

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.1.539>

JCCT 2023-1-65

마애불 암반의 단열특성과 지질맵핑을 이용한 안정성 해석

Rock Mass Stability of the Buddha Statue on a Rock Cliff using Fracture Characteristics and Geological Face-Mapping

임명혁*

Ihm, Myeong Hyeok*

요약 연구 대상은 경상북도 00시 00동에 위치한 마애여래입상 암반으로서 안정성이 우려되는 중생대 백악기 화강섬록암 마애불상이다. 안정성 해석을 위해 마애불 암반의 3차원 face mapping과 절리의 지질공학적 특성, 3차원 스캐닝, 초음파속도, 편광현미경 분석, 전자현미경 분석 및 XRD 분석을 수행하였다. 더불어 손상상태 조사, 평사투영해석, 암반분류 및 한계평형해석으로 마애불 암반의 안전율을 산정하였다. 구간별로 손상 및 가능한 붕괴의 유형과 규모는 암석의 풍화도와 절리면의 배향과 특성에 따라 다르나 켜기파괴와 전도파괴가 소규모로 예상된다. face-mapping 자료, RMR, 암석의 물성·역학시험, 평사투영해석 및 한계평형해석으로 종합·검토한 결과, 마애불 암반의 건기 시와 우기 시의 허용안전율 1.2에 미달하여 안정성이 우려된다. 손상유형은 박리, 균열, 입상분해 및 초목생장, 균열 방향별 점유율은 전면이 가장 우세한 것으로 나타난다. 마애불 암석은 화강섬록암이며, 표면 변색의 물질은 K, Fe, Mg로 판명되었고, 4조의 절리 중 J1은 인장절리이고 나머지는 전단절리이다. 초음파탐사로 추정된 일축압축강도는 514kgf/cm²로서 대부분 연암과 일부 풍화암에 해당한다. 암반분류 결과 5등급으로 추산되며, 마애여래입상 전면부 불안정성이 예상된다. 기존의 문화재 안전진단의 방법과 더불어 이들 기법은 석조문화재의 객관적인 해석 및 안정성 검토의 합리적인 도구가 될 것으로 예상된다.

주요어 : 절리, 전도파괴, face-mapping, 암반분류, 한계평형해석

Abstract The subject of this study is the Maae Buddha statue in granodiorite of the Mesozoic Cretaceous period, which is concerned about stability as a standing stone cultural property located in 00-dong, Gyeongsangbuk-do. For stability analysis, three-dimensional face mapping, geological properties of joints, three-dimensional scanning, ultrasonic velocity, polarization microscopy, electron microscopy analysis and XRD analysis were performed. In addition, the safety factor of the Maaebul was calculated by analyzing the damage status investigation, stereographic projection analysis, rock classification, and limit equilibrium analysis. The types and scales of damage and possible collapse by section depend on the degree of weathering of the rock and the orientation and characteristics of the joints, but wedge-failure and toppling-failure are expected to be small-scale. The safety factor of Maaebul in dry and wet conditions is less than 1.2, so stability is concerned. The types of damage were mainly observed, such as exfoliation, cracking, granular decomposition, and vegetation growth. The Maaebul rock is granodiorite, and the surface discoloration materials are K, Fe, and Mg. The 4 sets of joints are developed, J1 is tensile joint and the others are shear joint. The uniaxial compressive strength estimated by ultrasonic exploration is 514kgf/cm², which corresponds to most soft rocks and some weathered rocks. Rock classification(RMR) is estimated to be grade 5, very poor rock mass. These technique along with the existing methods of safety diagnosis of cultural properties are expected to be a reasonable tool for objective interpretation and stability review of stone cultural properties.

