

실내실험과 수치해석을 이용한 암반지보구조물의 응력거동 분석을 위한 기초 연구 Preliminary Study on Stress Analysis of Rock-mass Support Structure using Laboratory Test and Numerical Simulation

이재호¹⁾, Jae-Ho Lee, 문홍득²⁾, Hong-Deuk Moon, 유지형³⁾, Ji-Hyeung Yoo, 김혁⁴⁾, Hyuk Kim,
손영주⁵⁾, Yeong-Ju Son

¹⁾ (주)메카지오테크 연구사업부 이사, Director, Researcher an Division, Mecageotech CO., LTD

²⁾ 국립진주산업대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Jinju National University

³⁾ 경일대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyung-Il University

⁴⁾ 경일대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyung-Il university

⁵⁾ 국립진주산업대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Jinju National University

SYNOPSIS : In this study is stress behavior of steel support structure is to identify basic research. Steel stress due to load step to determine the behavior of steel using strain gauge steel loading test was performed. Numerical analysis and steel loading test using strain gauge on the actual steel stress behavior was analyzed. First, when tensile loading 3.5tonf load side of the plastic behavior appeared. Elastic model, using numerical analysis and comparison of results, the actual value is saved and you can see some difference. This repeated loading tests on steel can be seen from the results of the stress behavior of the steel rather than the elastic behavior of elastic-plastic behavior is because you can see. In addition, the upper and lower steel stress in compression and tension behavior represents the behavior was similar, but different. Steel loading test results, Y-axis get a compression if X-axis is tension.

The future based on this study, the stress sensitivity curve of magnetic anisotropy sensor for non-destructive stress measurement technique for the study will be performed. And the behavior of plastic zone and residual stress to determine the numerical analysis using non-elastic model is needed.

Keywords : stress behavior, steel support structure, numerical analysis

1. 서론

최근, 1960년대에서 90년대에 건설된 댐, 도로, 교량, 터널 등 토목구조물에 대한 노후화가 문제가 되고 있으며, 2010년 이후에는 이것이 하나의 사회적인 이슈로 대두될 것으로 판단된다. 노후화된 토목구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 현재 구조물이 받고 있는 응력값을 파악하는 것이 중요하다.

특히 토목구조물의 응력은 대상지반에 설치되기 전 제작, 가공 그리고 조립단계에서 재료에 영향을 끼치므로 정밀한 값을 이해하는 것은 현실적으로 매우 어렵다.

과거 시공된 토목구조물에 대해 정확한 응력값을 파악하기 위해서는 첫째, 간편성과 적용성이 뛰어난 비파괴 응력장치의 개발, 둘째, 재료의 제작, 가공, 조립과 같은 각각의 단계에서 가해진 응력에 대한 개념 정립 및 분석도구의 개발이 우선되어야 한다.

본 연구에서는 암반지보구조물에 적용될 강지보공 응력거동을 파악하기 위한 기초적 연구로 수치해석과 실내실험단계에서 변형률 게이지로 측정된 계측결과와의 비교를 수행하였다.

2. 강지보 구조물의 응력거동

강지보 구조물(H-beam)은 제작 단계인 압연가공, 냉각, 냉간 휩 가공을 거쳐서 만들어 지며, 이 H-beam은 현장에 적용시 휩 하중을 가하여 굽힌 다음 현장에 적용되게 된다. 이때 H-beam에는 응력이 발생하는데 제작과정에서 발생하는 잔류응력과 휩 하중을 가하여 발생하는 휩 응력이다. 이러한 H-beam의 응력거동을 해석하기 위해서는 잔류응력과 휩 응력을 순차적으로 해석할 필요가 있다.

먼저 잔류응력은 H-beam의 제작과정 시 용접을 가하여 만들기 때문에 그림 1과 같은 응력이 존재하게 된다. 플랜지와 웹이 접촉되는 부분에는 인장이, 플랜지의 날개와 웹의 중앙에서는 압축이 발생한다. 이는 접촉하는 부분에 용접 후 냉각시 위치마다 식는 속도가 다르기 때문에 그림 1과 같은 응력분포도가 발생하게 된다.

