

제천시역 석회암 암반의 변형계수

Deformation Modulus of Limestones Distributed in Je-chon

임수빈¹⁾, Soo-Been Im, 이선재²⁾, Sun-Jae Lee, 윤지선³⁾, Ji-Son Yoon, 김성환⁴⁾, Sung-Hwan Kim, 박영호⁵⁾, Young-Ho, Park

- 1) 동부엔지니어링 (주) 상무이사, Managing Director, Geotech. Division, Dongbu Eng'g Co., Ltd.
- 2) 동부엔지니어링 (주) 지반공학부 과장, Senior Eng'r, Geotech. Division, Dongbu Eng'g Co. Ltd.
- 3) 인하대학교 공과대학 자원공학과 교수, Professor, Dept. of Resource Engineering, Inha Univ.
- 4) 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 수석연구원, Research Director, Highway Research Center, Geotech. Research Division, Korea Highway Corporation
- 5) 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 책임연구원, Chief Researcher, Highway Research Center, Geotech. Research Division, Korea Highway Corporation

SYNOIPSIS : In Je-chon, bed rocks are primarily composed of limestones. This paper gives the basis of foundation or tunnel design on deformation modulus of limestones in this province, which is estimated from insitu seismic tomography, insitu crosshole seismic tests, and laboratory rock tests.

keyword : limestone, deformation modulus, seismic tomography, crosshole seismic test, laboratory rock test

1. 서론

암반은 무결암과 불연속면으로 구성되어 있는 불연속체로서, 이러한 불연속면 존재로 인하여 암반의 역학적 특성을 규명하는 것은 매우 어려운 작업이라고 할 수 있다. 특히, 암반의 변형계수는 암반 근입 기초설계, 터널 설계, 그리고 지하 공동 굴착 설계에 있어서 매우 중요한 변수인데 반해 그 값을 결정하는 것이 매우 어렵고, 암석시편을 이용한 실내시험을 통하여 탄성계수를 산정하는 것은 전체 암반에 대한 탄성계수와 상당한 차이가 있어 암반의 탄성계수를 산정하는데는 많은 어려움이 따르게 된다.

설계시에 실내시험을 통한 암석의 탄성계수 산정 방법에는 일축압축시험을 통하여 정탄성계수를 산정하는 방법과 실내 탄성과 속도시험으로부터 동탄성계수를 산정하는 방법이 있다. 한편, 현장시험을 통한 암반의 탄성계수 산정은 현장 시추공에서의 공내재하시험을 통한 정탄성계수 산정방법과 크로스홀 탄성과 탐사, 탄성과 토모그래피 탐사 등의 물리탐사로부터 측정된 탄성과 속도를 이용하여 동탄성계수를 산정하는 방법이 있다. 이 연구에서는 이와같은 실내 암석시험 및 현장 물리탐사를 통한 탄성계수 산정으로부터 충청북도 제천시역에 분포하는 공동 및 점토 협재층이 포함된 석회암 암반의 변형특성에 대하여 고찰함으로써 이 지역에서 건설되는 교량기초 및 터널에 대한 기초 설계자료를 제공하고자 한다.

2. 연구대상지반

이 연구의 대상지역은 충청북도 제천시 금성면 일대로서, 하부로부터 백색 또는 담회색의 규암층이 분포해 있고 그 위에 녹회색의 세립 사암층이 분포해 있으나 전반적으로는 암회색의 판상 석회암층과 담회색 또는 백색의 결정질 괴상 석회암층이 분포해 있다. 이 연구에서는 제천시역 및 단양지역에 건

설예정인 P교(site 1)와 K교(site 2)의 석회암 기초암반에 대한 실내 암석시험 및 현장 물리탐사결과를 토대로 하여 이 지역 석회암에 대한 변형특성을 파악하고자 한다.

