

자기이방성 응력측정법을 이용한 강아치 지보구조물의 비파괴 계측 Non-destructive Measurement of H-beam in Support System using a Magnetic Anisotropy Sensor

유지형¹⁾, Ji-Hyeung Yoo, 문홍득²⁾, Hong-Deuk Moon, 이재호³⁾, Jae-Ho Lee, 김대성⁴⁾, Dae-Sung Kim,
김혁⁵⁾, Hyuk Kim

- 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-II University
⁴⁾ 경일대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyung-II university
⁵⁾ 경일대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyung-II university

SYNOPSIS : Currently in increasing number of urban tunnels with small overburden are excavated according to the principle of the New Austrian Tunneling Method(NATM). Successful design, construction and maintenance of NATM tunnel demands prediction, control and monitoring of ground displacement and support stress high accuracy.

A magnetic anisotropy sensor is used for non-destructive measurement of stress on surfaces of a ferromagnetic material, such as steel. The sensor is built on the principle of the magneto-strictive effect in which changes in magnetic permeability due to deformation of a ferromagnetic material is measured in a non-destructive manner, which then can be translated into the absolute values of stresses existing on the surface of the material. This technique was applied to measure stresses of H-beams, used as tunnel support structures, to confirm expected measurement accuracy with reading error of about 10 to 20MPa, which was confirmed by monitoring strains released during cutting tests The results show that this method could be one of the promising technologies for non-destructive stress measurement for safe construction and maintenance of underground rock structures encountered in civil and mining engineering.

Keywords : tunnel support system, non-destructive measurement, magnetic anisotropy sensor

1. 서 론

터널굴착의 경우 계측단면으로부터 막장이 멀리 떨어져 있는 단계에서 지보구조물 및 지반의 응력과 변형거동은 수렴하는 것이 일반적인 특징이다. 본 연구 대상인 대단면 터널의 단층부에서는 막장이 충분히 멀리 떨어진 후 계측 단면부근의 슛크리트 응력거동은 거의 수렴하고 있는 것에 반해 계측단면 부근의 H-beam(강아치) 지보공은 응력이 증가하는 경향이 관찰되어 졌다. 슛콘크리트와 H-beam(강아치) 지보공의 응력 거동에 대한 역학적인 메커니즘을 설명하기 위해 본 연구에서는 새로운 응력계측수법으로 주목을 받고 있는 자기이방성센서(magnetic anisotropy sensor) 응력 측정 장치(Akutagawa 등, 2003; Sakai & Tamura 등, 2000)를 이용하여 분석해 보았다. 자기이방성센서 응력측정방법은 철 등의 강자성체(強磁性體, ferromagnetic)의 자기특성이 변형에 의존하는 것을 이용하여 대상구조물(강재) 표면의 절대응력을 구하는 방법이다. 본 연구에서는 자기이방성 응력측정법에 의한 계측과 변위계측 결과를

이용하여 단층부근을 지나가는 지반과 지보구조물의 변형과 응력 거동의 특성을 분석해보았다.

2. 자기이방성 센서

자왜법은 그 강자성체의 자기왜곡 효과를 이용한 응력측정방법이다. 사진 1과 같은 4개의 발을 가진 원주형상의 자기이방성 검출센서(이하, 자기프로브)를 피측정물에 대고 측정한다. 그 4개의 발에는 대각 선상으로 각각 여자용 코일(그림 1의 E1, E2 부분), 검출용 코일(그림 1의 D1, D2 부분)이 감겨 있다. 그림 1에 보이는 것과 같이 응력상태로 생각하면, 피측정물의 투자율이 인장 방향으로 커지는 자기이방성이 생긴다.



