

自然材料からなるブロック状構造物の強度評価手法の開発

Strength Estimation of block structures composed of natural materials

プロジェクト代表者：長田 昌彦(地圏科学研究センター・准教授)

Masahiko Osada (GRIS, Assoc. Prof.)

1 はじめに

2003年12月イランのバム地方で起こったマグニチュード6.6の地震により、日干し煉瓦構造物であるイラン・バム遺跡は大規模な被害を受けた。日干し煉瓦構造物は地震動に対して非常に脆弱であり、この地震により遺跡では8割以上が崩壊し、また一般家屋等についても膨大な被害がみられている。現在これらの日干し煉瓦構造物の修復作業が行われている¹⁾が、今後の地震被害を軽減するための補強技術とその評価方法の開発が必要とされている。

土から作成された日干し煉瓦構造物は、日干し煉瓦そのものとそれらを接合する目地からなるブロック状構造物である。従ってこのブロック状構造物の強度特性を調べるためには、ブロック自体と目地の各々の強度特性、および境界面上での相互作用を抑えておく必要がある。本研究の特殊な事情としては、対象が世界遺産であるがゆえに、強度特性を求めるために通常の土質試験のように材料を直接変形破壊させることができないことである。そこで本研究では、対象を出来る限り破壊しない手法として、針貫入試験とエコーチップ反発強度試験によって強度推定を試みた²⁾。

2 調査方法と結果

図-1は、モスクに向かう通路の壁が地震により亀裂が入った状態で残存している部分の写真である。地震動の入力方向は、多くの柱などの倒壊方向から写真の左右方向であると推定されている。亀裂は煉瓦と煉瓦を埋める目地の部分をアミダ状に選択して進展しており、日干し煉瓦構造物における破壊様式の典型的な例である。このような日干し煉瓦構造物の各所で、針貫入試験とエコーチップ反発強度試験を実施した。針貫入試験は、その名の通り細い針を土材料に貫入させ、貫入量と貫入に要した力との関係を測定する装置であり、丸東製作所の装置を用いた。エコーチップ反発強度試験は、対象物に向けて球形のテストチップを一定の速度で衝突させ、その初速度と反撥速度を計測し、それらの比を求める非破壊試験装置である。



図-1 地震により亀裂が発生した日干し煉瓦壁面(バム遺跡)

2.1 針貫入試験結果

針貫入試験結果の一覧を表 1 に示す。試験は複数点において実施して平均値と標準偏差を求めている。針貫入勾配(NP; N/mm)は材料の一軸圧縮強さと相関があることが示されている。ここでは岡田ら³⁾の関係式、

$$\log qu = 0.978 \log NP + 2.599 \quad (1)$$

ここに：一軸圧縮強さ(kPa)

を用いて一軸圧縮強さを計算し、表中に合わせて示してある。

計測は、日干し煉瓦(brick)と目地(mortar)のほか、チネ(chine)と呼ばれる土材料をつき固めた箇所についても行った。また地震後修復作業のために作成された材料については、new という表記を用いている。結果をみると、場所ごとに強度にバラツキはあるものの、同時期に作成された日干し煉瓦に対して目地の強度が小さいことがわかる。

表-1 針貫入試験結果の一覧

場所	対象	NP (N/mm)	標準偏差	qu (MPa)
barrack	old mud brick	14.22	4.12	5.33
	new mud brick	19.03	4.41	7.08
	old mortar	8.24	-	3.12
	new mortar	9.32	3.53	3.52
mosque	old mud brick	19.42	3.43	7.23
	old mortar	13.24	3.73	4.97
ice house	old chine	11.09	5.20	4.18

この関係を示したものが表-2 である。兵舎 (barrack) で現在修復されている材料では、日干し煉瓦と目地の強度比が小さく、時間が経つにつれて煉瓦と目地が一体化してくることを定性的に表現していると考えられる。氷室 (ice house) で計測したチネについては、つき固めただけにしては比較的大きな強度を有している。これは、チネの表面における水分移動に伴い、何らかの白色鉱物が析出したため強度を増加させていると考えられる。

