

論文 既設レンガ部材の力学的性状について

松田芳範*1・岩田道敏*2・八巻一幸*3・山内俊幸*4

要旨： 鉄道構造物には多くのレンガ積み構造物が残存している。これら現存するレンガ積み構造の一部を供試体として抽出し、静的載荷試験を行った。その結果、圧縮強度においては通常無筋コンクリートに用いられるコンクリート程度の強度を有し、レンガ積み目地の方向による強度差は、若干見られるものの大差はないことがわかった。また、破壊した供試体はエポキシ樹脂による接合補修を行うことによりほぼ破壊前の耐力に復元されることがわかった。

キーワード： レンガ積み構造, レンガアーチ高架橋, 目地, 圧縮強度, エポキシ樹脂

1. はじめに

鉄道構造物には、その歴史的背景から古い構造物が多く存在している。JR各社の橋脚・橋台等の橋りょう構造物では、その83%がレンガ・石積み、無筋コンクリート構造であり[1]、このうち24%の約3万基がレンガ・石積み構造物となっている。これらは、明治、大正、昭和初期に築造され、経年70年以上の構造物がほとんどであり、その割合は90%以上を占めている。レンガ・石積み構造物は、経年劣化および要求性能の変化などにより順次取り替えられているが、すべてを取り替えるには至っていない。また、社会情勢の変化により古き時代のレンガ構造物の保存機運も高まっており、景観的価値も生まれつつある。さらに、阪神・淡路大震災を踏まえ、このような構造物に対しても耐震性が要求されている。しかし、既存のレンガ構造物の耐荷力は、従来から指摘されているように施工精度によるところが大きいほか[2]、レンガ積み構造の物性値について試験が行われることも少なく、保有耐力の解析などにおいて適切な物性値を評価し難いのが現状である。本論では、高架橋改築に伴い一部撤去されるレンガアーチ高架橋から採取した供試体を用いた強度試験について述べる。

2. 試験概要

2.1 供試体

(1) レンガ積み供試体

レンガ構造物の物性値を得るため、実レンガ積み構造物から目地を含んだφ100×200mmのコア供試体の採取を行い、パラメータを目地配置とし、圧縮強度、割裂引張強度、弾性係数、ポアソン比および単位体積重量について試験を行った。レン

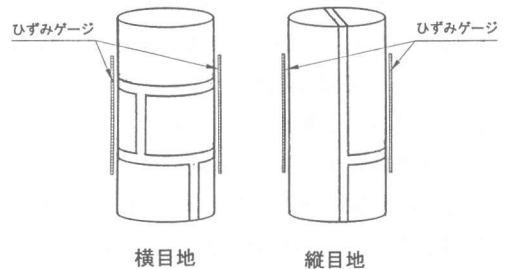


図1 レンガ積み供試体

*1 東日本旅客鉄道(株)建設工事部構造技術センター主席 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株)千葉支社工務部施設課課員, 工修 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株)建設工事部構造技術センター課長 (正会員)

*4 東日本旅客鉄道(株)東京工事事務所工事管理室係長 (正会員)

ガ単体ブロックの大きさは、長22.7cm×幅10.9cm×厚6.0cmである。図1にレンガ積み供試体を示す。横目地の場合には水平方向に貫通した目地が含まれるように採取し、縦目地の場合には目地が鉛直方向に貫通するように採取した。斜め目地のコアの場合、目地が45度となるように採取した。測定用ひずみゲージは、横目地では目地を含んで貼り付け、縦目地では目地が介在する場合には目地を含めて貼り付けた。割裂引張試験では、レンガ積み供試体の円断面側の目地が荷重軸線に直近となるように配置した。

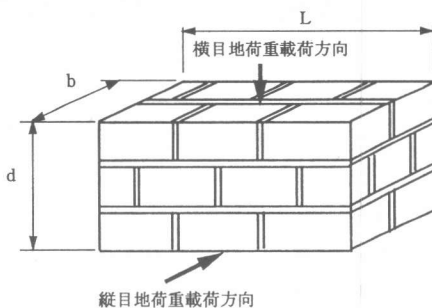


図2 荷重荷重方向

(2) レンガ単体コア供試体

レンガ単体の物性値を得るため、目地を含まないφ30mmのコア供試体の採取を行い、圧縮強度、割裂引張強度および単位体積重量の試験を行った。

(3) 曲げ荷重試験およびせん断荷重試験供試体

図2に目地方向別による荷重荷重方向を示し、表1に曲げ荷重試験用供試体および表2にせん断試験用供試体を示す。供試体は、実構造物から塊状で採取したものを可能な限り

矩形形状にはつり整形している。このため断面および供試体長さについて統一されていない。目地せん断試験に用いる供試体は、曲げ試験後の破壊供試体を用い曲げ荷重方向と直交するように荷重を荷重して実験を行った。曲げ試験では、レンガ積み目地方向、軸力をパラメータとし、せん断荷重試験では、レンガ積み目地方

