

# 論文 版築ブロックの強度特性に関する基礎的研究

杉山 晴香\*1・今本 啓一\*2・清原 千鶴\*3

**要旨：**鉄骨-版築ブロック複合構造システムの開発を目指し、荒木田土を用いた版築ブロックの強度特性に及ぼす調合の検討を行うとともに、超音波伝播速度から版築ブロックの圧縮強度およびヤング係数の推定を行った。その結果、安定した強度の版築ブロックの作製には水分量を制御し、材齢 14 日の封緘養生が必要であることが分かった。また、陸砂を混合することで圧縮強度の向上が確認できた。さらに、水分量を制御する上で重要な土の含水比は静電容量を測定することで概ね推定可能であることを示した。そして、超音波試験により非破壊的に版築ブロックの圧縮強度およびヤング係数の推定が可能であることを示した。

**キーワード：**版築ブロック、結合材、圧縮強度、ヤング係数、超音波伝播速度

## 1. はじめに

版築とは、土壁などの築造法の一つであり、歴史的建造物のみならず現代建築として発展途上国を中心に広く普及をみせている。また、版築工法は、土を主原料とし、締固めにより築造するため、環境への負荷が小さく、先進国でも再認識されつつある。

本研究では、地産地消型の版築ブロックと鉄骨部材を融合させた新しい構造システムの開発を目指している。この構造システムでは、版築ブロックが鉛直力とせん断力を負担し、鉄骨部材が水平力を負担するものと考えている。そして、鉄骨-版築ブロック複合構造の剛性や耐力を評価するためには、製造した版築ブロックの強度特性やヤング係数を把握することが重要となってくる。

そこで、本論では、版築ブロックに関する基礎的研究として、強度特性に及ぼす最適な調合選定および施工方法について検討を行うとともに、非破壊試験である超音波試験機を用いて超音波伝播速度から版築ブロックの圧縮強度およびヤング係数の推定が可能か検討を行った。

## 2. 結合材の強度発現性状（実験 1）

### 2.1 実験概要

本実験では結合材に圧縮強度の向上が期待でき、かつ環境負荷の少ない環境配慮型の土壌硬化剤を使用した。結合材の物性を表-1 に示す。ここでは使用する結合材の強度発現性状を確認するため結合材単体ペーストを作製し、水結合材比および養生期間を変えて実験を行った。

### 2.2 調合および供試体作製方法

調合割合を表-2 に示す。本実験では、水結合材比（W/B）および養生方法の違いによる結合材単体の固化性能の違いを確認することを目的とし、表-2 に示す材齢で、圧縮強度試験（JIS A 1108）を行った。

モルタルミキサを用いて練混ぜを行い、型枠にはφ50

×100mm のプラモールドを用いて、円柱供試体を各条件に対し3本作製した。なお、打込み数の関係上 W/B=100, 125%は材齢 1 日のみ 2 本とした。材齢 1 日で脱型し、試験開始材齢まで気中養生（20°C, 60%R.H.）とした。養生条件の違いを確認するために、一部の供試体は打込み直後から材齢 7, 28 日まで封緘養生とした。

### 2.2 実験結果および考察

圧縮強度試験結果を図-1 に示す。気中養生の場合、W/B=75%を除き材齢 28 日で強度低下が見られた。よって、材齢 14 日前後に圧縮強度のピークがある可能性が示された。封緘養生の場合、材齢 28 日で全てにおいて強度向上が見られた。また、W/B が小さくなるほど、圧縮強度が大きくなることを確認できた。

表-1 結合材の物性

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
結合材	3.2	7640

表-2 調合割合

No.	W/B (%)	B	W	養生方法	試験開始材齢 (日)
1	35	1	0.35	封緘養生 気中養生	1 (封緘)
2	50	1	0.50		7 (封緘, 気中)
3	75	1	0.75		15 (気中)
4	100	1	1		28 (封緘, 気中)
5	125	1	1.25		