사진 1. 자기이방 검출센서

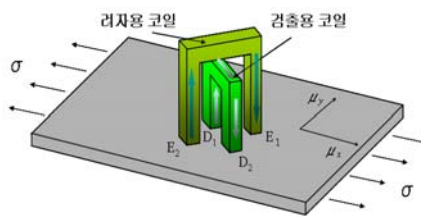


그림 1. 센서구조와 응력상태

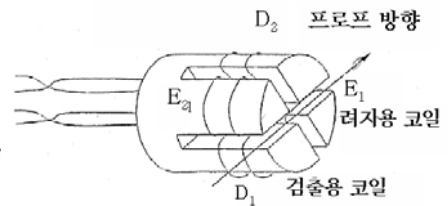


그림 2. 센서의 세부구조

자기프로브를 피측정물에 대고 여자용 코일에 전류를 흘리면, E1, E2 사이에 자속이 흐르지만, 그 대부분은 직접 E1에서 E2로 향한다. 하지만 일부는 화살표에 보이는 경로로 따라가지만, 자기이방성이 생길 경우 E1 D1사이, D2 E2사이에는 E1 D2사이, D1 E2사이에 비해 투자율이 $(\mu_x - \mu_y)$ 만큼 발생하기 때문에 실선 화살표에 보이는 경로에 자속이 흐른다. 이 자속량의 변화에 의한 전압이 발생된다. 이 때문에 검출용 코일에는 전압이 생기게 된다. 이 전압 V 는 식(1)과 같이 계산된다.

$$V = N(\mu_x - \mu_y) \quad (1)$$

여기서, N 은 여자조건, 피측정물의 자기적 특성 및 자기프로브와 피측정물의 거리(리프트 오프) 등에 의해 정해진 정수이다. 투자율의 이방성은 그 방향의 응력차에 비례하기 때문에 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = k(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (2)$$

여기서, k 는 응력강도이다. 응력강도란 자왜법에 의해 검출된 출력전압과 응력을 관계 짓는 계수이고, 재료에 따라 다르다. 그 때문에 미리 그 재료에 따라 응력과 출력전압과의 관계를 나타낸 교정곡선을 만들어둘 필요가 있다. 이 출력전압과 응력의 관계는 피측정물이 탄성거동범위 내에서는 어느 정도의 선형관계를 나타내 공학적으로 다루지는 성질을 가진다. 하지만, 소성거동범위가 되면 이 관계가 무너지기 때문에 주의할 필요가 있다. 자기 프로브를 피측정물의 표면에 회전시켰을 때의 출력은 180° 주기의 \cos 커브가 존재하게 된다. 그리하여 σ_1, σ_2 는 피측정물에 작용하는 주 응력, ϕ 는 프로브방향과 σ_1 방향과의 각을 만든다. 프로브 방향이란 그림 2의 화살표 방향이다. 자기 프로브를 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 라는 4방향으로 회전시켜 출력전압이 최대가 되는 방향을 구하면, 그때의 자기 프로브 방향이 주응력 σ_1 의 방향이고, 출력방향에서의 주응력차($\sigma_1 - \sigma_2$)를 구할 수 있다.

다만, 피측정물에 작용하는 응력이 일축방향인 것만이 명료한 경우이고, 또 미리 피측정물의 응력강도가 구해져 있을 때 그 축 방향으로 자기 프로브 방향을 고정하고 계측하는 1방향 계측으로 응력치를 구할 수 있다. 전 식에서 $\sigma_1 = 0, \phi = 0$ 이 되기 때문에, 얻어진 출력전압에서 그 축 방향에서의 응력치를 알 수 있다. 하지만, 응력상태를 모르는 경우는 자기 프로브를 회전시켜 4방향 계측을 행할 필요가 있다.

또한, 그 정도로써는 교량분야의 적용사례에서 $10 \sim 20\text{MPa}$ 정도의 오차를 보이고 있고, 그것은 강재의

응력상태를 파악할 목적으로 사용된 경우, 항복응력, 최종파단응력의 레벨(250MPa 이상)을 고려하면 공학적으로 충분한 해상도를 가지고 있다고 생각할 수 있다.

