

## 石造構造物の接着アンカー補強部の終局耐力に関する引抜実験

熊本大学 工学部土木建築学科 学生員 ○池田 佳彦  
 熊本大学大学院 先端科学研究部 正会員 森山 仁志  
 熊本高等専門学校 正会員 岩坪 要

熊本大学大学院 自然科学教育部 学生員 佐々木大輔  
 熊本大学大学院 自然科学教育部 正会員 松村 政秀  
 熊本大学 フェロー会員 山尾 敏孝

### 1. 研究背景および目的

石橋の高欄などの柱状石造構造物は、地震時の転倒や経年劣化による割れ等の損傷被害が報告されている<sup>1)</sup>。これらを補修・補強する方法の一つに、図-1に示すような接着アンカー工法が考えられるが、アンカー補強部の力学挙動は解明されておらず、設計法は確立されていない。本研究では、石造構造物を対象としたアンカー工法の開発を目標に、補強後石材のアンカー引抜実験を行い、荷重と引抜変位の関係を調査した。

### 2. アンカー引抜実験

供試体の形状寸法を図-2に、実験ケースの一覧を表-1に示す。供試体には一辺250mmあるいは300mmの立方体石材(砂岩 S: Sandstone, 凝灰岩 T: Tuff, 花崗岩 G: Granite, 安山岩 A: Andesite)を使用し、石種を実験パラメータとした。M16 アンカーの埋込長さ  $L$  は、80.64mm (一辺250mm 供試体), 128mm (一辺300mm 供試体)とし、治具内径  $d_{jig}$  と埋込長さ  $L$  は、比率  $d_{jig}/L$  を1.56で統一した。孔径  $d_h$  は全ケース20mmに統一した。

図-3に示すとおり、反力治具上のセンターホール型油圧ジャッキにより約0.1kN/sの速度で引抜载荷を行い、载荷中は荷重  $P$ 、アンカーの引抜変位  $\delta$  を計測した。

### 3. 実験結果および考察

実験結果を表-2に、载荷後の供試体を図-4にそれぞれ示す。図-4に示すように、砂岩の場合はすべてコーン状破壊と引抜破壊の連成破壊(C+P)、凝灰岩の場合は連成破壊と割裂破壊(S)、花崗岩・安山岩については連成破壊がそれぞれ確認された。連成破壊したケースの引抜破壊の界面は、すべてエポキシ樹脂と石材との界面での破壊であった。表-2には、コンクリートを母材とした接着系あと施工アンカーの耐力評価式<sup>2)</sup>を準用して算定した想定破壊モードと、それに対応する設計終局耐力  $P_{ud}$  も記載している。アンカー定着部の破壊モードは、アンカーの降伏(A)、石材のコーン状破壊(C)、接着面の引抜破壊(P)の3つであり、各モードの設計耐力  $P_{ud}$  は式(1)~(3)で計算される。アンカーの降伏は式(1)で精度良く推定できると考え、供試体はコーン状破壊あるいは引抜

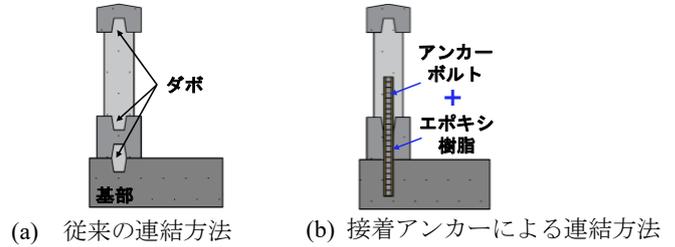


図-1 アンカー工法適用例(石橋高欄)

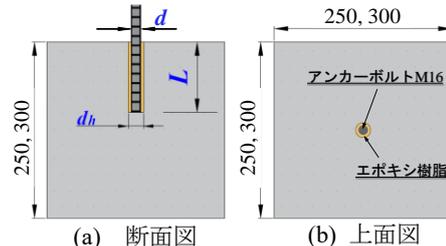


図-2 供試体形状(単位: mm)

表-1 実験ケース

実験ケース	供試体 No.	供試体寸法 (mm)	治具外径 $d_{jig}$ (mm)	治具内径 $d_{jig}'$ (mm)	孔径 $d_h$ (mm)	埋込長さ $L$ (mm)	$d_{jig}'/L$
$d_h$ 20-L128-S (S: Sandstone)	1	300	280	200	20	128	1.56
	2						
	3						
$d_h$ 20-L80-T (T: Tuff)	1	250	233	126	20	80.64	1.56
	2						
	3						
	4						
$d_h$ 20-L80-G (G: Granite)	-	250	233	126	20	80.64	1.56
$d_h$ 20-L80-A (A: Andesite)	-						