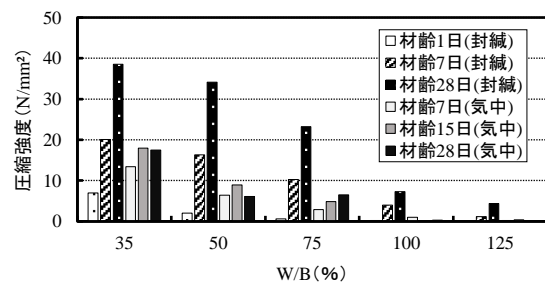


図-1 圧縮強度試験結果

\*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士課程 (学生会員)

\*2 東京理科大学 工学部第二部建築学科 教授 (正会員)

\*3 東京理科大学 工学部第二部建築学科 嘱託助教 (正会員)

### 3. 版築ブロックの力学特性に及ぼす調合の影響 (実験2)

#### 3.1 実験概要

実験2では、版築ブロックの力学特性に及ぼす調合の影響を検討するために、2つの実験を実施した。実験2-1では、荒木田土のみを用いた版築ブロックおよび荒木田土+陸砂を用いた版築ブロックの強度特性に及ぼす最適な水分量および締め固め方法の検討を行うとともに、荒木田土の粒径差による影響を検討した。また、既往論文より圧縮強度  $2\text{N/mm}^2$  を目標とし、供試体を作製した。実験2-2では、実験1の結果を基に、鉄骨(H形鋼)と版築ブロックのモックアップ試験用供試体としてヤング係数が  $10\text{kN/mm}^2$  程度になる調合について検討を行うとともに水分量が圧縮強度に及ぼす影響について検討した。

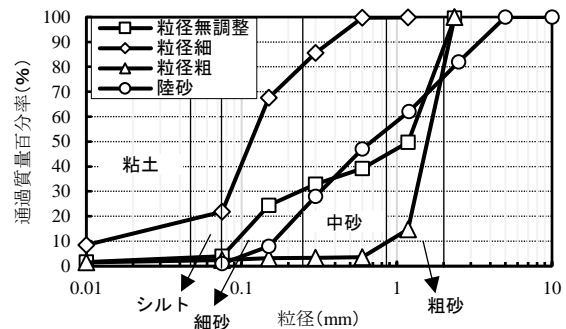
#### 3.2 使用材料および調合

使用材料および使用した土・骨材の粒径加積曲線を表-3、図-2に示す。荒木田土は、JIS Z 8801 試験用ふるい(目開き  $1.18\text{mm}$ ) を利用し、植物片や石を除去したものを用いた。

各実験の調合割合を表-4に示す。土の粒度および調合の組み合わせが異なる26種類を作製した。表-4に示すように、構成材料は「荒木田土のみ」、「陸砂のみ」および「荒木田土+陸砂」の3水準とした。養生方法は封緘養生とし、封緘養生後は脱型し  $20^\circ\text{C}$ 、 $60\%\text{R.H.}$  の恒温恒湿室にて所定の試験材齢まで気中養生を行った。また、図-3に示すように、実験2-1から、水分量が既往研究の最適含水比(乾燥密度が最大となる含水比のことで、

表-3 使用材料

使用材料	記号	比重 ( $\text{g/cm}^3$ )	表乾 密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	絶乾 密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	吸水率 (%)
荒木田土	S	1.1	埼玉県川越産		
陸砂		—	2.59	2.54	2.07
結合材	B	3.2	—	—	—
水	W	上水道水			