3. 응력감도곡선

응력감도곡선이란 응력의 변화량에 대한 센서의 출력 전압을 나타낸 곡선으로 여기서 구한 교정곡선을 기초로 하여 실제의 응력을 측정할 때에 측정점에서 구한 출력 전압을 역으로 대입하여 그 지점에서의 응력을 측정한다. 응력과 출력전압 관계를 알기 위해서 강재의 4점 휨 재하시험을 실시하였다. 그림 3에 재하시험의 모식도를 나타내었다. 여기에 이용된 공시체는 실제의 대단면 터널에 이용되고 있는 강재(SS540, H-250×250×9×14)를 사용하였으며, 휨 가공을 실시하지 않은 강재, 상반용 지보공의 곡률(10228.6)로 휨 가공된 강재, 하반용 지보공의 곡률(7740.2)로 휨 가공된 강재 3개를 시험체로 이용하여 각각의 상철(上凸)상태, 하철(下凸)상태에서의 재하를 실시하였다. 여기서 구한 값을 이용하여 원점보정을 하고 교류 소자를 거쳐 시험에서 얻어진 출력전압과 응력의 관계를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 응력은 변형률 게이지에서 얻어진 값에 탄성계수를 곱해서 얻어진 응력이다. 범례는 플랜지단부에서의 위치를 나타내고 있다. 그림 4로부터 플랜지 단부의 85, 95, 105 및 145, 155, 165mm 위치에서의 결과는 응력이 0일 때의 출력 전압이 거의 0이 나타났으며, 이 6개 위치에서의 결과로부터 잔류응력을 산출하기 위한 대표적 응력감도곡선을 아래의 식(3)과 같이 산출하였다. 그림 4는 응력감도곡선으로 y축이 응력, x축이 출력전압을 의미한다.

$$y = 895.86x^5 - 503.77x^4 - 588.08x^3 + 126.71x^2 + 462.33x \quad (3)$$

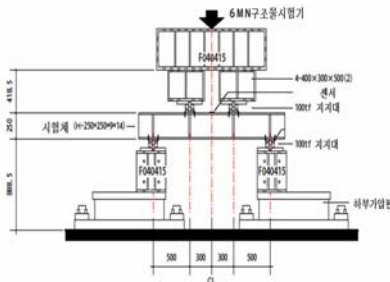


그림 3. 재하시험 모식도

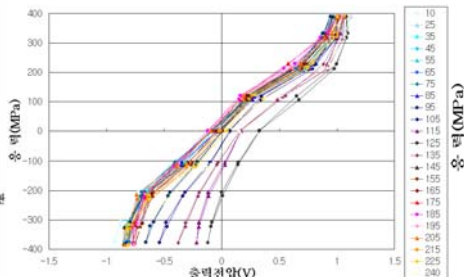


그림 4. 응력과 출력전압의 관계

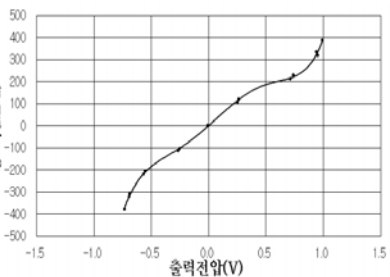


그림 5. 응력감도 곡선

4. 현장개요

계측을 실시한 대단면 00터널은 간격이 55m인 상행선과 하행선으로 구성되어 있다. 대표적인 터널 단면도는 그림 6과 같다. 계측을 실시한 대단면 터널의 굴착공법으로 TBM공법, 상반선행굴착공법을 이용하였다. 적용된 공법은 직경 5m의 TBM을 사용하여 터널본체보다 조금 작은 터널(선진갱)을 먼저 개통한 다음 선진갱을 터널의 상부에서 굴착 확장을 수행하여 최종적으로 폭 19m, 굴착단면적 200m²의 정규 터널 규격으로 시공하였다. 시공순서로 TBM 도갱 굴착, 상반 굴착, 하반 굴착, 인버트 굴착, 복공 방수공, 복공 콘크리트 순으로 하였다. 터널 주변의 지질은 중앙에 활단층을 포함한 대규모의 단층파쇄대가 분포하고 있고, 그 서쪽에는 제3기 선신세의 퇴적암, 동쪽에 제4기 갱신신세의 화산암이 분포하고 있다. 응력측정이 실시된 계측 단면은 상행선과 하행선 모두 활단층 파쇄대에 위치한다. 터널 주변 지질도는 그림 7과 같으며, 단층 부근의 지반 강도비는 0.3에서 0.7정도로 나타났다.