表1 曲げ荷重試験供試体

記号	高さ d (cm)	幅 b (cm)	スパン l (cm)	載荷点までの距離 a (cm)	目地方向	軸力 (N/mm ²)	特記事項
MT1-00	35.5	38.0	45	15.0	タテ	0	
MT2-00	33.0	30.0	60	20.0			
MT3-00	34.0	38.5	78	26.0			
MT4-05	41.0	40.0	80	26.7			
MY5-00	30.0	30.0	50	16.7	ヨコ	0	補修 補修 補修
MY6-00	35.5	34.0	60	20.0			
MY7-00	40.0	36.5	103	34.5			
MY8-05	33.5	29.0	48	16.0		0.49	
MY9-05	33.0	32.0	48	16.0			
MY10-05	36.0	36.5	81	27.0			
MY11-05	38.0	34.0	96	32.0			
MY12-10	30.0	30.0	45	15.0		0.98	
MY13-10	30.0	30.0	45	15.0			
MY14-10	33.0	35.0	51	17.0			
MY15-10	33.5	35.0	96	32.0			
MY16-15	32.0	32.5	50	16.5	1.47		

表2 せん断試験供試体

記号	高さ d (cm)	幅 b (cm)	スパン l (cm)	目地方向	軸力 (N/mm ²)	特記事項
SY1-00	30.0	30.0	30.0	ヨコ	0	
SY2-05	39.0	37.0	30.0		0.49	
SY3-10	30.0	30.0	30.0		0.98	
ST4-00	30.0	30.0	30.0	タテ	0	補修
ST5-00	30.0	26.0	7.3	目地	0	
ST6-05	30.0	26.0	7.3		0.49	
ST7-10	30.0	21.0	7.3		0.98	

向、目地部、軸力をパラメータとした。

2. 2 供試体補修

曲げ載荷試験およびせん断載荷試験を行った後の破壊供試体をエポキシ樹脂により接着補修を行い破壊したレンガ積み構造物の補修の効果について検討した。補修は、まず曲げ載荷試験により2分割に破壊したレンガ積み供試体の両端部に孔の

あいた鋼板を設置し、鋼板の孔にPC鋼棒を通して破断面を合わせて供試体を両側から固定した。つぎに固定された供試体の破断部分にパテ状エポキシ樹脂のシール材を塗りつけ、低圧注入器具を取り付けながら注入箇所をシールした。シール材の硬化後、注入器具により破断面にエポキシ樹脂を注入した。曲げ載荷試験は、注入後2週間以上屋内で養生した後に行った。

3. 試験結果

3. 1 コア供試体試験

表3にレンガ積みコアの圧縮強度、表4に割裂引張強度の試験結果を示し、表5にレンガ単体の強度試験の試験結果を示す。表中の弾性係数は圧縮強度の1/3点における割線断線係数である。図3に横目地および縦目地の応力-ひずみ曲線を示す

試験の結果、レンガ積みコア供試体の圧縮強度は約34 N/mm²程度となった。強度のバラツキは、比較的少なく±10%以内に収まっている。目地方向による強度比較では横目地および縦目地いずれの方向において

も強度に差はほとんど見られない。しかし、弾性係数は横目地に比べて縦目地が30%程度大きい。ポアソン比は、およそ1/6であ

表3 レンガ積みコア供試体圧縮強度試験結果

記号	目地 方向	荷重 (kN)	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	単位体積 重量 (t/m ³)	弾性係数 E (N/mm ²)	ポアソン 比
Cc-Y-1	ヨコ	290	36.5	1.96	14,100	0.22
Cc-Y-2		258	32.5	1.97	12,400	0.14
Cc-Y-3		254	31.7	1.97	13,700	0.19
横目地平均		267	33.6	1.97	13,400	0.18
Cc-T-1	タテ	247	31.4	1.87	16,000	0.14
Cc-T-2		282	35.9	1.90	18,500	0.17
Cc-T-3		269	34.3	1.89	18,600	0.18
縦目地平均		266	33.8	1.89	17,700	0.16
縦・横平均		267	33.7	1.93	15,500	0.17