※粒径細・粗： $1.18\text{mm}$  ふるい通過分・残留分

図-2 粒径加積曲線

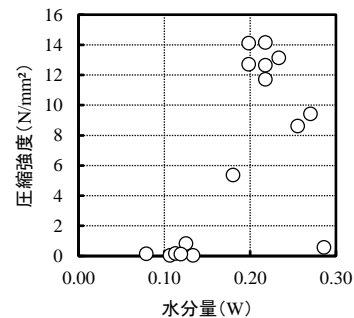


図-3 水分量および圧縮強度の関係

表-4 調合割合(質量比)および実験水準

	No.	含水比 (%)	W/B (%)	B/S	S		B	W	養生方法	試験開始材齢 (日)
					荒木田土	陸砂				
実験 2-1	1	34.9	69.8	0.50	細1	—	0.50	0.35	封緘養生	14, 29, 91 封緘
	2	60	120	0.50	細1	—	0.50	0.60		
	3	60	96.8	0.62	細1	—	0.62	0.60		
	4	40	64.5	0.62	細1	—	0.62	0.40		
	5	60	80	0.75	細1	—	0.75	0.60		
	6	54.8	68.4	0.80	細1	—	0.80	0.55		
	7	45	72.6	0.62	細0.7 粗0.3	—	0.62	0.45		
	8	45	72.6	0.62	細0.5 粗0.5	—	0.62	0.45		
	9	45	72.6	0.62	粗1	—	0.62	0.45		
	10	45.3	75.5	0.60	細0.7	0.3	0.60	0.45		
	11	32	53.4	0.60	細0.5	0.5	0.60	0.32		
	12	31	51.7	0.60	細0.2	0.8	0.60	0.31		
	13	47.5	76.6	0.62	—	1	0.62	0.47		
実験 2-2	14	35	50	0.69	0.34	0.15	0.34	0.17	封緘養生 封緘+気中	7, 14 封緘 7 封緘+7, 14 気中 14 封緘+7 気中
	15	36	55	0.64	0.35	0.15	0.32	0.18		
	16	35	60	0.61	0.36	0.15	0.31	0.18		
	17	35	63	0.59	0.36	0.15	0.30	0.18	封緘養生	12, 14, 174, 202 封緘 14 封緘+3, 6 気中
	18	39	70	0.61	0.34	0.15	0.30	0.19		
	19	57	80	0.70	0.31	0.13	0.31	0.25	封緘養生	14, 28
	20	15	75	0.20	0.74	—	0.15	0.11		
	21	36	80	0.45	0.55	—	0.25	0.20	封緘養生	14, 28
	22	33	100	0.33	0.60	—	0.20	0.20		
	23	32	120	0.27	0.63	—	0.17	0.20		
24	19	65	0.30	0.67	—	0.20	0.13			
25	18	80	0.23	0.71	—	0.16	0.13			
26	18	100	0.18	0.74	—	0.13	0.13			

※実験2：全体を1としたときの調合割合(質量比)、荒木田土は粒径が細かいものを使用

※No.24~26：モックアップ試験に合わせて打込み、養生、強度試験を実施

本実験では含水比 24%を基準とする。) <sup>2)</sup>を下回るとき版築ブロックの圧縮強度は得られないと考えられたため、No.21～26 で水分量による圧縮強度への影響を検討した。

### 3.3 供試体作製方法

モルタルミキサを用いて練混ぜを行い、型枠には、JIS R 5201 に規定された 3 連式鋼製型枠を用いて 1 層あたり各 16 回の締固めを 4 層分行い 40×40×160mm の角柱供試体を各条件に対し作製した。締固めには 100g の突き棒を用いており、4 層各 16 回の締固めによる密度は 250g/cm<sup>3</sup>である。また、層間の密着性を高めるため、下の層に凹凸を付けた後、次の層を充填した<sup>1)</sup>。

### 3.4 実験方法

実験項目を表-5 に示し、各試験方法を以下に示す。

#### (1) 静電容量試験

使用した荒木土土および陸砂の含水比の簡易的な測定方法を検討するために、含水比を 0, 5, 10, 15, 20, 25%に調整し、深さ 3cm の容器に入れ、上から高周波水分計を押しあてて静電容量を測定した。

#### (2) フレッシュ性状試験

『JIS R 5201 セメントの物理試験方法』に準拠し、0 打および 15 打におけるフロー試験を行った。

#### (3) 圧縮強度試験

『JIS R 5201 セメントの物理試験方法』に準拠し、圧縮強度試験を行った。また、版築ブロックにはひずみゲージを貼り付け、圧縮強度試験時のひずみの測定を行い、

版築ブロックのヤング係数の算出を行った。

#### (3) 超音波試験

圧縮強度試験前の試験体を用いて透過法により超音波伝播速度の測定を行った。測定は載荷面および側面の 2 面で行い、5 秒間隔で 5 回測定した平均値を用いることとした。

