった。このレンガの乾燥時および吸水後の密度はそれぞれ2.13 t/m³および2.29 t/m³であり、調合決定の際のレンガの密度はこの値を使用した。

製造したレンガは写真-3に示す破砕機を使用して破砕した。バングラデシュにおいても同様の破砕機を使用してレンガを破砕している。本研究では研究対象であるバングラデシュの实情に合わせて、骨材径が5 mm ~ 20 mmのレンガチップを粗骨材として使用した。破砕後のレンガチップは篩にかけ(写真-4)、粒度分布を測定した。粒度分布を表-3に示す。骨材径が5 mm以下および20 mm以上のものは使用していないため、供試体作製に使用したレンガチップは5 ~ 10 mmが53%、10 ~ 15 mmが42%、15 ~ 20 mmが5%である。これに対し、文献1)で使用されているレンガチップは10 mm未満が37.9%、12.5mm未満が59.5%となっており、本研究で使用した粗骨材は小さい粒径がやや多い傾向にあった。

3. 圧縮強度およびヤング係数に関する実験

3.1 試験体概要

試験体の作製に使用したコンクリートの調合を表-4に示す。試験体名は水粉体容積比-水セメント比-置換率の順に数値で表している。本研究では、セメントの一部を炭酸カルシウム微粉末で置換して異なる水セメント比の試験体を製作した。研究対象のバングラデシュでは、打設時に細砂を混入してセメント量を減らし、コスト削減をしていることがあり、細砂の混入がコンクリート強度に及ぼす影響を調べることが目的である。また、セメント量のみを変化させた場合には、スランプや空気量が安定しないことが報告されており³⁾、水粉体容積比は同一になるようにした。使用した炭酸カルシウム微粉末成分(平均粒子径75 μm)の化学成分を表-5に示す。水粉体容積比はセメントと炭酸カルシウム微粉末の容積の和に対する水の容積の比率で

表-3 粒度分布

径(mm)	重量(g)	割合(%)
~ 5	2098	41.8
5 ~ 10	1505	30.0
10 ~ 15	1222	24.3
15 ~ 20	128	2.6
20 ~	66	1.3

表-4 コンクリートの調合 (kg/m³)

供試体	水粉体容積比	水セメント比	置換率(%)	Water	Cement	CaCO ₃	Sand	Brick
1.9-60-0	1.9	60	0	212	354	0	596	959
1.9-85-30		85	30		248	88		
1.9-150-60		150	60		142	175		
2.8-90-0	2.8	90	0	288	320	0	539	867
2.8-130-30		130	30		224	79		
2.8-225-60		225	60		128	158		
3.8-120-0	3.8	120	0	351	292	0	492	791
3.8-170-30		170	30		204	72		
3.8-300-60		300	60		117	145		
4.7-150-0	4.7	150	0	403	269	0	452	727
4.7-210-30		210	30		188	66		
4.7-370-60		370	60		108	133		

表-5 炭酸カルシウム微粉末の成分

成分(%)				塩化物イオン量(%)	密度(g/cm ³)
CaCO ₃	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃		
≥95	≤5	≤0.5	≤1	≤0.02	≥2.6

定義しており、置換率はセメントと炭酸カルシウム微粉末の容積の和に対する炭酸カルシウム微粉末の容積の割合で定義している。例えば、試験体1.9-60-30は試験体1.9-60-0と粉体容積(セメントと炭酸カルシウム微粉末の容積の和)は同一であるが、粉体の全容積のうち30%は炭酸カルシウム微粉末であることを表している。バングラデシュでは柱などの構造部材は、セメント:砂:レンガ=1:2:4の容積比で調合されることが一般的であり、本研究でもこの比率を踏襲し、粉体(セメント+炭酸カルシウム微粉末):砂:レンガ=1:2:4としている。バングラデシュでは近年、台湾などから輸入したセメントが一般的に使用されており、日本で用いられているセメントと成分に大差がないことから、本研究では日本で流通しているセメントを使用した。細骨材は山砂:川砂=4:1の割合で使用した。