Key words : Joint, Toppling-failure, Face-mapping, Rock Mass Rating, Safety Factors

*정회원, 대전대학교 건설안전공학과 교수 (단독저자)
접수일: 2022년 11월 17일, 수정완료일: 2023년 1월 3일
게재확정일: 2023년 1월 9일

Received: November 17, 2022 / Revised: January 3, 2023
Accepted: January 9, 2023
*Corresponding Author: mhilm61@hanmail.net
Dept. of Construction Safety, Daejeon Univ, Korea

I. 서론

석조문화재는 대부분 조성된 지 연대가 오래됨에 따라 암석의 풍화정도, 지체구조 역사, 환경적 요인 등으로 인하여 문화재 손상 및 붕괴 현상이 발생하게 되고, 석조문화재의 내구성 저하가 나타나게 된다. 석조문화재는 자연환경에 노출되어 온도, 습도, 염, 생물 서식 등의 복합적인 요인들로 인해 풍화가 진행되고 있다. 뿐만아니라 급속한 산업화의 발달로 인해 발생한 환경 오염 및 대기오염 물질은 정상적으로 발생한 풍화작용보다 훨씬 빠른 풍화작용 속도를 일으키고 있다. 따라서 석조문화재 안전진단의 방법과 보전 및 대책에 대한 접근 방법이 다양해 지고 있다.

최근 문화재 안정성 분석과 대책에 대한 연구는 다양한 연구방법과 연구대상의 확대로 많은 연구결과가 도출 되고, 첨단 장비와 혁신적인 아이디어로 훌륭한 논문들이 제시되고 있다[1]. 석조문화재의 붕괴 및 손상 뿐만아니라 문화재 기저 지반의 안정성 해석에도 다양한 지질학적 및 지반공학적 기법이 적용된 연구결과가 발표되고 있다[2].

석조문화재 안정성 해석에 기존의 진단 방법과 더불어 3차원 조사, 지질학적 분석 및 비파괴탐사, 3차원 face-mapping 자료를 기반으로 안정성 해석 및 대책 등이 제시되어야 바람직하나, 이들을 기초로한 안정성 검토를 수행한 사례는 극히 드물다. 따라서 본 연구는 경상북도 00시 소재 00동에 위치한 화강암 마애불상을 대상으로(그림 1), 마애여래입상 face-mapping 자료와 단열특성조사, 단열의 평사투영 해석, 강도정수 산정을 위한 초음파탐사, 편광현미경분석, 전자현미경분석, XRD분석 및 암반분류, 다양한 조건의 안전을 계산을 위한 한계평형해석으로 석조문화재의 정량적이고 객관적인 안전진단 기법의 적용 사례를 제시하고자 한다.

II. 일반 조사 기법

1. 손상상태 조사

석조문화재의 전반적인 구성 재료에 대해 손상상태를 기재하고 문서화 하여 손상 정도를 정량적으로 평가하는 손상상태 조사는 석조문화재에서 발생하는 손상현상을 밝히고 문화재의 위험성을 예측하며 궁극적으로 보존처리의 필요성 및 처리 정도를 판단하는데 근거

자료로 활용될 수 있다.

연구대상 마애여래입상 손상형태는 도면에 표현하고, Auto CAD 프로그램을 이용하여 형상화하였다. 손상도면을 작성한 후에는 마애불에 대한 동서남북 방향별 풍화 형태에 따른 손상비율을 산출하였다. 이를 통해 가장 우세하게 일어나는 손상양상을 밝히고 손상으로 인해 취약해진 구간을 종합적으로 평가하였다.



그림 1. 연구대상 마애여래입상의 전경 사진
Figure 1. Front view of the Maebeul stone cultural statue



균열-절리	박리	입상분해	파손이탈-벽력
극갈색-갈색변색	미생물서식	초목-목본류	토양침착-퇴적
인위적훼손	표면오염물		

그림 2. 마애여래입상 전면부의 손상 유형별 전개도
Figure 2. Front view map by type of damage for the Maebeul stone cultural statue

손상상태 조사 결과, 손상유형은 박리, 균열, 입상분해, 파손이탈, 변색, 미생물 번식, 초목 성장, 인위적 훼손,

표면 오염, 등으로 분류된다. 손상 유형별 마에여래입상 전면부의 양상은 그림 2와 같다.

마에불의 손상 유형별 방향 위치별 손상 점유율은 표 1과 같이 도출되었다.