계측을 실시한 단층부근에서 슛크리트 축 방향 응력의 경시변화는 그림 8, H-beam(강아치) 지보공 축 방향 응력의 경시변화는 그림 9에 나타내었다. 그림 8과 9에서 슛크리트 축 방향 응력은 수렴하고 있으며, H-beam(강아치) 지보공의 응력은 계속 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

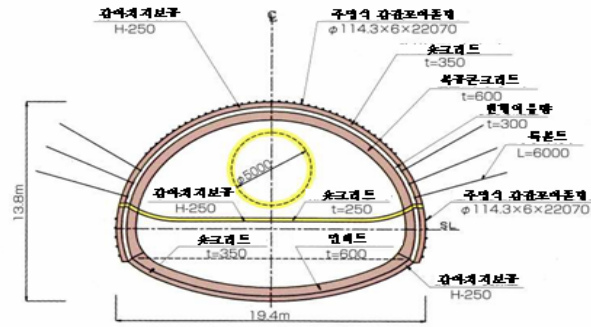


그림 6. 터널단면도

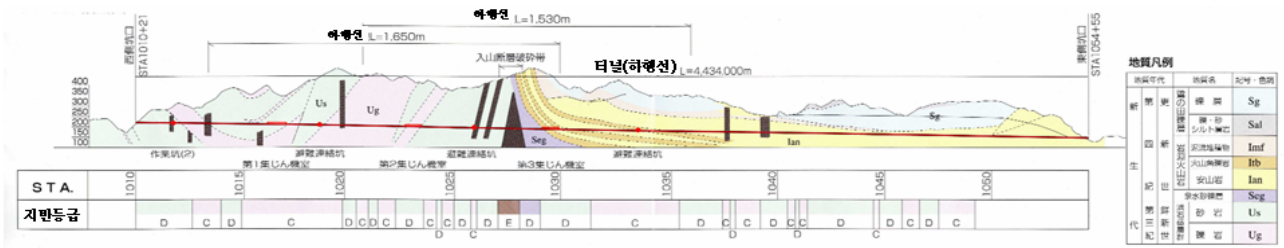


그림 7. 터널주변 지질도

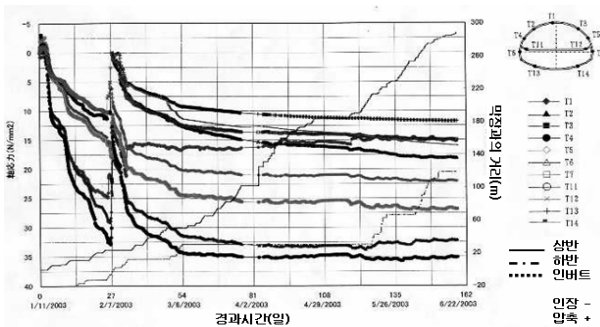


그림 8. 숏크리트의 축 방향 응력 경시변화

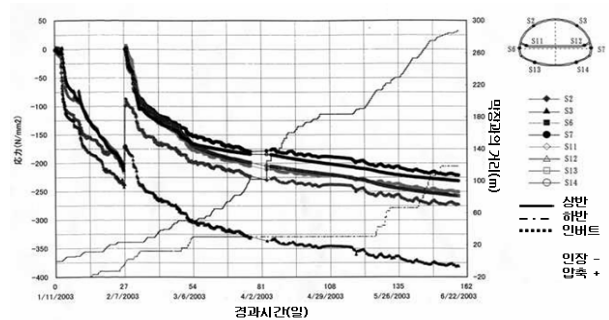


그림 9. 강아치 지보공의 축 방향 응력 경시변화

5. 응력계측

대단면 터널에서의 계측은 2003년 10월4일, 2003년 12월13일, 2004년 3월27일 총 3회 실시하였다. 계측 일정을 표 1, 계측일시와 막장위치와의 관계는 그림 10에 나타내었다. 자기이방성 응력측정법에서는 현 상태에서의 응력이 측정되므로 변형률 게이지와의 직접적인 비교를 할 때에 주의가 필요하다. 즉, 변형률 게이지에서 얻어지는 응력과 비교를 실시하기 위해서는 자기이방성 응력측정법으로 시공 직전의 강재 응력과 시공 후 응력을 계측하여 그 차이를 구할 필요성이 있다. 자기이방성 응력측정법에서 계측된 응력 변화와 변형률 게이지에서 구한 응력의 비교를 표 2에 나타내었다. 응력 계측의 위치는 그림 11과 같다. 표 2에서 알 수 있듯이 초기 잔류응력은 약 400MPa 정도의 인장응력으로 되어 있다. 이것은 하행선에서 이용되는 지보공 부재의 계측치를 나타낸 것이다. 상행선의 계측 대상 지보공에서는 초기치를 구하는 것은 현장 여건상 곤란하므로 이 값을 초기 값으로 가정하고 응력 증분에 대하여 고찰하는 것으로 하였다.