材料の練混ぜは手作業で行った。レンガチップは練混ぜの前日に水に浸しておき、表-4に示す水を吸収

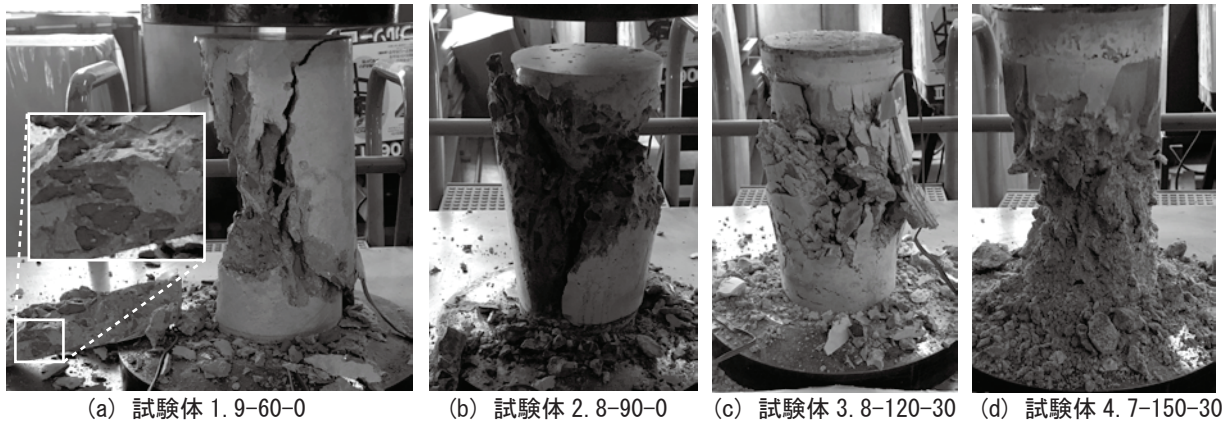


写真-5 圧縮試験での破壊の様子

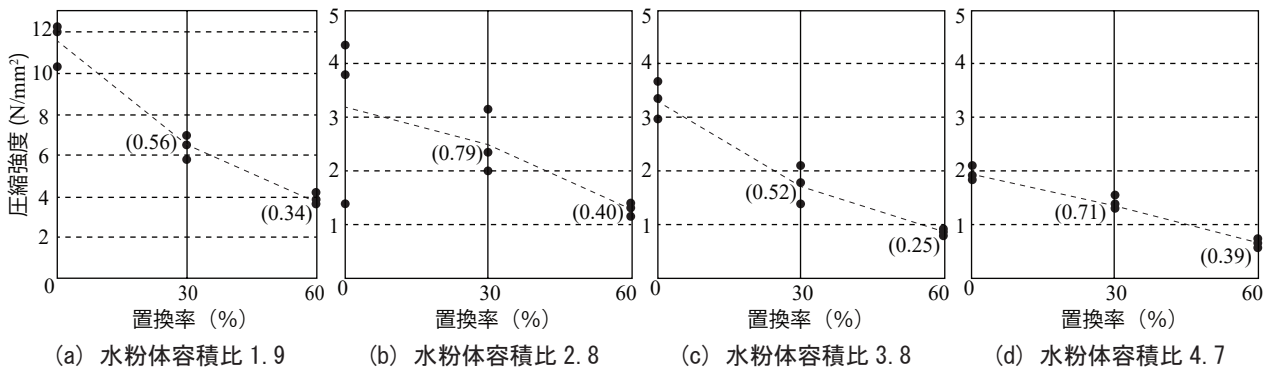


図-1 圧縮試験の結果

しないようにした。水に浸したレンガチップは、練混ぜ前に水から取り出し、なるべく表乾状態に近づくように気中にさらした。

3.2 養生および実験方法

練混ぜたコンクリートは直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱試験体用型枠に打設した。打設面を平滑にするため、モルタルでキャッピングをした。水粉体容積比が 1.9 および 2.8 の試験体は、打設の翌日にキャッピングを行ったが、水粉体容積比が 3.8 および 4.7 の試験体は表面に水分が残っていたため、水分が逸散したことを目視で確認してからキャッピングを行った。脱型および圧縮試験は材齢 28 日で行った。