表4 レンガ積みコア引張強度試験結果

記号	目地 方向	荷重 (kN)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	単位体積 重量 (t/m ³)
Ct-Y-1	ヨコ	80.0	2.50	1.98
Ct-Y-2		69.0	2.33	1.98
Ct-Y-3		53.3	1.73	1.97
横目地平均		67.4	2.19	1.97
Ct-T-1	タテ	106.1	3.37	1.90
Ct-T-2		55.8	1.81	1.89
縦目地平均		81.3	2.59	1.89
Ct-N-1	ナメ	70.1	2.21	1.80
全平均		72.4	2.33	1.92

表5 レンガ単体コア試験結果

記号	荷重 (kN)	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	単位体積 重量 (t/m ³)
Cc-P-1	36.0	46.2	—	1.74
Cc-P-2	14.7	20.1	—	1.72
Cc-P-3	19.6	27.4	—	1.76
Cc-P-4	41.2	51.2	—	1.63
Cc-P-5	21.8	29.0	—	1.72
圧縮強度平均		26.7	34.8	1.71
Ct-P-1	8.2	—	3.00	1.78
Ct-P-2	9.7	—	3.53	1.69
引張強度平均		9.0	3.27	1.74

りほぼコンクリートと同じ値となっている。引張強度は、 $1.73 \sim 3.37 \text{ N/mm}^2$ とバラツキが大きくなっているが、それぞれ平均値で比べると大きな差がなく、目地方向による影響はあまりないのではないと思われる。

コア単体の強度試験では、圧縮強度が $20.1 \sim 51.2 \text{ N/mm}^2$ とかなりのバラツキが見られるが、平均値ではほぼレンガ積み供試体とほぼ同等の強度となっている。このことは、レンガ単体の強度にバラツキがあってもレンガ積みにすることで強度が平均

化するものと考えられる。引張強度は、試験体の数が少ないため明確に述べることは難しいが、 $3.00 \sim 3.53 \text{ N/mm}^2$ の強度を有しており、レンガ積み供試体と比較して40%程度大きくなっている。これは、均一材料となるレンガ単体に比べ、レンガ積み供試体では目地が影響しているものと考えられる。また、単位体積重量でレンガ単体が 1.7 t/m^3 程度、レンガ積みで 1.9 t/m^3 程度となっているのは、目地モルタルのためと考えられる。

3. 2 載荷試験

3. 2. 1 曲げ載荷試験

今回の実験では、レンガアーチ部材についての検討を行うため、レンガ積みはり部材として曲げ載荷試験を行った。載荷試験は供試体スパンをおよそ3等分した点の2点載荷とし、載荷点には $\phi 19\text{mm}$ の鋼棒を配置した。また、鋼棒と供試体間に不陸を生じさせないため石膏で調節した。この鋼棒の上に載荷支圧板を置きこの上からアムスラーにより荷重を載荷した。軸力を付加する場合には、供試体両端部に支圧板を設置、片側にロードセルを配置して鋼棒を緊張し、軸力を一定にした。表6に曲げ載荷試験の結果を示す。試験の結果、軸力を0とした供試体は、最大荷重とひび割れ荷重が同じでありひび割れ発生と同時に破壊に至っている。軸力を与えた供試体ではひび割れの発生荷重は最大荷重の $0.52 \sim 1.00$ となっている。全断面を有効として引張応力度を算出した結果では、平均 1.82 N/mm^2 となり、レンガ積みコア割裂試験により得られた引張強度の約80%となっている。また、荷重-変位の関係から弾性係数を求めた。この結果、軸力を与えない供試体の弾性係数の平均値は $1,520 \text{ N/mm}^2$ 、軸力を与えた場合のひび割れ発生時の弾性係数の平均値が $1,560 \text{ N/mm}^2$ とほぼ同程度の数値を示している。しかし、コア供試体から求めた弾性係数と比較すると約1/10の値となっている。破壊形態は、すべて曲げ破壊であり、ひび割れはスパン中央部の2点載荷位置間で生じている。軸力を付加した場合は上縁圧縮領域の圧壊による破壊性状を示した。図4に曲げ載荷試験による荷重-変位曲線を示すが、載荷初期の剛性が小さいことがわかる。これは、目地が影響しているものと考えられる。供試体MT1～3とMY5～7は、軸力0のときの荷重載荷方向を縦目地および横目地としたものである。MT1～3で $0.75 \sim 2.25 \text{ N/mm}^2$ 、MY5～7で $1.18 \sim 2.10 \text{ N/mm}^2$ とばらついているものの平均値で 1.6 および 1.5 N/mm^2 程度と大きな差がみられないことから目地方向による影響は少ないのではないかと考えられる。今回の試験では供試体の高さおよびスパンによる部材の寸法の影響について検討を行っていない。