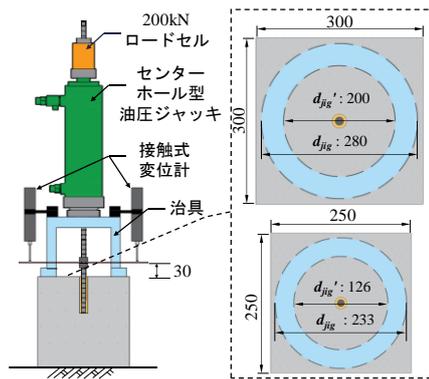


図-3 载荷方法(単位: mm)

破壊が生じるように設計している。

$$P_{yad} = \sigma_{ya} A_a = \sigma_{ya} \times \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

$$P_{cmd} = 0.31 \sqrt{\sigma_c} A_c = 0.31 \sqrt{\sigma_c} A_c \times \{\pi L(L+d)\} \quad (2)$$

$$P_{pad} = \tau_{ad} \times A_{ad} = \tau_{ad} \times (\pi d L) \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_{ya}$ : アンカー降伏点,  $A_a$ : アンカー断面積,  $d$ : アンカー径,  $\sigma_c$ : 供試石材の一軸圧縮強度,  $A_c$ : コーン

破壊面の有効水平投影面積,  $\tau_{ad}$ : 接着剤の引張せん断接着強度,  $A_{ad}$ : アンカーの接着面積である.

表-2 に示すように, 想定破壊モードと実破壊モードが異なったため, 上式で算定した各ケースの設計耐力  $P_{ud}$  が実験の最大荷重  $P_{max}$  と差があった. 連成破壊は, コーン状破壊領域と引抜破壊領域の 2 領域で抵抗していたことが考えられ, 連成破壊を想定した設計耐力の算定方法を検討する必要があることが明らかとなった.

荷重  $P$  と引抜変位  $\delta$  の関係を図-5 に示す. 最大荷重  $P_{max}$  以降の挙動は破壊モードによって異なり, 割裂破壊では瞬時に荷重が解放されるが, 連成破壊では, 最大荷重  $P_{max}$  以降も付着抵抗を維持し緩やかに荷重が低下する. 最大荷重  $P_{max}$ ,  $P$ - $\delta$  関係の初期剛性  $K$  は, 概ね花崗岩, 安山岩, 砂岩, 凝灰岩の順に大きいことが確認された. 花崗岩などの火成岩は凝灰岩などの堆積岩よりも材料強度が高いことが知られており, 材料強度が引抜荷重に影響したと考えられる<sup>3)</sup>. 最大荷重  $P_{max}$ ・初期剛性  $K$  と供試石材の一軸圧縮強度  $\sigma_c$  の関係を図-6 および図-7 に示す. 図-6,7 に示すように, 最大荷重  $P_{max}$ , 初期剛性  $K$  とともに一軸圧縮強度  $\sigma_c$  と比例関係にあることが確認された. 凝灰岩のケースにおいて, 最大荷重  $P_{max}$  と初期剛性  $K$  がともに小さいケース Tuff-3, 4 では, 軽量で粒子が破碎しやすいスコリア<sup>4,5)</sup>の存在により, コーン状破壊領域が小さくなっていることを確認している. したがって, 接着アンカーの補強効果 (補強後の連結力) は石種, 鉱物の含有量や種類に依存する側面がある.

4. まとめ

本研究の実験条件にて得られた知見を以下に示す.

- 1) 最大荷重  $P_{max}$  以降, 割裂破壊では瞬時に荷重が低下するが, 連成破壊では付着抵抗により緩やかに荷重が低下することがわかった.
- 2) 最大荷重  $P_{max}$ ,  $P$ - $\delta$  関係の初期剛性  $K$  は, 供試石材の一軸圧縮強度  $\sigma_c$  と比例関係にあることがわかった. 凝灰岩のように内部介在物の含有量が多い岩石では, その箇所で破壊する傾向があり, 含有量が多い石材ほど最大荷重  $P_{max}$ , 初期剛性  $K$  とともに小さいことが確認された.