### 3.5 実験結果および考察

#### (1) フレッシュ性状試験

フロー試験結果を図-4 に示す。フロー値 100mm 程度の調査が多いが、中には 200mm を超える調査もある。図-5 に含水比と 15 打フロー値の関係を示す。含水比が 20%未満あるいは 60%以上においてフロー値が大きくなっている。

練り上がりの状態やフロー試験中の状態を見てみると、含水比が 20%未満の場合は、粉体状に近い状態で 15 回の打撃を加える間に崩れ、打込み時の締固めが困難であった。含水比 60%以上においては、ペースト状でほとんど締固めを行わずに打込みできる状態であることが確認できた。一方、15 打フロー値が 100mm 程度においては、5mm 程度のダマが認められるが、締固めると容易に潰れる状態であった。これらのことから、15 打フロー値が 100mm 程度になるように水分量を調整することが望ましいと考える。なお、本実験では各調査 2 回ずつ測定を実施したが、ばらつきは見られず版築ブロックにおいても同様な試験方法で測定が可能であると考えられる。

表-5 実験項目

実験項目	実験番号	No.	試験体寸法 (mm)	本数	試験開始材齢 (日)
静電容量試験	—	—	—	—	—
フレッシュ性状試験 (0, 15 打フロー値)	実験 2-1, 2-2	1~26	—	—	—
圧縮強度試験	実験 2-1	1~13	40×40×80 <sup>*1</sup>	各 2 本	14, 29, 91 <sup>*4</sup>
		14~16	40×40×80 <sup>*1</sup>	各 2 本	7, 14, 28
	17, 18	各 12 本 <sup>*2</sup>		14, 17, 20, 202	
	19	6 本 <sup>*3</sup>		12, 174	
	実験 2-2	20~26	40×40×80 <sup>*1</sup>	各 3 本	14, 28
17, 18		各 6 本		202	
超音波試験	実験 2-2	19	40×40×80 <sup>*1</sup>	2 本	174
		20~26		各 3 本	14, 28
		20~26		各 3 本	14, 28

\*1:JIS 規格に準拠し、40×40×160mm を半分にしたもの

\*2:No.17→14 封緘 4 本,14 封緘+6 気中 2 本,202 封緘 6 本, No.18→14 封緘,14 封緘+3.6 気中 各 2 本,202 封緘 6 本