3. 변형계수 산정

3.1 암반의 변형계수 산정법

암반의 변형계수는 절리, 편리, 그리고 엽리등 불연속면의 존재로 인하여 시추시 채취된 코아암석의 변형계수와 다른 값을 가진다. Bieniawski(1978)와 Serafim and Pereira(1983)는 암반의 RMR값을 이용하여 암반의 탄성계수를 산정하는 방법을 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$E_f = 2RMR - 100 \quad ; \quad RMR < 50 \quad (\text{in GPa}) \quad (1)$$

$$E_f = 10^{(RMR-10)/40} \quad ; \quad RMR > 50 \quad (\text{in GPa}) \quad (2)$$

여기서, E_f 는 암반의 탄성계수이다.

Ramamurthy(1993)는 실내 일축압축시험을 통한 탄성계수에 절리상태계수(joint factor)를 도입하여 절리가 있는 암석시편의 탄성계수를 산정하는 방법을 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$E_j = E_{50} \exp(-1.15 \times 10^{-2} J_f) \quad (3)$$

여기서, E_j 는 절리가 있는 암석시편의 탄성계수, E_{50} 은 무결암석시편의 일축압축시험에 있어서 파괴응력의 50%에 대한 접선탄성계수이며, J_f 는 절리계수로서 다음의 식 (4)와 같이 정의된다.

$$J_f = \frac{J_n}{n r} \quad (4)$$

여기서, J_n 는 단위길이당 절리 개수인 절리빈도, n 은 절리경사 계수, 그리고 r 은 무결암 일축압축강도나 절리충진물 마찰각에 따른 보정계수로서 실내암석시험으로부터 결정되거나 기존에 제안된 값들로부터 결정되는 값들로서, n 과 r 은 각각 다음의 표 1 및 표 2, 표 3과 같다.

한편, 탄성과 토모그래피나 크로스홀 탄성과 탐사등의 현장 탄성과 탐사로부터 측정된 탄성과 속도 $V_{p,field}$ 는 암반내에 존재하는 절리, 단층, 그리고 공동등 불연속면의 영향으로 인하여 암석코아에 대하여 실시하는 실내 탄성과 속도 $V_{p,lab}$ 에 비해 일반적으로 그 크기가 작게 나타난다. Onodera (1963)는 현장 탄성과 속도와 실내 탄성과속도의 비인 $(V_{p,field}/V_{p,lab})^2$ 를 균열계수로서 정의하여 암반 탄성계수를 산정하는 방법을 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$E_f = E_{50} \left(\frac{V_{p,field}}{V_{p,lab}} \right)^2 \quad (5)$$

여기서, E_f 는 균열계수를 이용한 암반 정탄성계수, E_{50} 은 일축압축시험시 산출한 암석 정탄성계수, $V_{p,field}$ 는 현장 탄성과 탐사로부터 측정된 탄성과 속도, 그리고 $V_{p,lab}$ 은 실내 탄성과시험으로부터 측정된 탄성과 속도이다.

표 1. 절리경사계수
n값(Arora, 1987)

수직방향에 대한 절리 경사각 β (degree)	절리경사 계수 n
0°	0.82
10°	0.46
20°	0.11
30°	0.05
40°	0.09
50°	0.30
60°	0.46
70°	0.64
80°	0.82
90°	0.95

표 2. 무결암 일축강도에 따른
r값의 변화

무결암의 일축압축강도 σ_c (MPa)	보정계수 r	비고
2.5	0.30	세립 결정
5.0	0.45	
15.0	0.60	↓
25.0	0.70	
45.0	0.80	조립 결정
65.0	0.90	
100.0	1.00	

표 3. 절리충진물 마찰각에 따른
r값의 변화

충진물 종류	충진물 마찰각 ϕ	보정계수 r
자갈질 모래	45°	1.00
조립질 모래	40°	0.84
세립질 모래	35°	0.70
실트질 모래	32°	0.62
점토질 모래	30°	0.58
점토질 실트		
점토 - 25%	25°	0.47
점토 - 50%	15°	0.27
점토 - 75%	10°	0.18