표 1. 손상 유형별 방향 위치별 손상 점유율(%).
 Table 1. Percentage of damage by direction and location by type of damage for the Maaebul statue.

type	damage by direction (%)				
	front	left	back	right	total
crack (mm)	93.02	59.53	64.59	59.48	276.6
	8	0	2	4	33
exfoliation	14.67	11.90	37.91	24.55	21.29
granular decomposition	3.28	21.47	57.82	19.50	22.30
breakage breakaway	3.21	31.53	0.00	0.43	7.89
discoloration	25.49	53.11	67.31	22.33	38.98
microbial habitat	1.07	-	-	-	0.35
herbaceous growth	-	1.94	-	13.96	4.00
soil deposition	24.42	20.90	38.15	15.08	24.03
surface contamination	1.50	0.60	18.87	4.62	5.60

2. 현미경 및 XRD 분석

마에불입상의 암석과 구성 광물을 파악하기 위해 편광현미경 분석한 결과, 주로 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 각섬석 및 일부 불투명 광물로 구성된 화강섬록암으로 판명되었다.

마에불 표면의 흠과 변색 부위의 성분 분석을 위해 전자현미경(SEM)과 XRD 분석을 수행한 결과, 표면의 흠과 변색된 물질은 K, Fe, Mg로 분석 되었다.

3. 물성시험 및 초음파 탐사

마에불입상을 구성하는 암석의 밀도, 공극율, 흡수율, 등을 파악하고, 나아가 마에불의 안전을 계산을 위해 기본 물성시험을 수행한 결과, 밀도는 2.42 ~ 2.55 g/cm³, 공극율은 4.20 ~ 5.23 V%, 흡수율은 1.15 ~ 1.59 %로 나타났다.

마에여래입상의 암반 강도를 추정하기 위해 초음파(P파) 속도를 가로×세로 20cm×20cm 면적에 4점을 선정 후 총 1300 여점의 P파 속도를 측정하였다. 그 결과 추정 일축압축강도는 514Kgf/cm²로서 대부분 연암에 해당하며 일부는 풍화암에 해당하는 것으로 판단 된다.



그림 3. 마에여래입상의 초음파속도(P파) 분포도.
 Figure 3. Distribution map of ultrasonic velocity (P wave) for Maaebul statue

III. 제안 기법

1. 단열 Face mapping

마에여래입상 암반에 발달하고 있는 단열의 지질공학 특성 파악하기 위해 단열의 종류, 연장, 틈, 거칠기 및 성인 등을 3차원 face mapping으로 수행하였다. 그 결과 마에불에 발달한 단열은 모두 절리로서 한 조의 인장절리(J1)와 세 조의 전단절리(J2 ~ J4)로 분류된다. 단열의 발달 양상은 그림 4와 같다.



그림 4. 마에여래입상 암반에 발달한 단열의 양상.
 Figure 4. Geological characteristics and type of fractures on the Maaebul statue

마에여래입상 암반의 4개면은 중규모의 판상절리와 소규모의 규칙적인 전단절리 및 불규칙적인 전단절리가 발달한 상태이며, 판상절리는 평균 간격 4m, 평균길이 8m, 평균 틈 3mm 이하, 건조한 절리상태와 풍화된 절리면으로 발달한 양상이고, 규칙적인 전단절리는 평균 간격 3m, 평균 길이 2m, 평균 틈 5mm 이하, 건조한

절리상태와 신선한 절리면으로 발달한 양상이다. 수직 절리는 평균 간격 1m, 평균길이 10m, 평균 틈 5mm 이상, 건조한 절리상태와 매우 심하게 풍화된 절리면으로 발달한 양상이다.

4조의 절리들 중 수직절리(J3)의 주향은 불상 전면의 주향과 거의 평행하게 발달하고 있고, 그 경사각은 불상 전면의 경사각보다 약간 저각 이거나 거의 같은 각도로 발달하고 있어 마에여래입상 암반의 안정성에 매우 심각한 상황을 유발할 가능성이 매우 높다. 또한, 규칙적인 전단절리(J2)와 판상절리가 수직절리와 만나 독립적인 여러 개의 암괴로 마에여래입상 암반이 분리되어 발달하고 있어 역시 마에여래입상 암반 전면의 안정성에 매우 불리하다. 표 2에는 마에불에 발달한 단열의 종류와 배향(주향과 경사)을 나타내었다.