\*3:No.19→12 封緘 4 本,174 封緘 2 本

\*4: No.2~5, 7~9 では、材齢 29, 91 日強度試験実施せず

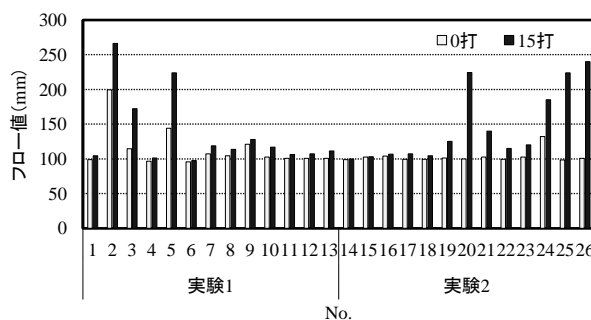


図-4 フロー試験結果

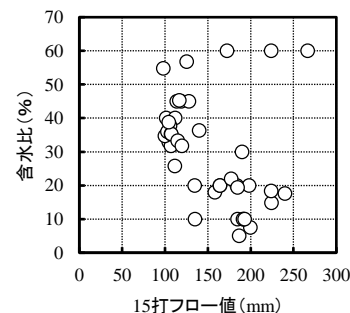


図-5 含水比と 15 打フロー値の関係

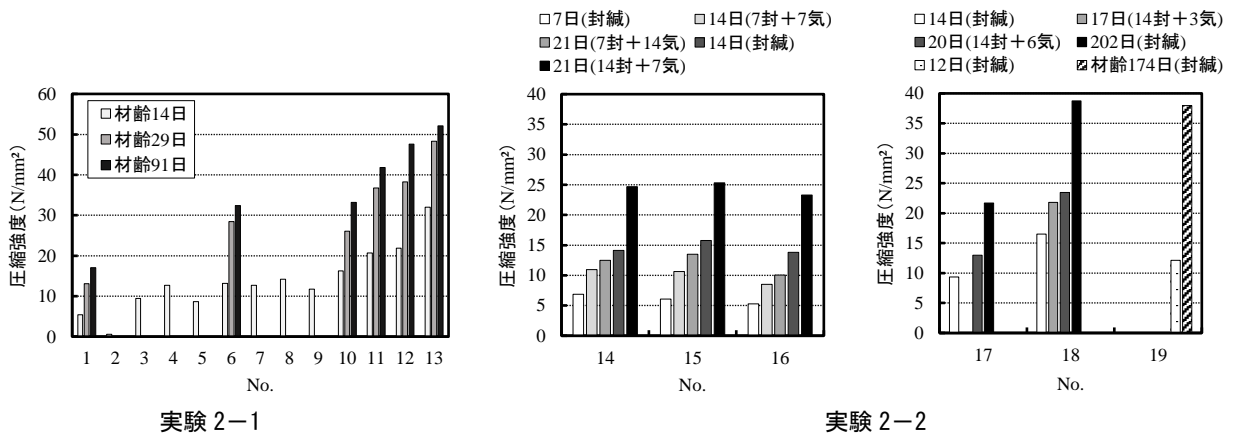


図-6 圧縮強度試験結果

(2) 圧縮強度試験：実験 2-1

図-6 に圧縮強度試験結果を示す。本実験においては低強度になるほど圧縮強度の変動係数が大きくなり最大で 25%程度であったが、圧縮強度が 30N/mm<sup>2</sup>以上になると 10%の範囲内に収まっていることから本測定方法が、版築ブロックに適用できるものとして以下の考察を行った。

No.1~9 の荒木田土のみでは、圧縮強度のばらつきが多い。また、No.7~9 より荒木田土の粒径差による圧縮強度への影響はほとんど見られない。図-7 に示す陸砂混合率と圧縮強度の関係(陸砂 0%は No.4 とする)から、荒木田土にコンクリート用細骨材である陸砂を加えることで、荒木田土のみにおける圧縮強度の最大値から比べて 1.5 倍程度の強度向上が見られた。また、結合材量が等しいとき、陸砂の混合率が高くなるにつれて強度が向上することが分かった。版築における圧縮強度は締められた試験体自体の材料密度の影響を受け、密実に締められたものほど強度が高くなる。本実験においては、細かな粒子の荒木田土のみを用いた場合に比べて粗い粒子の陸砂を混合して幅広い粒度の土を用いることで締め固めによって密実な状態になったことに加えて荒木田土と比較し陸砂の密度が大きいことから圧縮強度が向上したものと考えられる。なお、細骨材が版築に及ぼす影響については本実験とは相反する結果も示されていることから、結合材の種類による影響も考えられる。圧縮強度に及ぼす材料の種類や構成割合については今後も検討していきたい。

図-8 に示す水結合材比と圧縮強度の関係(荒木田土のみ)から、W/B=68.4~69.8%とわずかな水結合材比の差において急激な圧縮強度の低下が確認できた。このことより、練混ぜ時に加える水量の微調整が重要になると言える。そのため、使用する土の含水比を正確に把握することが必要となる。そこで、土の含水比の判定方法として、高周波水分計による静電容量の適用を検討した。高周波水分計を用いた静電容量の測定結果を表-6、図-9

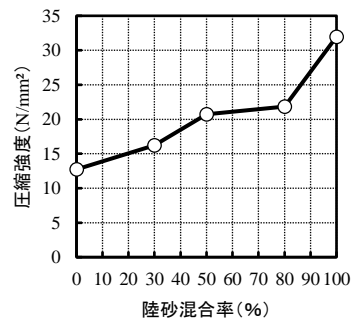


図-7 陸砂混合率と圧縮強度の関係

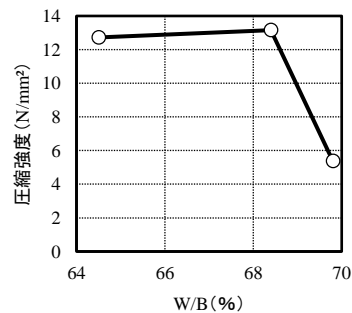


図-8 水結合材比と圧縮強度の関係

表-6 静電容量測定結果

含水比(%)	0	5	10	15	20	25	
静電容量	179	455	493	605	861	1328	
(F)	陸砂	137	284	397	653	957	-