휩 응력은 H-beam이 제작된 후 하중을 가하여 아치형태의 H-beam을 만들게 된다. 이때 H-beam은 소성변형을 거쳐 만들어지며 응력거동은 탄소성 거동을 하게 되며 그림 2와 같다. 그림 2에서 보는 바와 같이 OE 구간에서는 탄성 거동을 하다가 B 구간에서 하중을 제거하면 BC와 같이 탄소성 거동을 보인다. 이렇게 소성을 겪은 H-beam은 하중 재하시 발생하는 탄소성응력과 하중 제하시 원래대로 돌아오려는 탄성응력과 만나게 되어 그림 3과 같은 응력분포도를 가지게 된다. 따라서 상기와 같은 과정을 거쳐 시공 전 강지보 구조물은 잔류응력과 휩 응력인 2가지의 응력이 동시에 존재하게 되며, 이러한 과정을 거친 H-beam은 초기에 가지고 있던 항복강도와 상이한 응력강도가 존재하게 된다. 그림 3의 좌측은 단면에 대한 응력분포도이고 우측은 변형률 분포도이다.

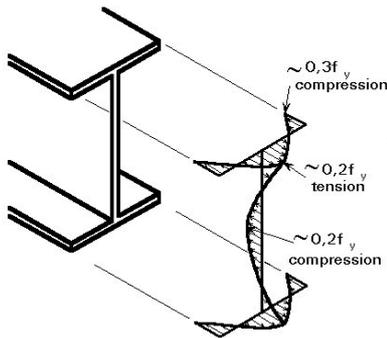


그림 1. H-beam 잔류응력분포

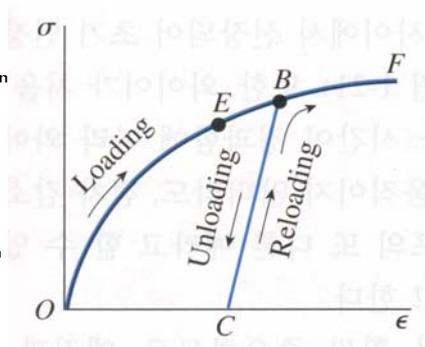


그림 2. 응력-변형률 관계

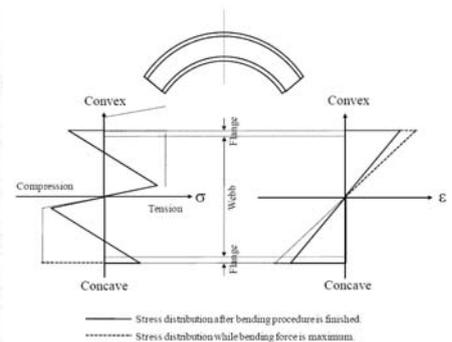


그림 3. 휩 가공시 응력-변형률 거동

강지보 구조물은 공장에서 제작 후 현장에 반입 된다 이렇게 반입된 강지보 구조물은 현장 상황에 맞게 휩 가공되어 터널에 적용된다. 현장에 반입되기 전 강지보 구조물은 총 3단계의 가공(H1, H2, H3)이 종료된 시점에서 소정의 곡률을 가지게 되어 냉간 및 휩 가공의 영향을 받아 잔류응력을 가진 상태가 되는 것을 그림 4에 나타내었다. H1, H2, H3는 현장에 반입 전을 나타낸 것이고, H4, H5는 현장에 반입 후의 모습이다.