실내 탄성파시험, 탄성파 토모그래피 및 크로스홀 탄성파 탐사로부터 측정된 지반의 탄성파 속도로 부터 다음의 식 (6)을 이용하여 지반의 구속탄성계수 및 전단탄성계수를 도출할 수 있다.

$$M_d = \rho V_p^2, \quad G_d = \rho V_s^2 \quad (6)$$

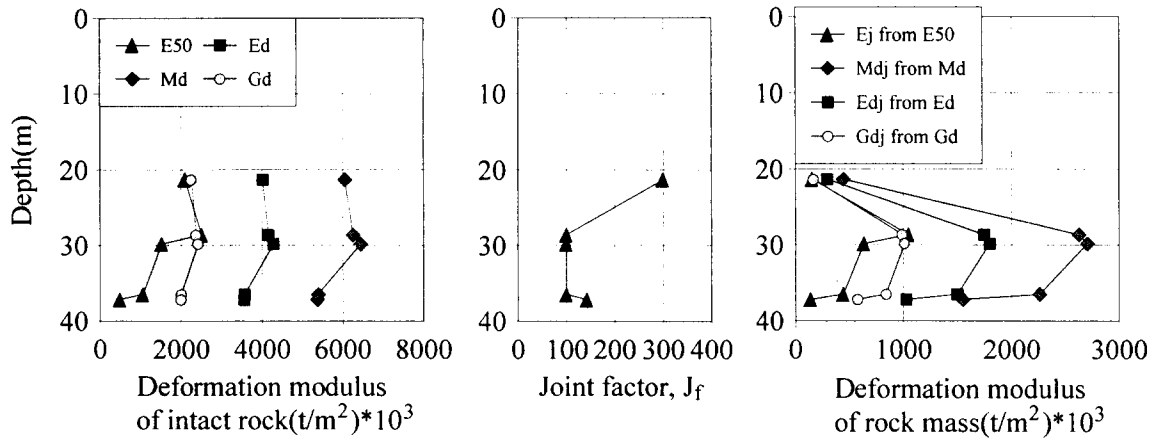
여기서, M_d 는 암반의 구속탄성계수, G_d 는 암반의 전단탄성계수, ρ 는 지반의 밀도, V_p 는 지반의 압축탄성파(P파)속도, 그리고 V_s 는 지반의 전단탄성파(S파)속도이다. 식 (6)의 구속탄성계수로부터 다음의 식 (7)을 이용하면 동탄성계수를 도출할 수 있다.