표 1. 계측 일정

항목	단면번호	10월 4일	12월 13일		3월 27일
하행선	STA1027+25	상반 2개소	하반2개소	2개소 상반수렴	4개소 하반수렴
하행선	STA1027+75	상반 2개소	하반2개소	-	4개소 하반수렴
상행선	STA1028+01	3개소 상반수렴	-	4개소 하반수렴	-
상행선	STA1028+12	3개소 상반수렴	-	4개소 하반수렴	-
비 고		현장계측1	현장계측2		현장계측3

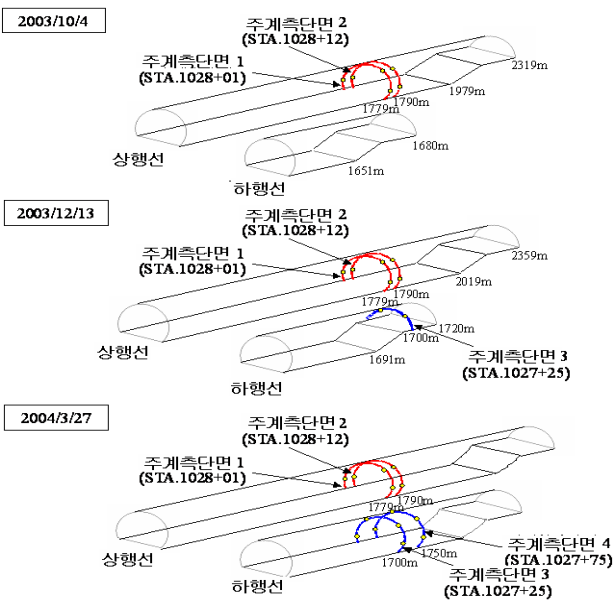


그림 10. 계측일시와 막장위치의 관계

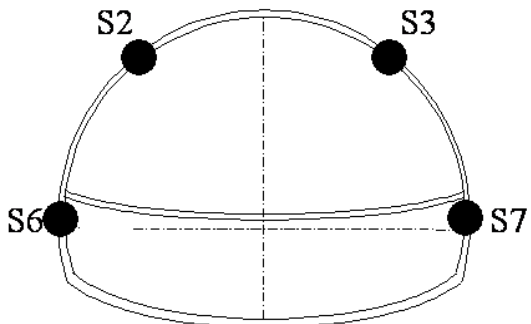


그림 11. 응력계측의 위치

표 2. 자왜법과 변형률게이지에 의한 응력계측치의 추정치의 비교

구 분	초기 잔류응력	1회계측	2회계측	3회계측	응력변화	응력변화	응력변화	응력변화	응력변화	
		03/10/4	03/12/13	04/3/27	03/10/4	03/10/4	03/12/13	03/12/13	04/3/27	
계측단면	계측위치	자왜법	자왜법	자왜법	자왜법	변형률게이지	변형률게이지	변형률게이지	변형률게이지	
		R	M1	M2	M3	M1-R	S1	M2-R	S2	M3-R
		응력(MPa)	응력(MPa)	응력(MPa)	응력(MPa)	응력(MPa)	응력(MPa)	응력(MPa)	응력(MPa)	
1028+01	우상S3	287.00	-100.09	-105.84		-387.09	-398.75	-392.84	-410.90	
	좌하S6	401.43	253.15	262.69		-148.29	-307.11	-138.74	-313.44	
	우하S7	401.43	95.77	83.46		-305.67	-306.23	-317.98	-316.68	
1028+12	우상S3	287.00	-103.51	-105.14		-390.51	-522.78	-392.14	-537.35	
	좌하S6	401.43	39.57	45.00		-361.87	-265.82	-356.43	-277.71	
	우하S7	401.43	49.13	33.61		-352.31	-355.40	-367.82	-370.43	
1027+25	좌상S2	318.54		67.69	32.70			-250.84	-211.40	-285.80
	우상S3	315.33		107.71	101.70			-207.61	-146.37	-213.60
	좌하S6	411.60			246.50					-165.00
	우하S7	440.80			215.10					-225.70
1027+75	좌상S2	253.70			10.00					-243.60
	우상S3	273.30			85.30					-188.00
	좌하S6	382.90			273.30					-109.60
	우하S7	421.70			278.00					-143.70

