

溶結凝灰岩からなる石橋の風化特性の評価に関する研究

九州大学工学部 正会員 江崎哲郎 蔣 宇静
学生員 吉田 良○高島一植

1. はじめに

近年、現存する石造構造物の歴史的な遺産としての価値が評価されるようになり、その維持管理・保存が重要な課題となっている。これまで著者らは、歴史的に南九州で石橋の主要材料として多用されている溶結凝灰岩を対象とし、構造物として長年月にわたり使用されてきた石材の接触面からの風化深さを知るために、洪水により流出した石橋のアーチ部材を用いて接触面剛性試験やすり減り試験、弾性波速度測定など様々な試験を実施し、力学的に定量的な評価を行った。

そこで、接触面剛性試験により得られたせん断剛性 K_s 、垂直剛性 K_n を用いて、建造後150年を経た石造アーチ橋をモデル化して構造解析を行い、風化の影響で生じた K_s 、 K_n の値の違いが構造物の安定性に与える影響の定量的検討を行った。

2. せん断剛性、垂直剛性の実験結果

K_s 、 K_n はそれぞれせん断剛性、垂直剛性と呼ばれ、これらは不連続面のせん断方向、あるいは垂直方向への力学的な強度を示す材料定数で、不連続面で構成される構造物では重要な物性値として認識されている。 K_s はせん断応力-せん断変位曲線、 K_n は垂直応力-垂直変位曲線を回帰し、それぞれの回帰曲線上の各応力における接線の傾きとして求められる。接触面剛性試験により得られた K_s 、 K_n の結果をFig.1に示す。同図は、図中の各垂直応力載荷時の K_s 、 K_n を接触面からの各深さに沿ってプロットしたものである。この図より、 K_s 、 K_n は接触面から深部に行くにつれ増加する傾向が見られる⁽¹⁾。

3. 解析方法

今回対象とした石造アーチ橋を構成するアーチ石は、切り出された自然石を積み重ねて作られている不連続体の構造物である。そのため、この解析では不連続面の挙動を的確に表現する手法をとるのが望ましい。したがって、不連続面を要素境界として表現し、各アーチ石間の変動や、各アーチ石個々の変位や回転を考慮できる個別要素法を使用した。

3. 1 個別要素法の概要

個別要素法は、不連続な構造をブロックの集合体として取り扱い、各ブロックの運動方程式に基づき、系全体の動力学的な破壊状態を連立方程式として解いていく解析手法である。各ブロックの運動は外的荷重や物体力によって生じたブロックシステムの乱れによる動的プロセスと考えられる。不連続面はせん断方向および垂直方向をバネでモデル化して、バネの剛性を調整することにより異なる不連続面の特性を表現する。ブロックシステム全体の挙動は、全ての接触面での力-変位関係およびすべ

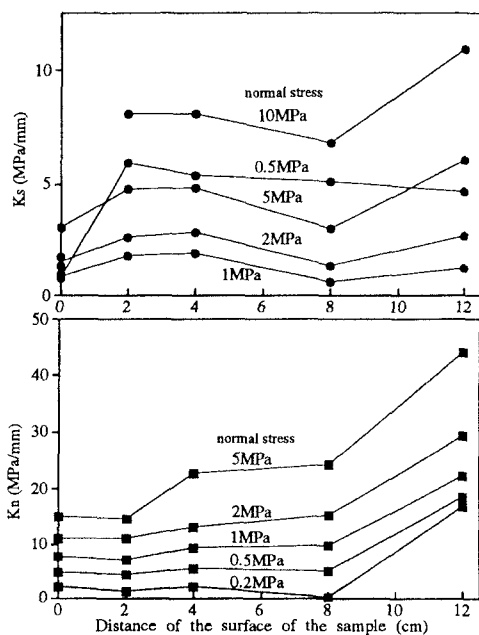


Fig.1 Shear stiffness and normal stiffness at different depth from the surface of test sample under different normal stress

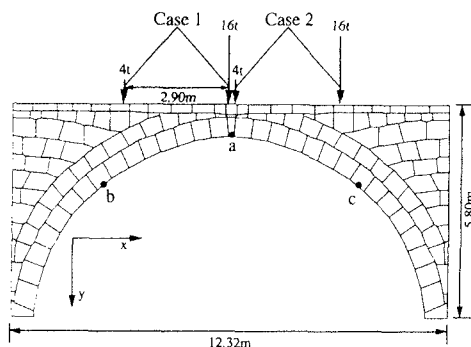


Fig.2 Calculation model

てのブロックがニュートン第2法則を満たすように解析される。

3. 2 解析モデル

今回使用した石造アーチ橋の解析モデルをFig.2に示す。2次元の個別要素法を用いるため、単位奥行き幅の2次元モデルを作成した。アーチ石は剛体ではなく変形可能とし、自重と上載荷重(次節に示す)を作用させた。そして、荷重によってアーチ石の挙動が安定するまで、