9 に示す。若干のばらつきはあるが、骨材の種類によらず含水比が高くなるにつれて静電容量の値も高くなる傾向を示し、両者に高い相関性が見られた。このことから、静電容量の測定により簡便に使用する土の含水比の推定が可能だと言える。

(3) 圧縮強度試験：実験 2-2

図-6 に示す No.14~16 の圧縮強度試験結果より、7 日または 14 日間の封緘養生を行った供試体に対して 7 日間の気中養生を行うことで、共に、1.6~1.7 倍程度の圧縮強度の向上が確認できた。また、7 日間の封緘養生を

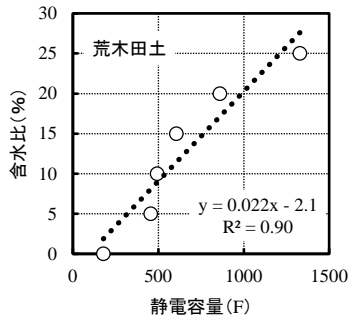


図-9 含水比と静電容量の関係

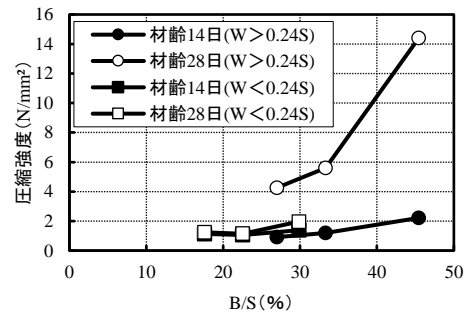
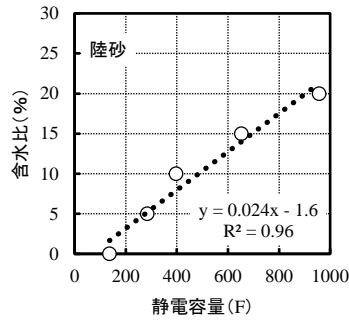


図-10 結合材量と圧縮強度の関係

行った後に 7 日および 14 日間の気中養生を行った供試体の圧縮強度は、14 日間の封緘養生を行った供試体よりも圧縮強度は低くなる結果となった。よって、打込み後 14 日間の封緘養生を行うことでより安定した強度の版築ブロックが得られると考えられる。

図-6 に示す No.18, 19 の圧縮強度試験結果より、長期間の封緘養生により材齢 14 日の圧縮強度に対して 2~3 倍程度の強度向上が確認できた。図-10 に No.21~26 の結合材量 (B/S) と圧縮強度の関係を示す。材齢 14 日の時点ではどの調合も圧縮強度はほとんど得られなかったが、材齢 28 日になると、水分量が最適含水比を上回る (W>0.24S) 調合 (No.21~23) の場合、2~6.5 倍程度の圧縮強度の向上が確認できた。また、結合材量に応じて、圧縮強度の増加量が大幅に異なるため、今後、最適な結合材量に関する検討が必要だと考える。一方で、水分量が最適含水比を下回る (W<0.24S) 調合 (No.24~26) の場合、圧縮強度の向上は全くもって見られなかった。このことから、最適含水比を上回る水分量が必要だと言える。

#### (4) ヤング係数

図-11 に応力-ひずみ曲線の一例を示す。本実験では応力-ひずみ曲線の関係から縦ひずみが  $1000 \times 10^{-6}$  までの範囲で弾性域となる傾向が見られたため、ここでは、版築ブロックの応力-ひずみ曲線の原点と  $1000 \times 10^{-6}$  となる点を結んだときの傾きを版築ブロックのヤング係数と定義した。版築ブロックのヤング係数算出方法については引き続きデータを蓄積し、検討を行う予定である。