圧縮試験は万能試験機を用いて行った。円柱試験体のひずみは、試験体に貼り付けた 2 枚のひずみゲージで測定し、その平均値を試験体のひずみとして扱うことにした。

3.3 実験結果

各試験体はそれぞれ 3 体ずつ圧縮試験を行った。試験体 1.9-60-0 のうち 1 体の実験後の様子を写真-5(a) に示す。本研究で使用したレンガの圧縮強度は前述のように 20.5 N/mm² と小さく、写真-5(a) に白の枠線で示したように、粗骨材であるレンガチップを貫通するような破壊が観察された。試験体 2.8-90-0、3.8-120-30 および 4.7-150-30 の破壊の様子をそれぞれ写真-5(b)、(c) および (d) に示す。これらの試験体でもレンガを横切る破壊が生じていた。

水粉体容積比が 1.9 の試験体の圧縮強度を図-1(a) に示す。図中の破線は 3 体の平均を表している。置換率が 0 でも圧縮強度の平均が 11.6 N/mm² と小さく、炭酸カルシウム微粉末を 30%、60% と増やしていくと、圧縮強度の平均値は 6.5 N/mm²、3.9 N/mm² と減少していった。置換率が 0 の試験体の圧縮強度を 1 とした時の置換率 30%、60% の試験体の圧縮強度はそれぞれ 0.56、0.34 であり、図中に括弧で示している。

水粉体容積比が 2.8、3.8、および 4.7 の圧縮強度試験結果をそれぞれ図-1(b)、(c)、および (d) に示す。これらの試験体でも炭酸カルシウム微粉末の置換率が大きくなるにつれて圧縮強度は減少している。なお、図-1(b) に示されているように、水粉体容積比が 2.8 で置換率が 0 の試験体は 1 体だけ圧縮強度が他の試験体と大きく異なるものがあったが、それ以外の試験体ではばらつきは小さかった。以上のことから、炭酸カルシウム微粉末の置換率による圧縮強度の低下は、水粉体容積比によらず概ね等しいことが分かった。

各試験体のヤング係数の平均値を圧縮強度と併せて表-6 に示す。ヤング係数はひずみ度がおよそ 50 μ の点と応力度が圧縮強度の 1/3 程度の点の 2 点を直線で結び、その直線の勾配として定義した。水粉体容積比が 3.8 および 4.7 の試験体は圧縮強度が低いため、上述のように定義してヤング係数を算出する上で十分な測定が行われていなかったため、表中に N/A で示している。表-6 より、置換率の増加にしたがってヤング係数が

表-6 圧縮試験結果

水粉体容積比	置換率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
1.9	0	11.58	8717
	30	6.46	7460
	60	3.89	4276
2.8	0	3.18	4847
	30	2.51	3381
	60	1.28	2224
3.8	0	3.32	3397
	30	1.73	N/A
	60	0.82	N/A
4.7	0	1.91	N/A
	30	1.35	1422
	60	0.74	528

減少する傾向が見られた。また、水粉体容積比や置換率が異なっても、圧縮強度が近い試験体はヤング係数も近くなる傾向が確認された。

3.4 粗骨材に砂利を用いたコンクリートとの比較

本研究ではレンガチップを粗骨材として使用しているが、砂利を粗骨材として使用している一般的なコンクリートとの比較を行うために、山本ら⁴⁾および川上ら³⁾による実験結果との比較を行う。文献3)および4)では粗骨材に砂利を使用したコンクリートに対し、炭酸カルシウム微粉末を入れて圧縮試験を行っている。そのうち、セメントと炭酸カルシウムの合計に対する水の比率が65%の実験結果と本研究の水粉体容積比が1.9のシリーズの比較を図-2に示す。レンガチップを用いた本実験のコンクリートは置換率を30%から60%に増加させた際の強度の低下が緩やかだが、粗骨材の種類にかかわらず置換率の増加に伴って圧縮強度が概ね直線的に減少する傾向が確認された。