Tab. 1 Properties used in D.E.M analysis

Property	(unit)	Value		
Density	(kg/m ³)	1943		
Young's modulus	(MPa)	1.01×10^5		
Poisson's ratio	(-)	0.325		
Normal stiffness	(MPa/m)	A	B	C
		5000	10000	20000
Shear stiffness	(MPa/m)	A	B	C
		2500	5000	10000

Tab. 2 The result of displacement at each place

Case 1					
Point	a	b-v	b-H	c-v	c-H
A	35.13	6.495	-2.552	4.289	3.088
B	19.82	3.625	-1.490	1.967	1.790
C	12.64	2.226	-0.894	1.394	1.057
Case 2					
Point	a	b-v	b-H	c-v	c-H
A	12.74	0.704	-1.896	11.48	-1.248
B	6.853	-0.153	-1.136	6.247	-0.691
C	4.411	-0.039	-0.702	4.231	-0.551

($\times 10^{-2}$ mm)

もしくは、不安定となり破壊挙動が明らかになるまで計算を繰り返した。

今回使用した物性値をTab.1に示す。この解析で使用したKs, Knは、風化による不連続面のせん断剛性、垂直剛性の影響を把握するために、前節で述べた試験結果を利用し決定した。表中のA, B, Cの値はそれぞれFig.2の接触部表面および深さに応じて推定される代表値とした。

3. 3 解析ケース

載荷荷重は、自動車荷重(総重量20t)を用い、前輪に4t、後輪に16tの割合で載荷した。載荷位置はFig.2に示すようなCase 1, Case 2の2ケースである。2つの解析ケースでは、載荷荷重を一定にし、Tab.1に示すA, B, Cの値を接触面表面の剛性値と仮定して変位の違いを調べた。載荷に伴う変位の表示位置は、支間中央(a)とアーチ中心から角度45°の方向(b, c)の点とした。

4. 解析結果および考察

測定位置a, b, cの解析結果をTab.2に示す。A, B, Cと剛性値を上げていくと、変位が小さくなっていることが分かる。これは剛性が増加したことにより、ブロック間の力学的強度が増し、壁面間の変位が小さくなった結果、橋全体として変位が抑えられたものと考えられる。すなわち、現状では表面が風化しているが、完成頭初はB, Cのような剛性であったと推定され変位は2~3倍に増加していると考えられる。

次に、Case1-Bの主応力図をFig.3に示す。図より、応力はアーチの軸線に沿うようにかかり、壁石(スパンデル)の部分にはほとんどかからないのが分かる。一般に、アーチの軸線と圧力線が一致すると、アーチリング

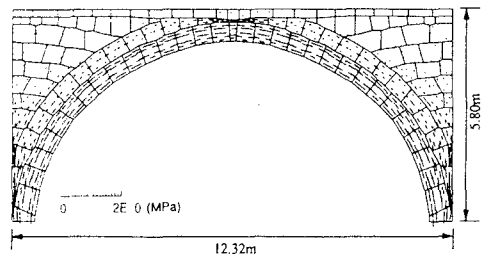


Fig.3 Distribution of principal stress (Case1-B)

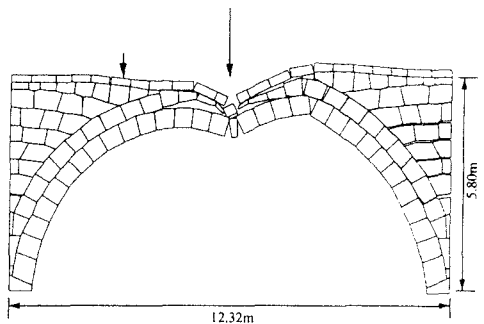


Fig.4 Failure of bridge (Case1-B)

に圧縮力のみを生じ、曲げモーメントが生じなくなる。そのため、このような構造物は構造上有利であると知られている⁽¹⁾。今回用いたモデルは構造上安定していることが分かる。

最後に、Case1-Bで、載荷荷重を増加させて破壊が生じるまで解析を行った。その結果をFig.4に示す。図より、クラウン横のアーチ石同士が離れ、右側が跳ね上がり破壊している様子が良く分かる。

5. 結論

今回のような石積みによるアーチ橋の解析には、不連続面の強度特性を容易に表現することができ、また、その結果細部にわたって変位量が容易に把握することが可能な個別要素法が適しているといえる。また、今回は実験値をもとに石造アーチ橋をモデル化して解析を行ったが、その結果、剛性と変位量には密接な関係があることが分かった。Ks, Knの減少が風化によるものと考え、風化作用により石造アーチ橋の安定性が低下したと考えられる。

今後は、剛性の低下が応力に及ぼす影響や剛性と時間の関係などを考慮し、将来にわたる構造物の安定性の評価を進めていく所存である。

(参考文献)

- (1) Esaki, T.et.al (1995): STUDY ON WEATHERING EVALUATION OF WELDED TUFF, Proceeding of the 16th West Japan Sympo. on Rock Engineering, pp. 71-75.
- (2) 土木学会 (1995): 建設資材としての凝灰岩の特性についての基礎調査報告書
- (3) 建設産業調査会 (1975): 橋梁ハンドブック, pp.152-154