표 2. 마에불 암반 내 단열의 종류와 배향
Table 2. Type and orientation of fractures in Mae-Buta.

Fracture Direction of Mae-Buta	Type	Dip direction/dip	Main fracture
Front 100/78	Sheeting joint(J1)	140~210/10~20	Vertical joint 080/86 ~ 090/80
Right 345/62	Shear joint(J2)	130~160/45~50	
Back 280/86	Vertical joint(J3)	080/86 ~ 090/80	
Left 165/80	Irregular joint (J4)	090/80	

2. RMR과 GPR 탐사

암반의 안정성 및 양호 상태를 등급별로 나누는 방법에는 Q-system 방법과 RMR 분류법이 있으나, 본 연구에서는 마에불 암반의 육안관찰 결과와 암석의 실내 물성 및 역학시험 결과를 종합하여 편의상 RMR 분류법을 이용하였다. 마에여래입상 암반은 비교적 괴상의 암반으로 나타나며, 평균 3m 간격의 판상절리와 평균 1m 간격의 규칙적인 전단절리, 평균 0.3m 간격의

표 3. 마에여래입상 암반의 RMR 등급
Table 3. RMR of rock mass for Mae-Buta statue

RMR factors	Uniaxial compressive strength (kg/cm ²)	RQD(%)	Spacing (m)	Condition	Condition of groundwater	Intersection angle	Score of RMR	Rating	Cohesion (T/m ²)	Internal friction angle
Mae-Buta	133 ~ 547	10~80	>0.5	Planar	Dry	Very poor	0	V	c <10	Φ <30°
Score	4	5~15	15	8	15	-60				

수직절리 및 소규모 불규칙 전단절리가 발달하고 있어 암반이 비교적 절리들에 의해 이완된 상태여서 안정성이 아주 불량한 상황이다.

또한, 암석 내 단열면 (특히 수직절리면) 간의 결속력이 매우 약하고 틈이 넓은 상태여서 강우기는 물론이고, 동결·융해특성에 기인한 암괴 이완 현상이 발생할 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

암반분류 결과 RMR 점수는 0점 이하로서 매우 불량한 암반인 5등급으로 분류 되었다.

검토 마에여래입상 암반의 RMR 주 변수 값과 RMR 등급은 표 3에 요약 하였다.

마에여래입상 암반 내부의 단열상태를 파악하기 위해 1.7m ~ 3.4m 연장의 13개 축선으로 GPR 탐사를 수행하였다. 그 결과, 마에여래입상 암반 내 단열들은 서로 연결되어 있고, 하부에 큰 단열이 존재하는 것으로 파악되었으며, 단열 폭은 상대적으로 넓은 것으로 추정된다.

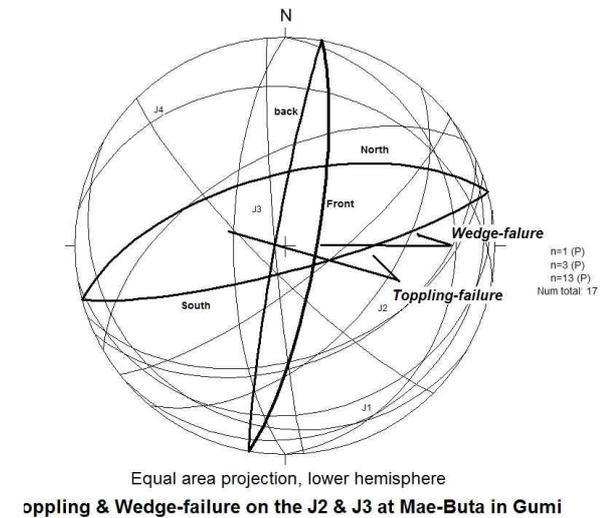


그림 5. 마에여래입상 암반의 평사투영도.
Figure 5. Stereographic projection map of the Mae-Buta statue

IV. 안정성 검토

1. 평사투영해석

마애여래입상 암반 전면과 후면, 남면 및 북면은 평사투영도에 굵은 대원으로 표시하였고(그림 5), 마애여래입상 암반 내 단열면의 종류인 판상절리(J1), 규칙적인 전단절리(J2), 수직절리(J3) 및 불규칙적인 전단절리(J4)에 대한 평사투영해석 결과 마애여래입상 암반의 파괴 여부에 대한 평사투영도를 작성하여 그림 5에 나타내었다. 검토 결과, 마애여래입상 암반은 J1과 J2 및 J3에 의해 암반이 분리된 상태이며 이완된 암체는 대부분 마애여래입상 전면과 거의 평행하게 배열되어 있으므로 단열면 중 J3 수직절리에 의해 주로 전도파괴가 발생할 것으로 예상된다.