4. 寸法効果に関する実験

4.1 実験概要

粗骨材に砂利を使用したコンクリートの寸法効果に関する研究は多数あり、谷川ら⁵⁾は試験体寸法と骨材寸法の比を用いて寸法効果を表示することが出来ると結論付けており、本実験ではこれを踏まえて試験体寸法と粗骨材寸法を実験変数として試験体を製作した。また、Visoら⁶⁾の研究では試験体の形状が寸法効果に影響を及ぼすことも指摘されている。そこで、試験体は円柱試験体と角柱試験体の2種類を使用することにした。

試験体寸法は、φ50×100 mm、φ100×200 mm および φ150×300 mm の円柱試験体3種類（直径と高さの比は全て1:2）と、50×50×100 mm、100×100×200 mm および 150×150×300 mm の角柱試験体3種類（底面の1辺

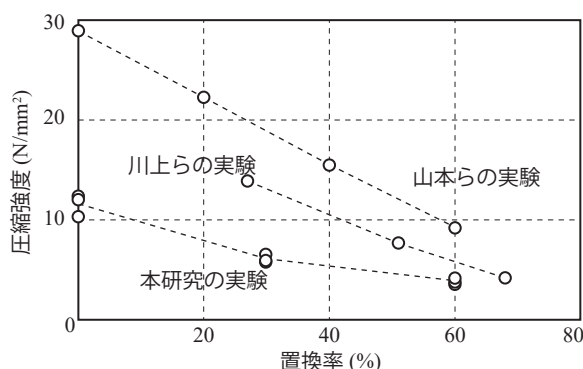


図-2 粗骨材が砂利の実験との比較

の長さ)と試験体高さの比は全て1:2)とした。骨材寸法による圧縮試験の影響を調査するため、使用する骨材は5~10、5~15、5~20 mmの破碎レンガを表-7に示す内訳で調査している。コンクリートの調査は表-4の試験体1.9-60-0と同一である。試験体分類の最初の文字はCが円柱試験体、Pが円柱試験体を示しており、次の文字が粗骨材寸法を示している。円柱試験体φ50×100 mmで最大粗骨材寸法が20 mmのものをCL50シリーズと表記する。

4.2 圧縮強度試験結果

実験で得られた各試験体の圧縮強度を図-3に示す。図の縦軸は圧縮強度、横軸は試験体寸法となっている。ここで、試験体寸法とは、円柱試験体の場合は底面の直径を表しており、角柱試験体の場合は底面の1辺の長さを表している。基本的には、寸法が大きくなるにつれて圧縮強度が低くなる傾向が現れている。しかし、円柱試験体のみ、試験体寸法が100 mmのものとして150 mmのものを比較すると、試験体寸法が大きいほうが圧縮強度がわずかに上昇する結果となった。図-3は骨材寸法の違いによる影響もあるため、次節以降で細かく検討していく。

4.3 試験体寸法が圧縮強度に及ぼす影響

粗骨材に砂利を使用したコンクリートに関する既往の研究では、骨材寸法を同一として試験体寸法を変化させた場合、試験体寸法が大きくなると強度が小さくなることが報告されている^{7),8)}。本研究で使用したコンクリートでも同様の傾向が現れるかを調べるため、骨材寸法を同一とし、試験体寸法のみを変化させた試験体の実験結果の比較を図-4に示す。骨材寸法が同じで試験体寸法を変化させた場合の寸法効果については

表-7 粗骨材寸法の配合

試験体	G(Brick) [kg/m ³]		
	5-10(mm)	10-15(mm)	15-20(mm)
CL・PL シリーズ	959.0	—	—
CM・PM シリーズ	479.5	479.5	—
CS・PS シリーズ	319.6	319.6	319.6