$$E_d = \frac{M_d(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (7)$$

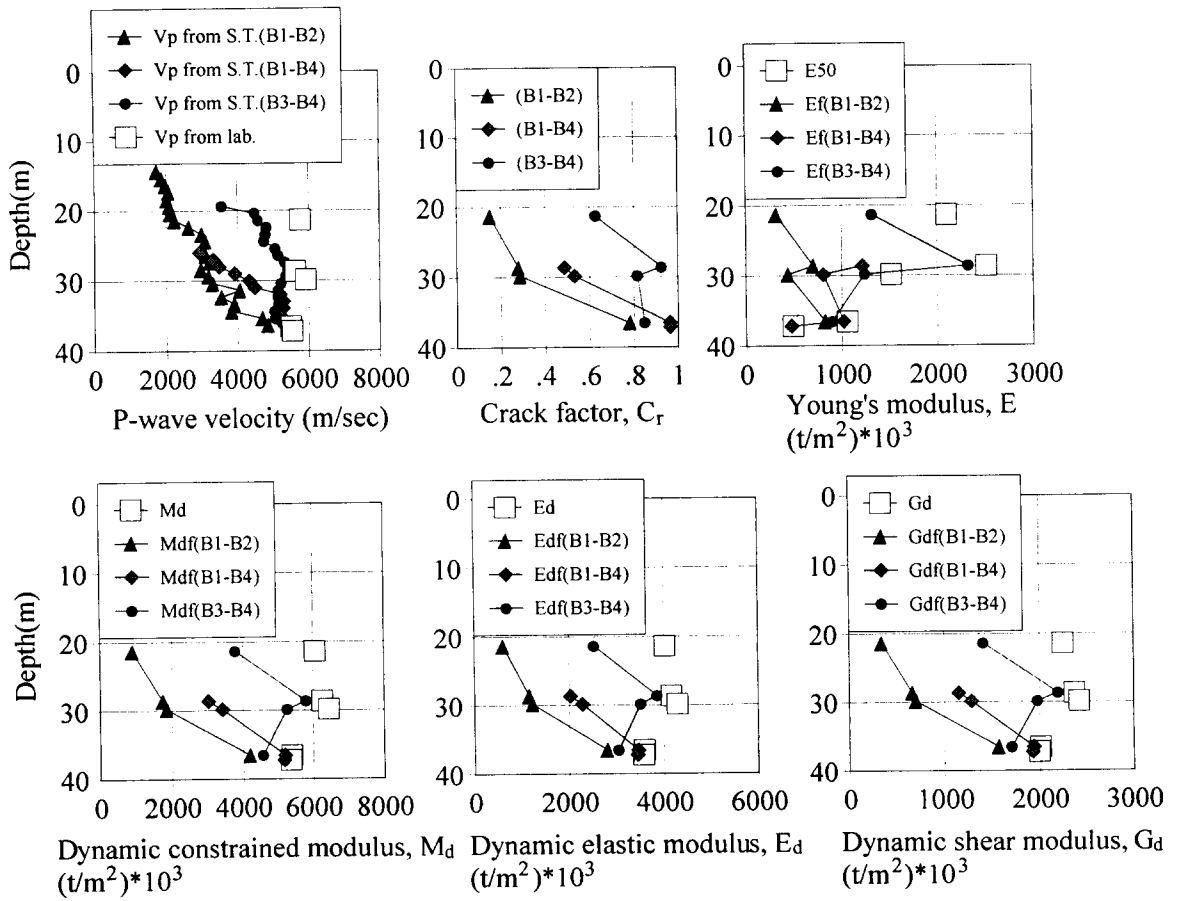
여기서, E_d 는 암반의 동탄성계수이고 ν 는 포아송비이다.

3.2 변형계수 산정 결과

2.1절에 제시한 Rammamurthy(1993)의 절리상태계수와 Onodera(1963)의 균열계수를 이용하여 제천 및 단양지역에 분포하는 석회암 암반에 대한 탄성계수를 산정하였다. 그림 1(a)와 그림 2(a)는 실내암석시험으로부터 측정된 암석 변형계수 E_{50} , M_d , E_d , G_d , 절리상태계수 J_f , 그리고 절리상태계수를 이용하여 산정한 암반 변형계수 E_j , M_{dj} , E_{dj} , G_{dj} 를 나타내고 있다. 또한, 그림 1(b)와 그림 2(b)는 실내 탄성파 속도 및 현장 탄성파 속도 V_p , 균열계수 C_r , 균열계수를 적용하여 산정한 암반 탄성계수를 나타내고 있다. 단, $RMR < 30$ 인 기초암반과 $RMR > 50$ 인 기초암반에 대한 결과가 대표적으로 하나만 나와 있다.