6. 결론

1회 계측 시에는 상행선에서 시공이 상당히 진행되어 있으므로 초기치보다 최대 약 390MPa 정도의 압축 응력이 증가하는 것을 나타내었다. 이때 측정된 변형률 게이지 값으로 환산한 응력과 비교해보면 자기이방성 응력측정법에 의한 계측결과는 타당하다는 것을 알 수 있다. 계측단면 1028+12에서는 변형률 게이지의 응력이 500MPa를 넘는 값으로 나타나 자기이방성 응력측정법과의 차이가 크다. 강재의 항복 응력이 440MPa 정도라고 고려하면 항복한 뒤에도 계속 증가한 변형률에 단순히 탄성계수를 곱하여 응력을 산정하고 있으므로 이는 실제로 존재할 수 없는 응력이 계산되었다고 판단된다.

2회 계측에서 상행선은 막장의 위치가 더욱 앞으로 위치하고 있으므로 응력의 변화는 적게 일어났다. 자기이방성 응력측정법과 변형률 게이지 두 가지 방법 모두 이와 같은 현상을 나타내고 있다. 하행선 터널에 대해서는 상반막장이 아직 멀리 나아가지 않으므로 지보공에는 200에서 250MPa 정도의 압축응력이 작용하고 있는 단계라는 것을 알 수 있었다.

3회 계측에서는 상행선에 대해서는 막장의 위치가 더 멀리 나아가 계측위치에서 충분히 멀리 떨어져 있으므로 그 영향은 거의 없을 것으로 판단되어 계측을 실시하지 않았다. 하행선 터널에 대해서는 막장의 진행에 따라 H-beam 지보공에는 100에서 250MPa 정도의 압축응력이 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 단층 부근의 H-beam 지보공에 작용하고 있는 하중에 대하여 자기이방성 응력측정법과 변형률 게이지로부터 구한 응력을 고찰하면 일부의 강재에서는 항복 현상이 일어나고 있는 것으로 추정된다. 이것은 변형률 게이지로부터 구한 응력은 변형률 게이지의 변형률 출력치에 단순히 탄성계수를 곱한 것으로 항복응력을 초과한 응력(500MPa 이상)이 산출되고 있는 것으로부터 추측할 수 있다. 이러한 현상으로부터 자기이방성 응력측정법으로 계측결과가 변형률 게이지에 비해 타당한 것으로 판단된다. 자기이방성 응력 계측에서 터널 내공 측의 초기잔류 응력 300에서 400MPa의 인장응력이 존재하는 것이 확인되었다. 이것은 지반 측의 플랜지凸면에 같은 정도의 압축잔류응력이 작용하고 있는 것을 암시하는 것이다. 지보공 시공 후 압축력이 증대하는 과정에서 내공 측에서는 인장응력이 점점 0에 가까워지고 하중이 증가하는 압축응력상태에 들어간다. 이것은 강재의 내력에 여유를 가지게 해주는 것이다. 반대로 지반 측에 대해서는 처음부터 압축응력상태에 있기 때문에 건설 후 압축응력이 증대하면 예상보다 빠른 단계에서 국부적으로 항복 현상이 발생하는 것이라고 판단된다. 이와 같은 국부적인 소성화가 단층에서 확인된 특이한 터널 거동현상과 연관성이 있을 가능성도 있으므로 차후 자세한 검토를 할 필요가 있다.

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. Sakurai, S. and Takeuchi, K., (1983), "Back analysis of measured displacements of tunnels" *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. 16, pp.173-180.
3. JSCE 1987. *Guideline for buckling design*. Steel structure series 2.
4. Sakai, Y. and Tamura, N. (2000), "Experimental research for estimating erection stress of steel bridge using magnetic anisotropy sensor", *Proceeding of the SEIKEN SYMPOSIUM*, No.26, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 61-70.
5. 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.