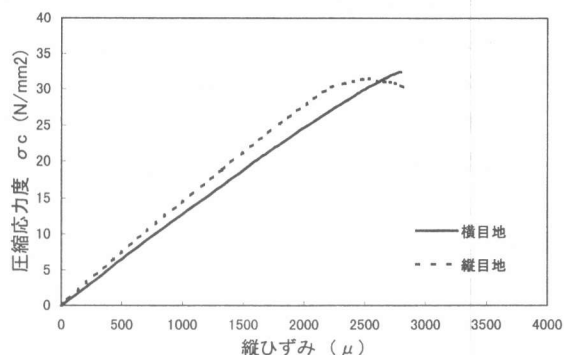


図3 圧縮応力-ひずみ曲線

表 6 曲げ載荷試験結果

記 号	荷 重			引 張 応力度 (N/mm ²)	弾 性 係 数	
	最 大 P (kN)	ひびわれ 発生時 Pc (kN)	比 Pc/P		軸力無 破壊時 Ed (N/mm ²)	軸力有 びれ時 Ec (N/mm ²)
MT1-00	239.0	239.0	1.00	2.25	510	—
MT2-00	97.6	97.6	1.00	1.79	1,440	—
MT3-00	42.3	42.3	1.00	0.75	1,740	—
MT4-05	※462.1	202.1	0.44	1.76	—	3,420
MY5-00	63.6	63.6	1.00	1.18	1,210	—
MY6-00	87.4	87.4	1.00	1.23	700	—
MY7-00	118.6	118.6	1.00	2.10	3,510	—
MY8-05	197.2	161.3	0.57	1.87	—	800
MY9-05	216.1	216.1	1.00	2.48	—	980
MY10-05	166.6	122.9	0.74	1.55	—	1,780
MY11-05	112.7	97.6	0.87	1.42	—	2,610
MY12-10	315.3	165.6	0.53	1.74	—	690
MY13-10	342.3	180.7	0.52	2.04	—	830
MY14-10	395.0	253.6	0.64	2.42	—	950
MY15-10	136.4	97.6	0.72	1.51	—	2,390
MY16-15	443.6	300.2	0.68	3.04	—	1,190
平 均				1.82	1,520	1,560

※MT4-05:最大荷重時軸力1.96N/mm²

3. 2. 2 セン断載荷試験

せん断載荷試験は、2面せん断による純せん断試験とした。軸力を付加する場合には、曲げ載荷試験と同じ方法によった。表7にせん断強度試験の結果を示す。供試体SY1とST4は、同断面で荷重載荷方向が横目地および縦目地方向の場合である。これを比較するとせん断応力度が同等の値となっており横目地、縦目地による目地方向の影響はみられない。また、軸力 0.49N/mm²のSY2もほぼ同じ値を示していることからレンガ積み構造でレンガとレンガの厚さ方向の縦目地が同一断面にならないような積み方を行った場合、ほぼ目地方向に影響されずに軸力 0.5 N/mm²程度までは、一定のせん断強度を有していることも考えられる。破壊は、せん断面位置で生じ、破断面は目地部を經由するなどの状況はみられない。供試体ST5～7は、目地部のせん断強度試験を行ったものであり、軸力 0 N/mm²で $\tau = 1.98 \text{ N/mm}^2$ 、軸力 0.49 N/mm²で $\tau = 3.51 \text{ N/mm}^2$ 、軸力 0.98 N/mm²で $\tau = 4.32 \text{ N/mm}^2$ の値が得ら