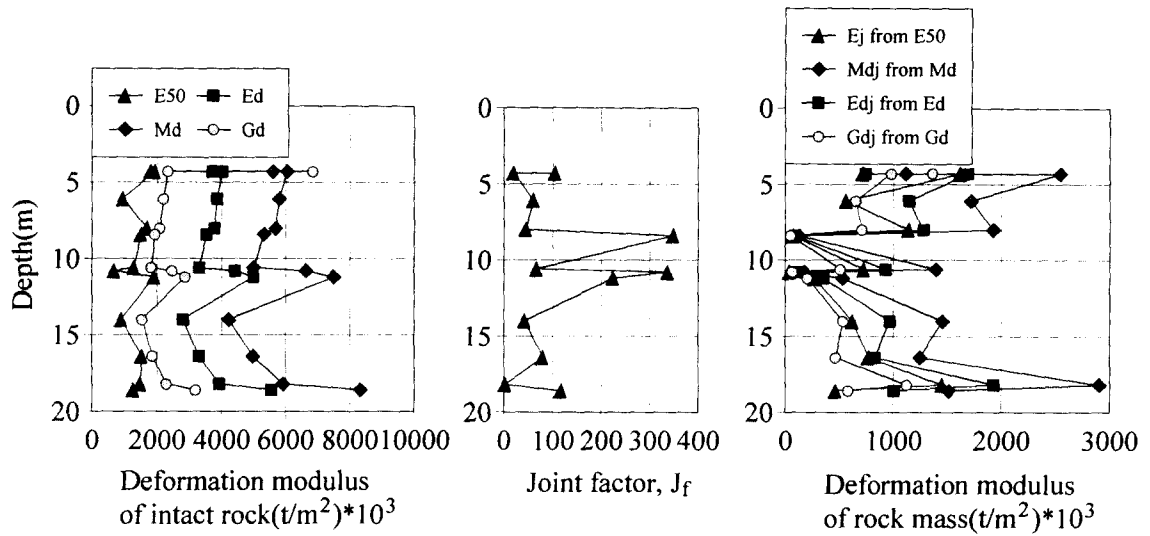


(a) 절리상태계수를 이용한 암반 변형계수

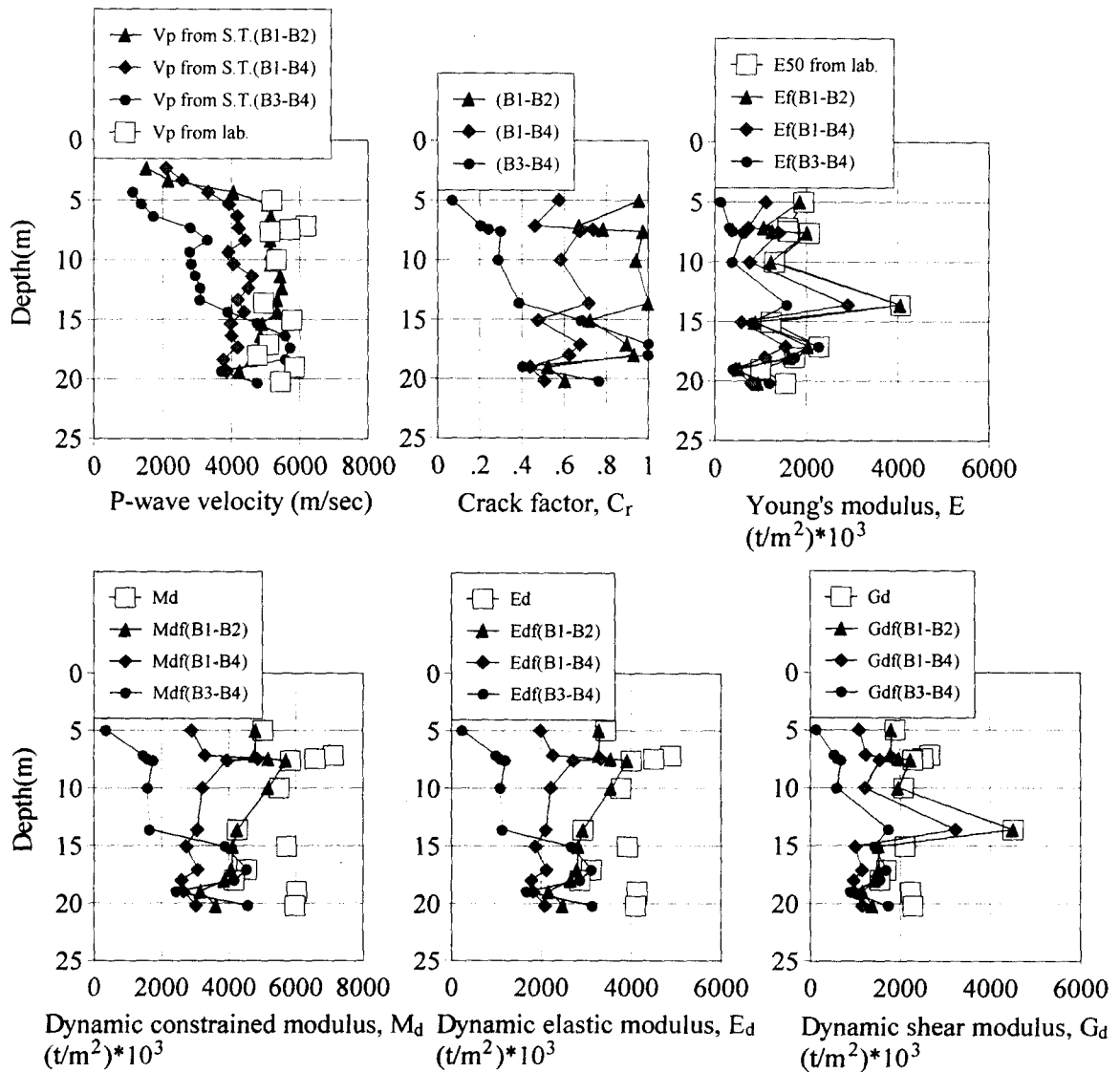


(b) 균열계수를 이용한 암반 변형계수

그림 1. site 1-1 암반 변형계수 산정 결과



(a) 절리상태계수를 이용한 암반 변형계수



(b) 균열계수를 이용한 암반 변형계수

그림 2. site 2-3 암반 변형계수 산정 결과