表-2 日干し煉瓦に対する目地強度の比

場所	対象	強度比
barrack	old	0.58
	new	0.49
mosque	old	0.68

2.2 エコーチップ反発強度試験結果

エコーチップ反発強度試験結果の一覧を表-3 に示す。計測は、煉瓦、目地、チネのほか、参考のために焼成煉瓦と岩石についても行った。この試験はその計測原理から材料の弾性的な性質を主に反映していると考えられるので、橋本ら⁴⁾の結果を考慮してエコーチップ値 (L_d) と静的弾性係数 (E_{50} ; GPa) の関係を次式により換算した。

$$\log E_{50} = 3.279 \log L_d - 7.688 \quad (2)$$

表より、明らかに岩石や焼成煉瓦の E_{50} は大きな値を示している。日干し煉瓦と比較して目地の値が小さくなっていることは全体として表現できており、針貫入試験の結果とも調和的である。また現在修復作業の

表-3 エコーチップ反発強度試験結果の一覧

場所	対象	平均	標準偏差	換算 E_{50} (GPa)
Tower4	baked brick	298.5	45.1	2.681
near citadel	old large brick	214.6	25.5	0.908
	old small brick	212.1	36.1	0.874
barrack	old brick	213.8	30.0	0.898
	new brick	241.2	25.7	1.332
	new mortar	214.7	21.4	0.910
	rock fragment	821.0	—	73.996
Mosque	old brick	232.4	41.2	1.180
	old brick	233.6	39.1	1.200
	old mortar	201.4	31.6	0.738
	old mortar	206.1	43.4	0.795
	baked brick	406.1	32.5	7.359
ice house	chine white	222.0	31.3	1.015
	chine brown	179.1	34.3	0.502
	chine brown	163.7	21.3	0.374
citadel	rock	689.6	142.7	41.765

のために作成された材料についても、古い煉瓦の物性と同等かそれ以上の値となっていることが把握できる。煉瓦の大きさは、通常 25cm 角 (small と記載) の大きさのものが使われているが、古い時代の煉瓦には 40cm 角 (large と記載) のものも使われているが、大きさによらずほぼ同じ物性を有していることもわかる。チネの計測では、表面の白色化した部分と内部の茶褐色の部分では大きく値が異なっており、表面において硬化が生じていることを表している。しかし針貫入試験で得られた日干し煉瓦と目地の強度比の新旧関係は、この試験からは確認できなかった。

この他、現在修復作業で用いられている日干し煉瓦の強度発現についての検討も行っている。 L_d 値による評価から、日干し煉瓦そのものはおよそ 10 日間で古い時代の煉瓦と同等の物性まで硬化することがわかった。

3 おわりに

簡便な原位置試験方法を用いることにより、日干し煉瓦構造物の修復作業のために必要となる基礎的な力学的物性値を把握することができた。一方で図-1のように既に破壊されたブロック状構造物の現状での安定性を評価する必要もある。このニーズに応える一つの手法として常時微動の計測があり、転石に対する基礎的な研究を進めている⁵⁾。また得られた力学的な物性値を用いた数値計算法の適用性についても検討しており⁶⁾、このようなブロック状構造物の動的解析の準備が整いつつある。

参考文献：1)渡邊邦夫・長田 昌彦・小口千明(2007)、イラン、バム遺跡の修復に向けた国際協力、土と基礎、第 55 巻第 3 号、pp.15-17. 2)村上 和哉、長田 昌彦、渡邊 邦夫、小口 千明(2006)、イラン・バム遺跡における日干し煉瓦と目地の力学的物性値の推定、土木学会第 61 回年次学術講演会、-374,2006. 3)岡田滋ほか(1985)：針貫入試験による軟岩地山強度の推定、土と基礎、Vol.32, No.2, pp.35 - 38. 4)橋本徹ほか(1998)：エコーチップ硬さ試験器による岩石材料物性評価の試み、第 33 回地盤工学研究発表会、pp.1231 - 1232. 5)Mogi,H., Osada,M. and Hashida,T.(2007),Microtremor measurement for rock-fall hazard assessment,The 6th Asian regional conference on Geohazards in Engineering Geology(accepted). 6)P. H. Dong and Osada, M.(2007),Effects of dynamic friction on sliding behavior of block in DDA,ICADD8(submitted).