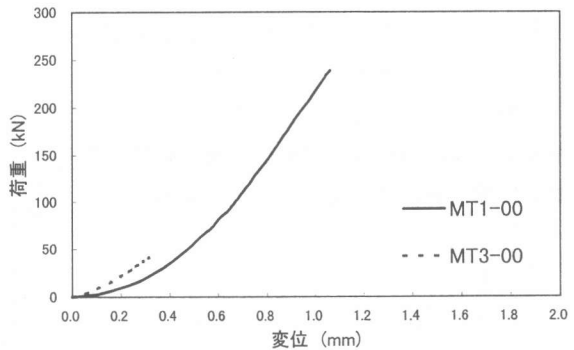


図 4 荷重－変位曲線

表 7 セン断試験結果

記 号	最大荷重 P (kN)	せん断応力度 τ (N/mm ²)
SY1-00	649	3.61
SY2-05	960	3.32
SY3-10	881	4.89
ST4-00	649	3.61
ST5-00	309	1.98
ST6-05	547	3.51
ST7-10	545	4.32

れ軸力による相関性がみられる。このことは目地部のせん断強度は、レンガと目地モルタルとの付着強度および摩擦強度であると考えられ、レンガアーチ橋のような構造物では、およそ 0.5 N/mm^2 程度の軸力下にあることから、目地方向に依存しない程度のせん断強度を有しているものと考えられる。

4. 補修供試体

曲げ載荷試験に用いた供試体3体、せん断載荷試験に用いた供試体1体について破壊部分をエポキシ樹脂により補修を行い、載荷試験と同一条件にて再試験を行った。これは、レンガ積み構造物において破壊後の補修が可能であるかについて検討したものである。試験結果を表8に示し、図5に供試体 MY7の補修前および補修後の荷重-変位曲線を示す。

試験の結果、完全に破壊した供試体を樹脂により補修したのみでも破壊前の耐力が回復していることがわかる。しかし補修後の供試体は補修前と比較して

表8 補修供試体試験結果

記号	耐 力			弾 性 係 数		
	補修前 P (kN)	補修後 Pr (kN)	比 Pr/P	補修前 E (N/mm ²)	補修後 Er (N/mm ²)	比 Er/E
MY5-00	63.6	83.1	1.31	1,210	490	0.40
MY6-00	87.4	86.9	0.99	700	640	0.91
MY7-00	118.6	124.3	1.05	3,510	830	0.24
ST4-00	649.2	584.5	0.90	—	—	—

変位が大きく、荷重-変位関係による曲げ剛性から求めた弾性係数では、補修前の値と比較してかなり低下している。これは、補修供試体の微細ひび割れや樹脂の弾性係数の影響などによるものと考えられる。

5. まとめ

- ・ 実レンガ積み構造物から得られたデータはバラツキが大きい。
- ・ レンガ積みコア試験の圧縮強度、引張強度に目地の方向性は見られず同様の強度を示すことがわかった。
- ・ レンガ単体での圧縮強度は、同一レンガでも強度のバラツキが大きいがレンガ積み構造物とした場合には、比較的均一な強度を示すことがわかった。
- ・ 曲げ試験、せん断試験では、レンガ積み目地方向による強度差が見られない。
- ・ レンガ積み構造物に樹脂による補修が可能であることがわかった。

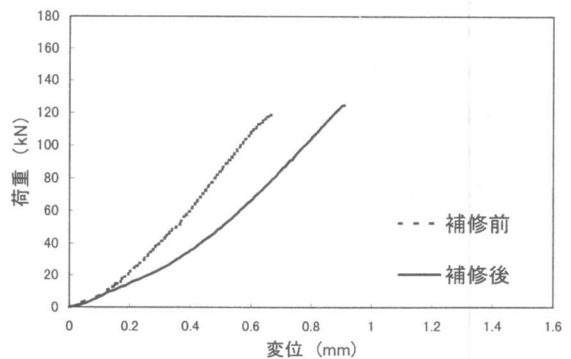


図5 荷重-変位曲線

参考文献

1. 村上温：橋りょう保守の現状と問題点，構造物設計資料，国鉄構造物設計事務所，1988.2.
2. 日本鉄道施設協会編：鉄道地震対策の研究報告書，pp.350～357，1982.3.