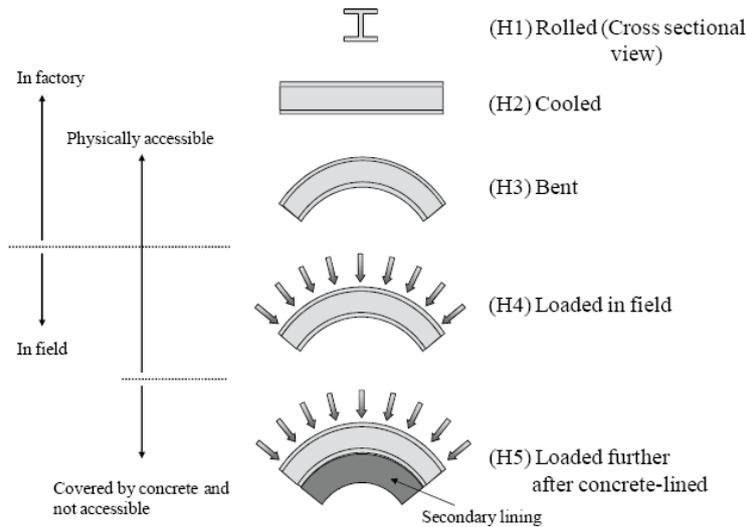


그림 4. 강지보 구조물 가공단계에 따른 강재의 이력

3. 강재하중재하시험

3.1 개요

강지보 구조물의 응력거동을 파악하기 위한 기초 연구로서 하중단계에 따른 강재의 응력거동을 파악하기 위하여 변형률 게이지를 이용하여 강재하중재하 시험을 수행하였다. 강재하중재하시험에 사용된 강재는 구조용 압연 강재인 SS400을 사용하였으며, 사용된 강재의 화학조성 및 역학적 특성은 표 1에서 보는 바와 같다. 그림 5는 강재하중재하 시험을 위해 제작된 시험편의 모식도이고, 그림 6은 강재하중재하시험 모식도이다. 그림 7은 변형률 게이지 부착위치를 나타내고 있다. 실험에 사용된 변형률 게이지는 전기저항식 2축 센서(Tokyo Sokki, Type. FCA-5-11-1)를 사용하였으며, 변형률 게이지의 길이는 5 mm이고, 변형률 게이지 저항치는 $120 \pm 0.5 \Omega$ 이다. 그림 8은 강재하중재하시험 전경을 보여주고 있으며, 강재하중재하시험을 위해 100tonf까지 하중재하가 가능한 구조모형 시험 장치를 이용하였다.

표 1. 강재(SS400) 제원표

강종	CHEMICAL COMPOSITION, %							TENSILE TEST		
	C	Si	Mn	P	S	Alt	B	항복강도 MPa	인장강도 MPa	연신율 %
SS400	0.18	0.02	0.81	0.011	0.006	0.025	0.016	245	425	23.0

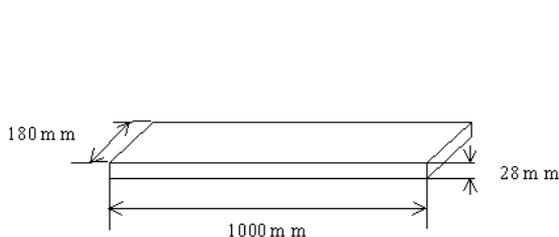


그림 5. 강재하중재하시험에 사용될 시험편

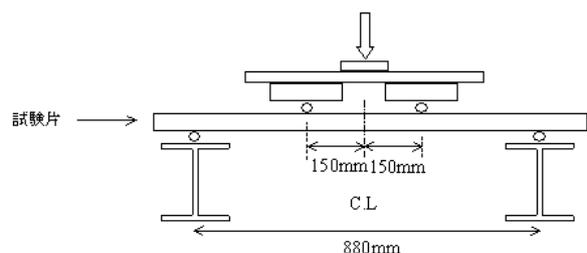


그림 6. 강재하중재하시험 모식도

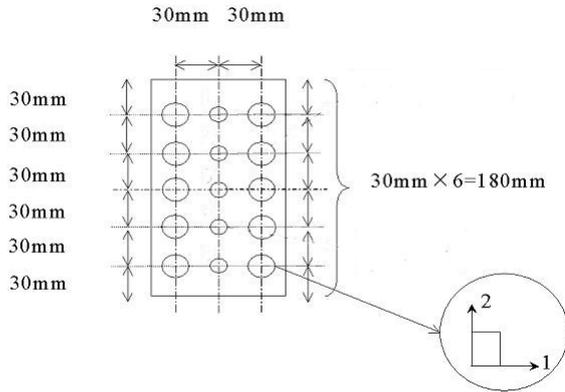


그림 7. 변형률 게이지 부착 위치



그림 8. 강제하중재하시험 전경

강제하중재하 시험은 각 재하조건에 따라 총 5번의 실험을 수행하였으며, 각 실험에 대한 하중재하조건은 표 2에서 보는 바와 같다. 또한 시험편의 항복하중 이상의 하중재하를 통하여 강재의 소성영역을 확인하였다.