圧縮強度とヤング係数の関係を図-12 に示す。図中にはコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係式<sup>3)</sup>である式(1)を用いて、 $\gamma=1.9$  (版築供試体の平均値) として算出した値を実線で示している。

$$E_c = 2.1 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.3}\right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{F_c}{20}} \quad (1)$$

ここに、 $E_c$ : ヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma$ : 単位体積重量の平均値  $\gamma=1.9$  (g/cm<sup>3</sup>)

$F_c$ : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

ばらつきはみられるが、版築ブロックにおいてもコン

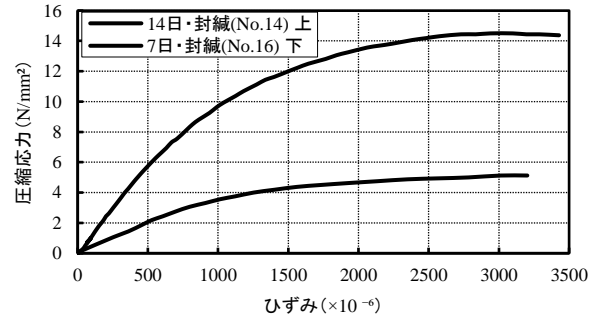


図-11 応力-ひずみ曲線一例

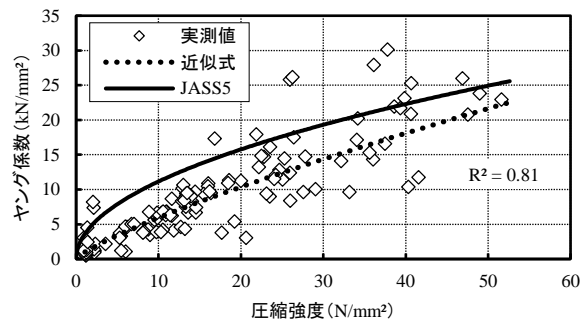


図-12 圧縮強度とヤング係数の関係

クリートと同様に圧縮強度の値が高くなるにつれてヤング係数の値も高くなる傾向が見られ、圧縮強度とヤング係数の間に高い相関性が確認できた。一方、図-12 に示すように、コンクリートの予測式である式(1)に対しては、同一圧縮強度時のヤング係数の値は実測値の方が低くなる結果となった。このことから、版築ブロックはコンクリートと同一の強度発現が得られても締固めて成型するために変形しやすい材料であることが確認できた。そこで、圧縮強度とヤング係数の関係式を式(2)で表すこととした。式(2)を用いた近似曲線を図-12 中に点線で示している。両者の相関性は 0.81 であった。

$$E_R = 0.87 \times 10^4 \times \left(\frac{F_R}{15}\right)^{0.85} \quad (2)$$

ここに、 $E_R$ : 版築ブロックのヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$F_R$ : 版築ブロックの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

版築-鉄骨複合構造の開発においては、変形性能を把握することは重要であると考えられる。本実験では単一

の土のみを利用しているため今後は、さまざまな地域の土を用いた場合に本予測式が適用可能かどうか検討を続ける予定である。

#### (5) 超音波試験

超音波伝播速度と圧縮強度の関係を図-13に示す。コンクリートに関しては、超音波伝播速度が速くなるにつれて圧縮強度の値が高くなる傾向が見られており、高い相関性が確認されていたが、本実験で版築ブロックにおいても同様の傾向が見られ、超音波伝播速度と圧縮強度の間に高い相関性が確認できた。ここでは、低強度域まで対応できるようにするため、既往の研究<sup>4)</sup>と同様に、両者の関係を指数関数で近似することとした。また、既往研究<sup>4)</sup>と比較して、圧縮強度の値が等しいとき、コンクリートよりも版築ブロックの超音波伝播速度の方が遅くなるのが分かった。これは、版築ブロックが土を主原料とし、かつ締固めにより作製されているため、緻密なコンクリートと比較して組織構造が大きく異なるためだと考えられる。