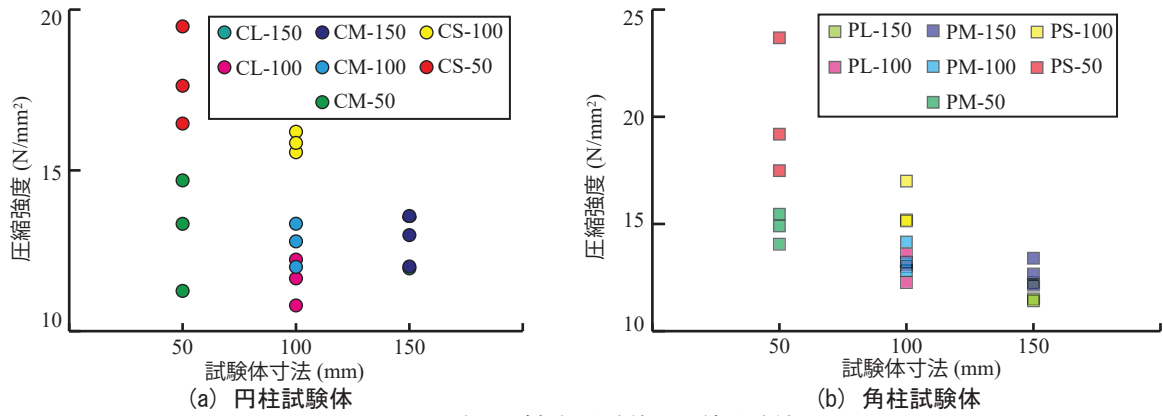


図-3 円柱及び角柱試験体の圧縮試験結果

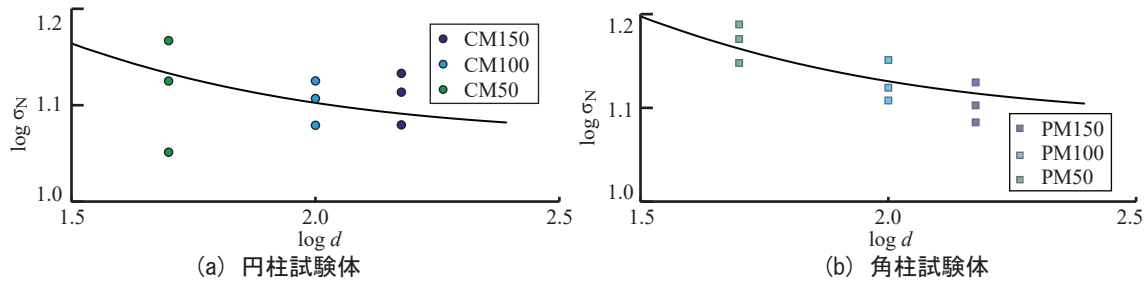


図-4 実験結果と寸法効果則の比較

Bazant の寸法効果則⁷⁾および Carpinteri の寸法効果則⁸⁾が広く知られているが、文献9)にも示されているように、本研究で用いた試験体の範囲ではどちらの寸法効果則も大差がない。そこで Carpinteri の寸法効果則⁸⁾の適用の可否を検討するために、文献9)に示されている次式で計算した結果も図-4に併せて示している。

$$\sigma_N = f_c \sqrt{1 + \frac{l_{ch}}{d}} \quad (1)$$

ここで、 σ_N : 圧縮強度

f_c : 寸法が無限大の試験体における圧縮強度

l_{ch} : 特性長さ

d : 試験体寸法

式(1)における f_c および l_{ch} は文献9)と同様に、実験結果から最小二乗法により算出した。図-4(a)の円柱試験体の場合には、試験体寸法が50 mmの実験結果のばらつきが大きく、最も強度が低かった試験体は式(1)の評価式で求められる値からは離れている。一方、図-4(b)に示す角柱試験体では、どの試験体も式(1)の評価式で求められる値との対応が良い。以上より、破砕レンガを粗骨材に使用したコンクリートの場合でも、既往の寸法効果則がおおむね適用できることが確認できた。