표 2 강제하중재하시험 하중재하조건

구분	1st Test	2nd Test	3rd Test	4th Test	5th Test
하중재하조건	초기	초기	초기	초기	초기
	0.75t Loading	0.5t Loading	0.75t Loading	0.75t Loading	0.5t Loading
	1.50t Loading	1.0t Loading	0.75t Unloading	1.50t Loading	0.5t Unloading
	2.25t Loading	1.5t Loading	1.50t Loading	2.25t Loading	1.0t Loading
	2.27t Loading	2.0t Loading	1.50t Unloading	2.75t Loading	1.0t Unloading
	2.25t Unloading	2.5t Loading	2.25t Loading	2.25t Unloading	1.5t Loading
	1.50t Unloading	3.0t Loading	2.25t Unloading	1.50t Unloading	1.5t Unloading
	0.75t Unloading	3.5t Loading	2.75t Loading	0.75t Unloading	2.0t Loading
	0.00t Unloading	4.0t Loading	2.75t Unloading	0.00t Unloading	2.0t Unloading
		4.5t Loading			2.5t Loading
		5.0t Loading			2.5t Unloading
					3.0t Loading
					3.0t Unloading
					3.5t Loading
					3.5t Unloading
				4.0t Loading	
				4.0t Unloading	
				4.5t Loading	
				4.5t Unloading	

3.2 실험결과

강제하중재하시험 결과를 살펴보면, 그림 9에 하중재하단계에 따른 강재의 중앙지점 상부(압축측)와 하부(인장측)의 X축 방향 변형률을 나타내었으며, 그림 10부터 그림 12까지는 강관상부에서 압축측 X축 방향 변형률 게이지를 부착한 위치에서 하중재하단계에 따른 각각의 응력값을 도시한 것이다. 그리고 그림 13은 좌우측 변형률 게이지에서 측정된 응력값과 중앙지점에서 측정된 응력값을 비교한 것이다.

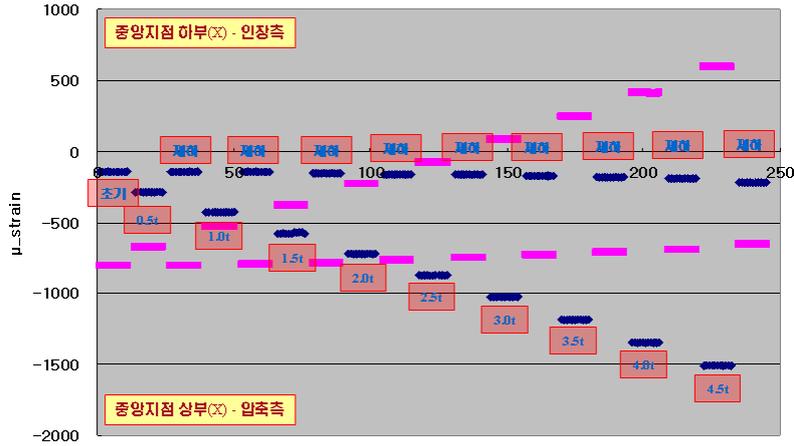


그림 9. 5th Test 변형률 측정 결과

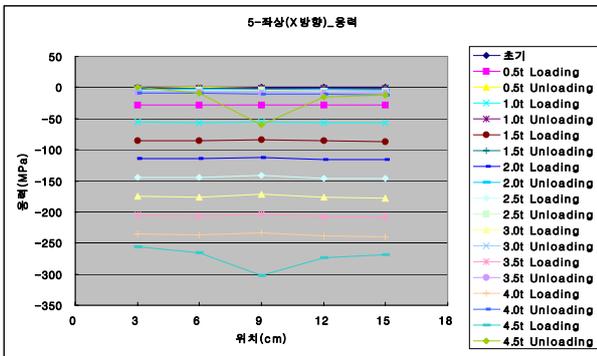


그림 10. 변형률 게이지 위치에 따른 응력값 (좌측 상부-X방향)