超音波伝播速度とヤング係数の関係を図-14に示す。ばらつきは見られるものの超音波伝播速度が速くなるにつれてヤング係数の値も高くなる傾向が見られ、超音波伝播速度とヤング係数の間に高い相関性が確認できた。

以上を踏まえ、超音波試験により非破壊的に版築ブロックの圧縮強度およびヤング係数を推定できる可能性が示唆された。版築ブロックは地産地消の材料を使用するため地域によって同一の調合であっても異なる力学特性が得られることが考えられる。そのため、非破壊試験によって版築ブロックの力学特性がおおよそ把握できることは重要であると思われる。今後も引き続きデータを収集していく予定である。

#### 4. まとめ

- 1) 含水比が高い調合は流動性が高く締固めができず、含水比が低い調合は打撃を加えると崩れ、打込み時の締固めが困難であるため、15打フロー値が100mm程度になるような水分量の調整が望ましい。
- 2) 荒木田土にコンクリート用細骨材である陸砂を混合することで、荒木田土のみにおける版築ブロックと比較し、圧縮強度は1.5倍程度向上する。
- 3) 水分量が多い調合では圧縮強度が低下するため、使用する土や細骨材の含水比を把握する必要がある、含水比は静電容量により概ね推定可能であると判明した。
- 4) 打込み後14日間の封緘養生を行うことでより安定した強度の版築ブロックが得られると考えられる。また、最適含水比を上回る水分量により圧縮強度の向上が期待できる。一方で、結合材量の差により圧

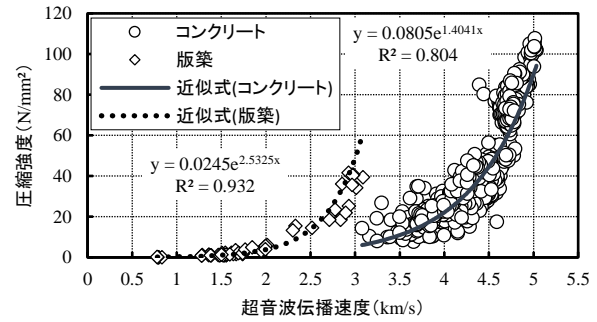


図-13 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

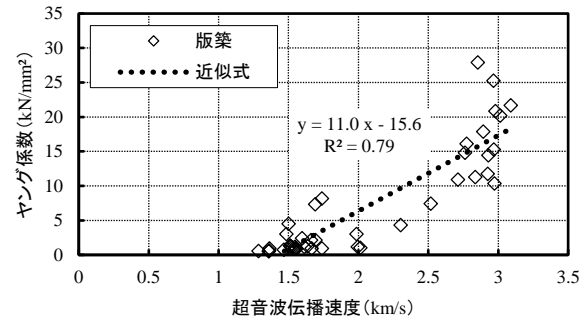


図-14 超音波伝播速度とヤング係数の関係

縮強度の値が大幅に異なるため、今後、最適な結合材量の検討が必要である。

- 5) 圧縮強度とヤング係数の間に相関性が確認でき、以下の式により版築ブロックのヤング係数が求められると考えられる。

$$E_R = 0.87 \times 10^4 \times \left(\frac{F_R}{15}\right)^{0.85} \quad [N/mm^2]$$

ここに、 $F_R$ ：版築ブロックの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

また、さまざまな地域の土を用いた場合に本予測式が適用可能かどうか検討を続ける必要がある。

- 6) 超音波試験により非破壊的に圧縮強度およびヤング係数を推定できる可能性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) 中村航, 奥石直幸: 戸建住宅の組積耐力壁に用いる非焼成土ブロックの材料・調合および製造条件に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第47号, pp.17-21, 2015.2
- 2) 赤谷樹一郎, 大塚秀三, 竹村雅行, 遠野未来: 荒木田土を用いた版築壁の強度性状に及ぼす調合および施工要因の影響に関する研究, 日本建築学会・関東支部研究報告集I, pp.41-44, 2012.3
- 3) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015, 日本建築学会
- 4) 木村芳幹, 谷川恭雄: 超音波速度法による高強度コンクリート構造体の品質の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.577-582, 2001