2. 안정성 검토

마애여래입상 암반의 안정성 검토를 위해 암반과 마애여래입상 안정성 해석 프로그램을 통해 분석해야 하나 현장 여건상 수기로 간단히 한계평형해석을 수행하였다.

마애여래입상 암반의 안정성에 가장 큰 영향을 주는 주된 요인은 단열면의 전단강도이며, 기존의 마애여래입상 암반과 동일한 암석을 대상으로 절리면 전단 시험과 각종 물성치 시험을 실시하여 도출된 결과를 이용하여 안정성 해석을 수행하였으며, 적용한 입력 값은 표 4와 같다.

표 4. 마애여래입상 암반 안정성 해석에 사용한 입력 값.
 Table 4. Input data of rock mass for stability of Maaebul.

	Face	$\gamma(\text{tf/m}^3)$	$c(\text{tf/m}^2)$	$\phi(^{\circ})$
Maaebul statue	Front(upper)	1.8	10	30
	Front(lower)	2.2	10	30

표 5는 마애여래입상 암반에 대한 한계평형해석 결과 안전율을 나타내었다. 마애여래입상 암반의 안정성을 검토한 결과 마애여래입상 암반 상부 전면부 안전율이 0.94와 하부 전면부 안전율이 1.14의 범위를 나타내어 허용 안전율인 $F_s = 1.2$ 를 만족하지 못하고 있어 마애여래입상 암반의 안정성에 문제가 있음을 알 수 있다[3]. 따라서 마애여래입상 암반의 붕괴에 대한 보호·보강 공법을 시급히 강구하여 외관성 안정감 확보 및 문화재 보전 차원의 대책을 도모하는 것이 바람직한 것으로 판단된다[4].

마애여래입상의 한계평형해석으로 도출한 건기 시와 우기 시의 안전율 해석 결과는 표5에 제시하였다.

표 5. 마애여래입상의 건기 시와 우기 시의 안전율
 Table 5. Safety factors for dry and wet condition of the Maaebul statue

	safety factor(F_s)		remark
	dry	wet	
Maaebul statue	1.14	0.94	limit criterion dry: 1.2 wet: 1.5

V. 결론

연구지역은 경북 00에 소재한 석조문화재 마애여래입상에 대해 일반적인 문화재 안전진단 기법과 더불어 단열의 지질학적 특성, 편광현미경 분석, face mapping, GPR 탐사, 초음파 탐사, 암반분류 및 한계평형해석 등의 다양한 기법을 추가하여 석조문화재의 안정성을 검토하였고, 새로이 제시한 기법이 합리적이고 객관적인 방법임을 제시하였다.

1. 마애여래입상 암반 상부는 심하게 풍화가 진행되고 있고, 마애여래입상 암반은 흑운모각섬석화강섬록암으로 구성되며 비교적 괴상의 암반으로 나타나나, 마애불의 판석은 역질사암으로서 외부에서 잘못 반입한 암석으로 추정된다.

2. 마애여래입상에 발달한 단열은 평균 5m 간격의 판상절리와 평균 3m 간격의 규칙적인 전단절리, 평균 1m 이하의 간격을 보이는 수직절리 및 소규모 불규칙 전단절리가 발달하고 있어 암반이 단열들에 의해 이완된 상태에서 풍화작용을 심하게 받은 상황이며, 또한, 암석 내 단열면 (특히 수직절리면) 간의 결속력이 매우 약하여 강우기는 물론이고, 동결·융해특성에 기인한 암괴 이완 현상이 발생할 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