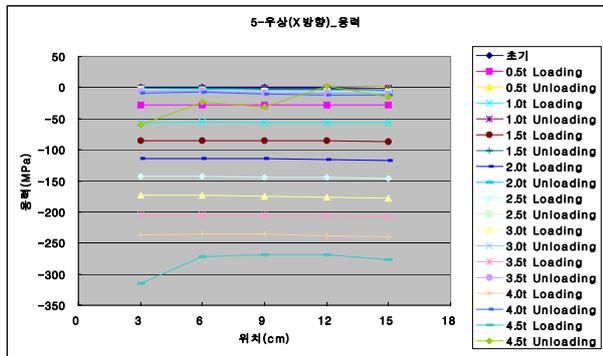


그림 11. 변형률 게이지 위치에 따른 응력값 (우측 상부-X방향)

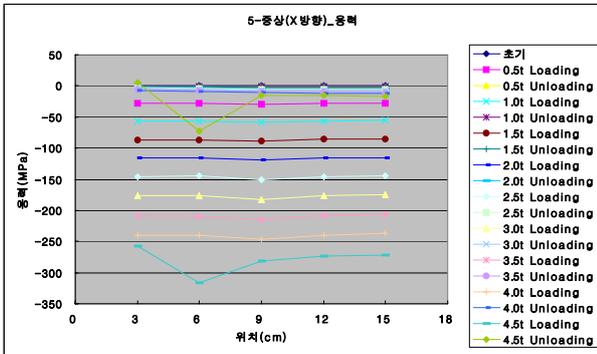


그림 12. 변형률 게이지 위치에 따른 응력값 (중상 상부-X방향)

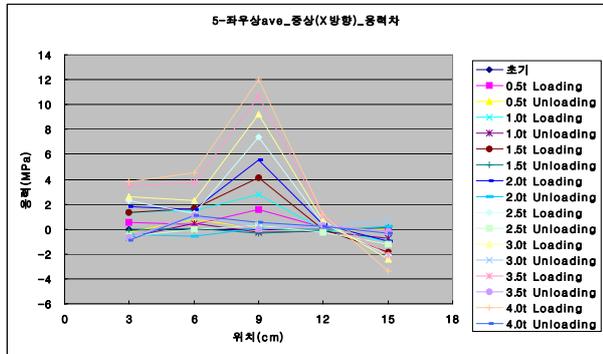


그림 13. 변형률 게이지 위치에 따른 응력차

4. 수치해석

4.1 수치해석 개요

본 연구에서는 강제하중재하시험과 수치해석 결과와의 비교·분석을 위하여 구조해석 유한요소 프로그램인 SAP2000과 MIDAS CIVIL을 이용하여 강제하중재하시험과 동일한 조건으로 수치해석을 수행하였다. 그림 14는 강제하중재하시험의 모델링 상태를 보여주고 있으며, 그림 15는 수치해석 결과로 하중

재하로 인한 강재의 응력분포를 나타내고 있다.