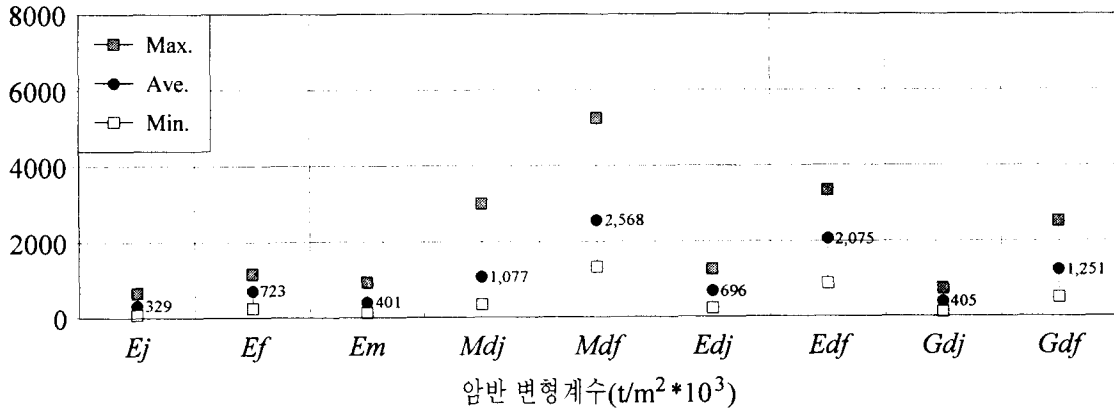
그림 1과 그림 2에 예시한 방법을 통하여 전 교각 기초에 대하여 산정한 변형계수를 정리하면 표 4와 같다. 또한, 표 4에는 암반의 탄성계수 산정에 있어서 가장 일반적으로 사용되는 방법인 *RMR*을 이용하여 산정한 암반 탄성계수(Bieniawski(1978), Serafim and Pereira(1983))가 함께 비교되어 있다.