3. 마애여래입상 암반은 대규모의 수직절리, 중규모의 판상절리와 소규모의 규칙적인 전단절리 및 불규칙적인 전단절리가 발달한 상태이며, 판상절리 (J1)의 경사는 20도 이내로 발달하고 있다. 규칙적인 전단절리 (J2)는 그 경사각은 마애여래입상 암반 4개 면의 경사각보다 훨씬 저각인 45도로 분포하고 있으나 수직절리인 J3의 주향은 불상 전면과 후면의 주향과 거의 평행하고 경사각은 거의 수직으로 발달하고 있어 전술한

절리들과 조합하여 분리된 암괴로 존재하고 있다. 따라서 마에여래입상 암반의 안정성에 매우 불리하게 발달하고 있으며, 단열의 평사투영해석 결과도 수직절리를 따른 전도파괴 및 켜기파괴가 일어날 것으로 판단된다.

4. 마에불의 암반 육안관찰 결과와 Face-Mapping 조사 결과 및 기존 암석의 물성시험 결과를 종합하여 편의상 석조문화재에 적용이 용이한 RMR 암반분류 결과, RMR 점수는 0점 이하로 5등급의 매우 불량한 암반으로 분류되는 것으로 판단된다.

5. 마에여래입상 암반은 대부분 풍화암 ~ 연암 상태를 유지하고 있고, 풍화가 매우 많이 진행된 풍화상태가 매우 불량한 양상이며, 마에여래입상 암반의 주 구성 암석인 흑운모각섬석화강섬록암은 조립질의 석영과 정장석, 사장석, 흑운모, 각섬석 및 기타 유색광물로 구성된 심부 관입의 등립질 · 완정질 화성암으로 괴상이며, 1m 이하의 작은 간격으로 발달한 수직절리가 불상 전면과 평행하게 발달하고 있는 상태여서 마에여래입상 암반 전체가 매우 불안정적인 상태인 것으로 판단된다.

6. 마에여래입상 암반의 위치는 주능선에서 분지된 소 능선의 말단부에 해당하여 지표수 및 지하수의 흐름이 마에여래입상 암반 아래로 배수되는 양상이어서 강우기에 물에 의한 파괴가 예상되며, 더불어 동절기 암반 내 단열면을 따른 동결 · 융해특성에 기인한 암괴의 이완 현상이 발생할 가능성도 매우 높은 것으로 판단된다.

7. 마에여래입상 암반의 안정성을 검토한 결과 안전율이 0.94~1.14의 범위를 나타내어 기준 안전율인 $F_s = 1.2$ 에 충분히 만족하지 못하는 것으로 판단되므로 마에여래입상 암반에 보호 및 보강공법 등의 조치를 실시하여 안정성을 확보하는 것이 유리할 것으로 사려되며 또한, 문화재 보호 차원에서 빠른 대책을 강구 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

결론적으로 석조문화재 안정성 검토 시에는 기존의 안전진단 기법과 더불어 단열특성 조사, 지질 face-mapping 기법, 암반분류, 평사투영해석, GPR 탐사, 초음파 탐사 및 한계평형해석 기법 등이 합리적이고 객관적인 안전진단 도구가 될 것으로 판단된다.

References

- [1] Ihm, Myeong-Hyeok., 2019, Engineering geological evaluation of stability for the stone cultural properties in Korea, 2019 Fall Conference, The Korean Society of Engineering Geology, (in Korean with English Abstract).
- [2] Ihm, Myeong-Hyeok., 2018, Stability of the stone cultural properties and ground using the GSR technique and 3D geological face mapping in Korea, 2018 Conference, The Korean Society of Disaster Prevention and Safety, (in Korean with English Abstract).
- [3] Ihm, M. H., 2021, Countermeasures for slope stability on coal-seam bearing mudstone using the geological cross-sections, Tunnel & Underground Space, 31(2), 98-110, (in Korean with English Abstract).
- [4] Ihm, M. H. and Park, J. Y., 2017, Study on the geological characteristics and slope stability of Nammyeom reservoir in Bonghwa County, Kyungpook Province, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, 27(2), 77-88, (in Korean with English Abstract).

※ 이 논문은 2022학년도 대전대학교 교내학술 연구비 지원에 의해 연구되었음.