謝辞: 本研究はJSPS科研費20K04665を受けて行いました. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 九州橋梁・構造工学研究会 (KABSE): 石橋の設計ガイドラインを用いた石橋設計と桁石橋の実状, 2018.6
- 2) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, pp.207-328, 2010.
- 3) 藤田千尋, 山尾敏孝, 古賀圭一郎, 岩内明子: 石橋に用いられる石材の材

表-2 実験結果まとめ

実験ケース	供試体 No.	一軸圧縮強度 $\sigma_c$ (MPa)	想定破壊モード	実験破壊モード	設計耐力 $P_{ud}$ (kN)	最大荷重 $P_{max}$ (kN)	初期剛性 $K$ (kN/mm)
d <sub>h</sub> 20-L128-S (S: Sandstone)	1	62.2	C	C+P	112.9	71.9	132.8
	2	61.3	C	C+P	112.5	91.3	192.3
	3	69.5	C	C+P	113.5	85.1	154.7
d <sub>h</sub> 20-L80-T (T: Tuff)	1	-	C	S	22.6	57.3	179.9
	2	76.8	C	C+P	21.8	58.7	130.3
	3	-	C	S	22.4	44.5	125.0
	4	26.0	C	C+P	22.5	37.1	98.6
d <sub>h</sub> 20-L80-G (G: Granite)	-	224.8	P	C+P	73.9	101.4	308.5
d <sub>h</sub> 20-L80-A (A: Andesite)	-	94.3	P	C+P	73.4	84.0	191.3

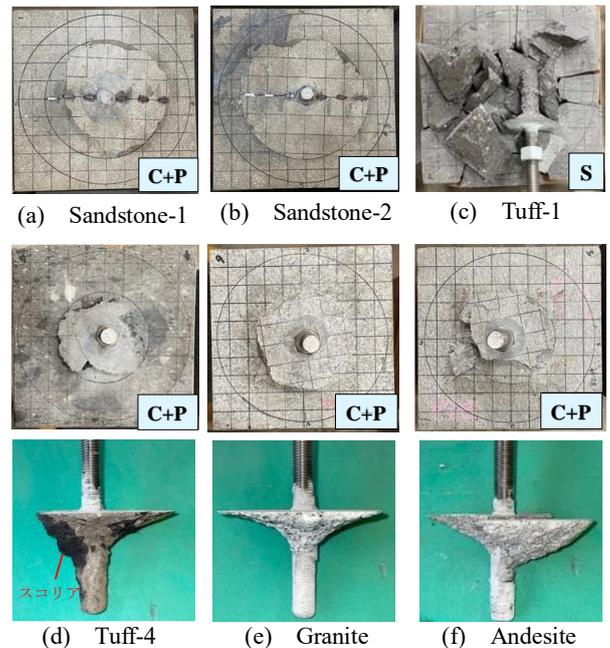


図-4 載荷後の供試体

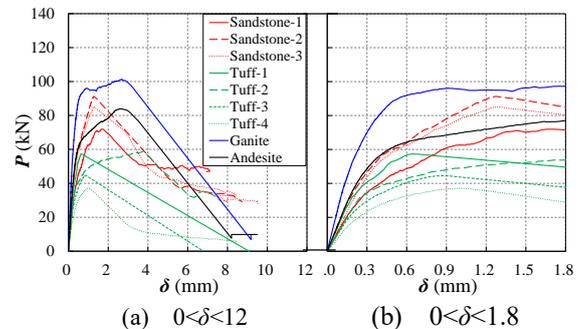


図-5 P- $\delta$  関係

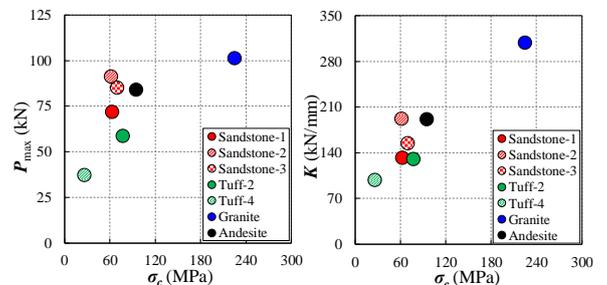


図-6  $P_{max}$ - $\sigma_c$  関係

図-7  $K$ - $\sigma_c$  関係

- 料特性とすべり挙動の解析手法の検討, 土木構造・材料論文集, Vol. 28, pp.123-131, 九州橋梁・構造工学研究会 (KABSE), 2012.
- 4) 西岡孝尚, 澁谷啓: 富士山周辺における「スコリア」の地盤工学的特性, 地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No.3, pp.397-415, 2013.
- 5) 八木一善, 三浦清一: 破碎性火山灰地盤の力学特性の評価, 土木学会論文集III, Vol. 66, No. 757, pp.221-234, 2004.