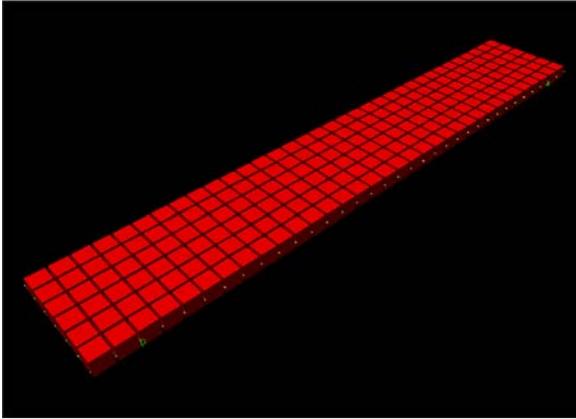


그림 14. 수치해석을 위한 유한요소 모델링

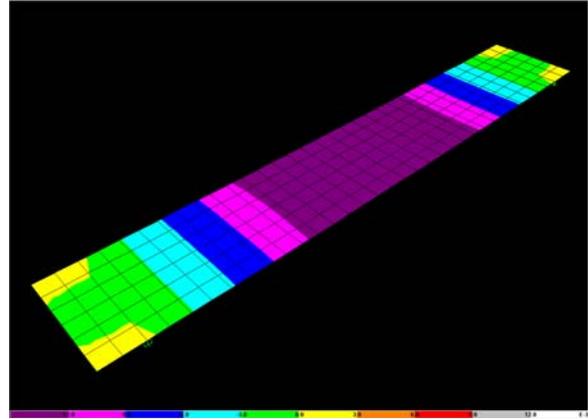


그림 15. 하중재하로 인한 강재의 응력 분포

4.2 수치해석 결과 비교 · 분석

강재하중재하시험의 결과와 수치해석의 결과를 비교한 결과를 그림 16과 17에 각각 나타내었으며, 그림 18은 하중재하단계에 따른 응력값을 비교하였으며, 그림 19는 재하하중에 따른 처짐값을 비교하여 도시하였다.

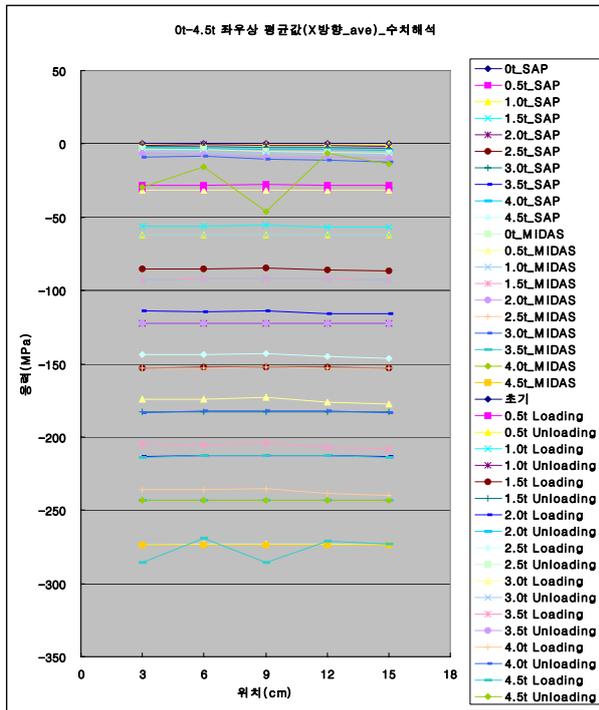


그림 16. 수치해석 결과와의 비교
(좌우 상부 평균 응력 - 수치해석 응력)

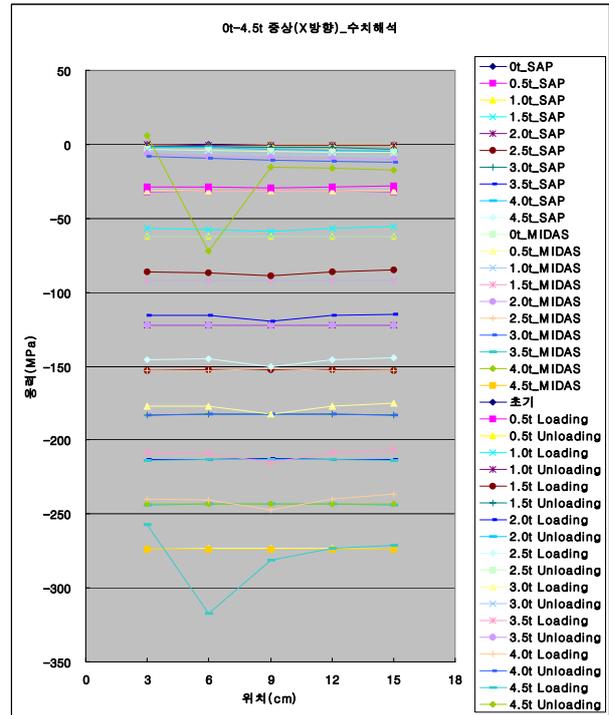


그림 17. 수치해석 결과와의 비교
(중앙 상부 응력 - 수치해석 응력)