표 4. 암반 변형계수 산정 결과

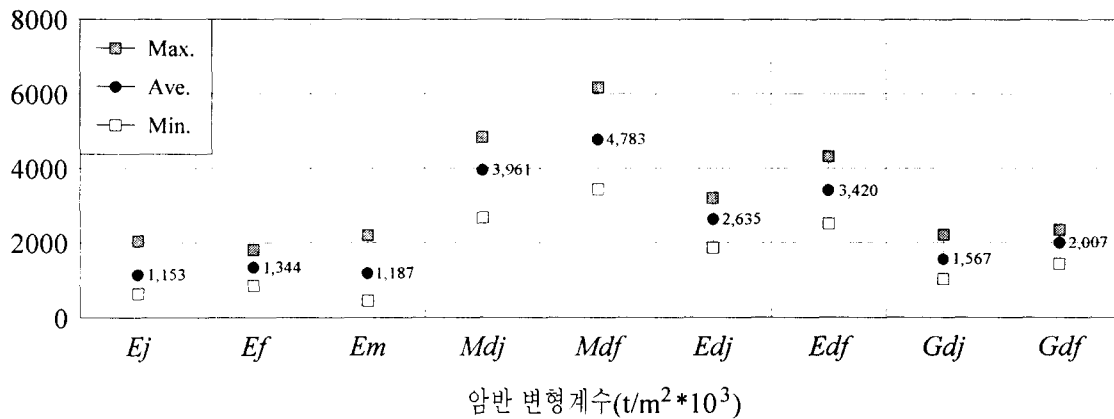
교각기초	암반 종류	절리상태계수(J_f)를 이용한 경우 ($\times 10^3 \text{ t/m}^2$)				균열계수(C_r)를 이용한 경우 ($\times 10^3 \text{ t/m}^2$)				<i>RMR</i> 을 이용한 경우 ($\times 10^3 \text{ t/m}^2$)	
		E_j	M_{dj}	E_{dj}	G_{dj}	$E_{f,50}$	M_{df}	E_{df}	G_{df}	<i>RMR</i>	E_m
site 1-1	연암*	155	445	296	166	818	2,355	1,567	876	37	473
	경암*	569	2,284	1,519	857	996	4,031	2,681	1,511	47	841
site 1-2	연암	357	1,178	784	441	421	2,853	1,897	1,064	29	299
site 1-4	연암	81	347	230	131	256	1,334	884	507	25	237
	경암	1,495	4,840	3,206	1,775	1,372	3,432	2,943	1,629	43	668
site 1-6	연암	606	1,643	1,055	615	579	2,121	1,361	797	28	281
	경암	1,948	3,849	2,471	1,400	-	-	-	-	36	447
site 1-7	연암	663	2,013	1,282	749	910	2,624	1,670	969	28	282
site 1-8	연암	561	1,469	899	548	837	3,245	3,280	1,954	14	126
	경암	2,051	4,664	2,855	1,706	1,625	3,696	3,397	2,262	40	562
site 1-9	경암	1,108	3,963	2,685	1,492	1,811	5,887	3,988	2,215	58	1,600
site 1-10	경암	1,290	4,147	2,819	1,562	1,744	5,406	3,675	2,036	61	2,200
site 1-11	경암	1,127	4,751	3,086	2,223	1,322	5,478	3,559	2,050	59	1,800
site 1-12	경암	787	4,440	3,092	1,679	1,044	5,514	3,841	2,090	58	1,600
site 1-13	경암	1,034	4,120	2,881	1,563	1,665	6,186	4,323	2,348	53	1,000
site 1-14	경암	930	3,907	2,637	1,884	849	3,722	2,512	1,985	49	944
site 2-3	경암	835	3,272	2,176	1,426	1,246	5,204	3,461	2,150	54	1,000
site 2-4	경암	673	2,674	1,863	1,029	1,288	4,809	3,349	1,854	44	708
site 2-8	연암	182	1,232	784	479	1,160	5,262	3,350	2,523	49	944
site 2-9	연암	271	889	611	335	873	2,927	2,011	1,101	40	562
	경암	1,071	3,231	2,220	1,360	1,282	3,499	2,404	1,548	43	668
site 2-10	연암	87	473	324	178	657	3,880	2,652	1,470	-	-
	경암	1,163	4,465	3,051	1,689	1,307	5,576	3,811	2,108	53	1,000
site 2-11	경암	636	3,124	2,254	1,188	918	3,774	2,723	1,439	47	841

* 연암 및 경암의 분류는 일본도로공단 기준, 한국도로공사 도로설계요령, 서울시 지반조사편람 참조

표 4에 나타난 결과로부터 각 교각기초별 변형계수 산정방법에 따른 암반 변형계수를 비교하면 그림 3과 같고, 이로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.