4.3 試験体骨材寸法比が同じ試験体の比較

本研究では、骨材寸法も実験変数としているため、本節では試験体骨材寸法比が同一の試験体の比較を行う。ここで、試験体骨材寸法比とは、試験体寸法（円柱試験体の場合は円の直径、角柱試験体の場合は底面の1辺の長さ）の最大骨材寸法に対する比である。

図-5(a)は、試験体骨材寸法比が5の実験結果を比較したものである。円柱試験体の平均値を実線で、角柱試験体の平均値を破線で示している。円柱試験体、角柱試験体ともに試験体寸法が大きくなると圧縮強度は顕著に下がっている。また、平均値を比較すると、角柱試験体の方が圧縮強度が高くなる傾向があった。しかし、試験体形状に依らず、圧縮強度の低下の割合（実線および破線の傾き）は同程度であることが確認された。試験体骨材寸法比が10の実験結果を図-5(b)に示す。試験体骨材寸法比が10の場合では、圧縮強度および試験体寸法を大きくした場合の圧縮強度の低下の割合はともに試験体の形状に依らず同程度であった。以上より、試験体骨材寸法比が同じ試験体で比較を行っても、寸法効果は明確に現れた。

4.4 骨材寸法が圧縮強度に及ぼす影響

試験体の寸法が同一で、骨材の寸法のみを変化させた場合の比較結果を図-5(c)に示す。図-5(c)に示した試験体は全て試験体寸法が100 mm（円柱試験体は直径が100 mm、角柱試験体は底面の1辺が100 mm）であり、縦軸を圧縮強度、横軸を最大骨材寸法としている。この図より、円柱試験体、角柱試験体ともに最大骨材寸法を大きくすると圧縮強度が低くなる傾向がある。ただし、本実験では、角柱試験体の方が円柱試験体よりも圧縮強度の低下が緩やかになる傾向があった。また、最大骨材寸法が大きくなるにつれて、圧縮強度の低下の割合が緩やかになる傾向が確認された。