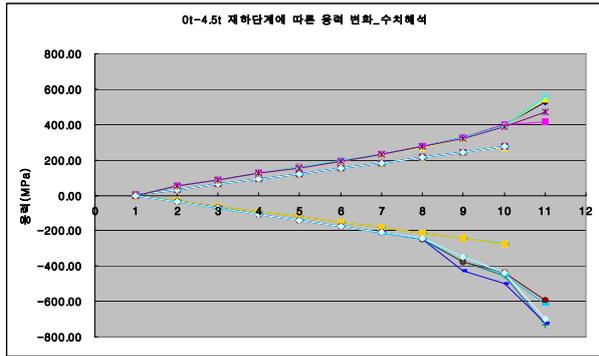


그림 18. 하중재하단계에 따른 응력값 비교

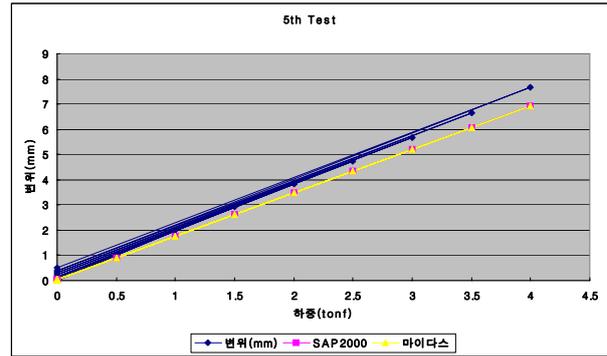


그림 19. 재하하중에 따른 처짐값 비교

5. 결론

본 연구는 강지보 구조물의 응력거동을 파악하기 위한 기초 연구로서 하중단계에 따른 강재의 응력거동을 파악하기 위하여 변형률 게이지를 이용하여 강제하중재하 시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

수치해석과 변형률 게이지를 이용하여 강제하중재하시험을 통한 실제 강재에 대한 응력거동을 분석한 결과, 우선 3.5tonf의 하중을 재하 하였을 때 인장측에서 소성거동이 나타났으며, 탄성모델을 이용한 수치해석 결과와 비교하여 볼 때, 실측값과 다소 차이를 보임을 알 수 있다. 이것은 강재에 대한 반복재하시험 결과에서 알 수 있듯이 강재의 응력 거동이 탄성 거동이 아닌 탄소성 거동을 하기 때문임을 알 수 있다. 또한 강재의 상부와 하부의 응력거동은 압축과 인장만 다를 뿐 유사한 거동을 나타냄을 알 수 있었으며, 강제하중재하시험 결과, X축이 인장을 받을 경우 Y축은 압축거동을 보이고 있었다.

향후 본 연구를 토대로 비파괴 응력 측정 기법인 자기이방성 응력센서의 응력감도곡선에 대한 연구를 위하여 소성영역 및 잔류응력의 거동을 파악하기 위해 비탄성모델을 이용한 수치해석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원 「09기술혁신E03」에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Akutagawa, S., Takeuchi, K., Sakurai, S., (2000), "A comparative study on the performance of back analysis procedures for identification of nonlinear deformational behavior of a rock mass around a large underground powerhouse cavern" *Proceedings of the 4th North American Rock Mechanics Symposium*, Seattle, pp.1035-1041.
2. JSCE 1987. *Guideline for buckling design*. Steel structure series 2.
3. S. Akutagawa, K. Matsuoka, H. Sekimoto, T. Kobayashi, T. Uda, M. Ota and K. Yasuhara, (2003), "Use of Magnetic Anisotropy Sensor for Nondestructive Stress Measurement of H-beams Used in Tunnel Support Systems", *Proceedings of the 39th US Rock Mechanics Symposium*, MIT. 2691-2696.