(a) 연암 암반의 변형계수



(b) 경암 암반의 변형계수

그림 3. 암반 변형계수 비교

- 1) 정탄성계수 E 의 평균값은 연암 $300,000 \sim 700,000 \text{ t/m}^2$, 경암 $1,100,000 \sim 1,300,000 \text{ t/m}^2$ 의 값을 가진다.
- 2) 구속 동탄성계수 M_d 의 평균값은 연암 $1,000,000 \sim 2,500,000 \text{ t/m}^2$, 경암 $4,000,000 \sim 4,800,000 \text{ t/m}^2$ 의 값을 가진다.
- 3) 동탄성계수 E_d 의 평균값은 연암 $700,000 \sim 2,000,000 \text{ t/m}^2$, 경암 $2,600,000 \sim 3,400,000 \text{ t/m}^2$ 의 값을 가진다.
- 4) 전단탄성계수 G_d 의 평균값은 연암 $400,000 \sim 1,300,000 \text{ t/m}^2$, 경암 $1,600,000 \sim 2,000,000 \text{ t/m}^2$ 의 값을 가진다.
- 5) 각 방법간의 결과를 비교하면, 암반상태(연암 및 경암)에 따라 다소 차이는 있지만 균열계수를 이용한 평균 암반 변형계수($E_f, M_{df}, E_{df}, G_{df}$)가 가장 큰 값으로 나타났으며, 정탄성계수 E 값의 경우에 절리상태계수를 이용한 결과와 RMR 을 이용한 결과는 거의 같은 것으로 나타났다.
- 6) 연암의 경우에 경암에 비해 변형계수 평균값이 각 방법간에 더 큰 편차를 보이며, 대체로 각 변형계수별로도 최대값과 최소값사이의 차이가 경암보다 크게 나타났다. 이는 연암일수록 암반내에 불연속면이나 파쇄대의 분포가 매우 심하고, 파악되지 않은 불연속면의 존재가능성이 크기 때문에 절리상태계수와 균열계수 및 RMR 값에 있어서 오차가 큰 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

제천지역에 분포하는 석회암에 대한 일축압축시험과 실내 탄성과 속도시험 결과를 이용하여 암석의 변형계수를 산출하였고, 이 결과에 현장 탄성과 토모그래피와 탄성과 크로스홀 탐사결과 및 시추결과를 통하여 추정된 절리상태계수, 균열계수, 그리고 *RMR*값을 적용하여 이 지역 석회암 암반에 대한 변형계수(정탄성계수, 구속 동탄성계수, 동탄성계수, 전단탄성계수)를 산정하였다. 이 결과들은 이 지역에 대한 기초설계 및 터널설계 등 암반설계에 있어서 좋은 참고자료가 될 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. Bieniawski, Z. T.(1978), "Determining Rock Mass Deformability - experience from case histories", *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics*, Abstract, 15, pp.237-247.
2. Onodera, T. F.(1963), "Dynamic Investigation of Foundation Rocks in-situ", *Proceedings of 5th Symposium on Rock Mechanics*, pp.517-533.
3. Ramamurthy, T.(1993), "Strength and Modulus Responses of Anisotropic Rocks", *Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice & Projects.*, Pergamon Press, Vol. 1- I . pp.315-330.
4. Serafim, J. L. and Pereira, J. P.(1983), "Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski", *Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction*, Lisbon, Vol. 1(II), pp.33-44.