一方、粗骨材に砂利を使用した既往の実験でも、骨材寸法を大きくすると圧縮強度が低下する傾向が確認

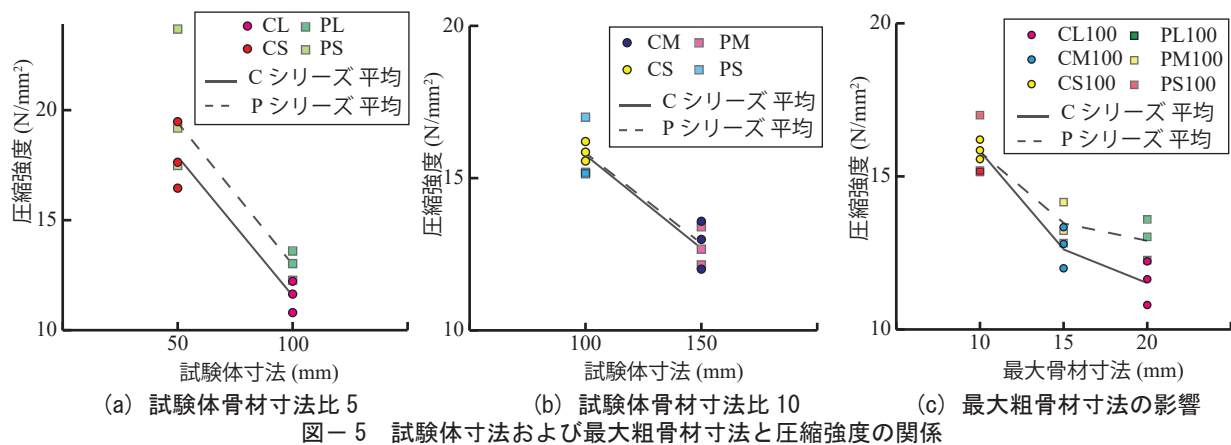


図-5 試験体寸法および最大粗骨材寸法と圧縮強度の関係

されている。ただし、文献5)では粗骨材を大きくするほど圧縮強度の低下の割合が大きくなることが指摘されており、本研究とは傾向が異なっていた。本研究では粗骨材として使用したレンガの強度が小さいため、前述のように粗骨材を横切る破壊が観察された。破壊面の違いが粗骨材寸法と圧縮強度の関係に影響している可能性が考えられる。

5. まとめ

本研究ではレンガチップを粗骨材として使用したコンクリートの一軸圧縮強度試験を行った。使用したレンガチップは低温焼成したレンガ（圧縮強度は20.5 N/mm²）を破碎して作製し、以下の結果が得られた。

1. 圧縮強度は水セメント比60%でも11.6 N/mm²と低く、水粉体容積比および炭酸カルシウム微粉末への置換率を増加させるにつれて（つまり、水セメント比が増加するにつれて）圧縮強度は低下した。
2. 圧縮強度が低い試験体はヤング係数も低くなっており、水粉体容積比や置換率が異なっても圧縮強度が同程度の供試体ではヤング係数も同程度であった。
3. 砂利を粗骨材とした既往の実験結果との比較より、圧縮強度およびヤング係数は粗骨材にレンガを使用したコンクリートの方が低くなった。また、圧縮強度と置換率の関係は粗骨材の種類によらず、概ね比例関係が成立していた。
4. レンガチップの寸法を同一とし、試験体寸法のみを変化させた試験体の比較では、試験体寸法が大きくなるほど圧縮強度が低下した。また、粗骨材に砂利を用いた実験をもとにした既往の寸法効果則⁸⁾による評価ができることを確認した。
5. レンガチップの最大寸法に対する試験体寸法の比を同一とした試験体の比較においても、試験体寸法が大きくなるにつれて圧縮強度が低下した。
6. 試験体寸法を同一とし、レンガチップの最大寸法を変化させた試験体の比較では、レンガチップの最大

寸法が大きいかうが圧縮強度が低下した。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構（JST）および国際協力機構（JICA）による地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）（研究代表者：中埜良昭東京大学教授）の支援により実施しました。

参考文献

- 1) Mohammad A. Mansur et al.: Crushed Bricks as Coarse Aggregate for Concrete, ACI Material Journal, Vol. 96, No. 4, pp. 478-484, 1999
- 2) Bangladesh Standards and Testing Institution: BDS208 Common Building Clay Bricks, 2002
- 3) 川上裕佳, 高月行治, 藤原顕太郎, 根口百世, 南宏一: 低強度コンクリート部材の耐震性能評価に関する基礎研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp. 333-334, 2007. 8
- 4) 山本泰稔, 片桐太一, 秋山友昭, J. F. トンプソン: 低強度コンクリート系における接着系アンカー筋の荷重伝達能力, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 553-558, 2000. 7
- 5) 谷川恭雄, 山田和夫: コンクリートの圧縮強度の寸法効果について, 日本建築学会論文報告集, No. 262, pp. 13-21, 1977
- 6) J. R. del Viso et al.: Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete, Cement and Concrete Research, No. 38, pp. 386-395, 2007
- 7) Z. P. Bazant: Size Effect in Blunt Fracture, Concrete, Rock, Metal, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 518-535, 1984
- 8) A. Carpinteri, B. Chiaia and G. Ferro: Multifractal Scaling Law for the Nominal Strength Variation of Concrete Structures, Size Effect in Concrete Structures, E&FN Spon, pp. 193-206, 1994
- 9) A. Carpinteri, G. Ferro and I. Monetto: Scale effects in uniaxially compressed concrete specimens, Magazine of Concrete Research, Vol. 51, No. 3, pp. 217-225, 1999