

SIG

The Characteristic of Strength for a Lime Stone in Donghae Area and Harden Cement Milk of Super Injection Grouting

¹⁾, Young-Ho Park, ²⁾, Nak-Young Kim, ³⁾, Sa-Myun Hong, ⁴⁾, Jeong-Hoon Yook, ⁵⁾, Ki-Seog Kim

¹⁾ , Director Researcher, Geotechnical Research Division, HTTI, KHC

²⁾ , Chief Researcher, Geotechnical Research Division, HTTI, KHC

³⁾ , Staff, Design Team, Daewon Soil Co., LTD

⁴⁾ , Researcher, Geotechnical Research Division, HTTI, KHC

⁴⁾ () , President, Heesong Geotek Co., LTD

SYNOPSIS : Limestone zone in Korea have been distributed to diagonal line so that it is wide from the Gangwondo to the Jeonnamdo. The limestone cavity and fractured zone were formed by chemical weathering. Limestone cavity and fractured zone was reinforced with cemented milk(w/c=60%) by high pressure jet grouting by tripple -pipe to establish bridge foundation on the ground condition like limestone cavity. To analyze property of limestone and solid of cement milk(w/c=65%), mixed solid of cement, core NX size in the limestone cavity and fractured zone and compressive strength. Seismic tomography exploration was performed to analyze deformation modulus of limestone. The analysis suggests that deformation modulus of limestone has effect on uniaxial compressive strength, seismic velocity, seismic elasticity modulus.

Average static elasticity modulus of limestone is $5.08 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$, cement and coal mixed solid is $0.25 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$, $0.095 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$. Average seismic velocity of limestone is 5.240m/sec, cement and coal mixed solid is 2,211.3m/sec, 1,447.5m/sec. Average uniaxial compressive strength of limestone was $1,221.3 \text{kgf/cm}^2$ and limestone specimen mixed with cement milk and solid of cement milk mixed with coal were 125.22kgf/cm^2 , 35kgf/cm^2 each other. Average friction angle of limestone was 49.14° and limestone specimen mixed with cement milk and solid of cement milk mixed with coal were 38.39° , 25.83° each other. Average cohesion of limestone was 137.7kgf/cm^2 and limestone specimen mixed with cement milk and solid of cement milk mixed with coal were 23.5kgf/cm^2 , 15.5kgf/cm^2 each other. Average deformation modulus of limestone was $2.84 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ and limestone specimen mixed with cement milk and solid of cement milk mixed with coal were $0.4 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$, $0.12 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ each other. It was analyzed that the elasticity and uniaxial compressive strength, seismic velocity of solid of cement milk mixed limestone pieces and coal had a highly interrelation regardless of existence of limestone pieces and coal but it had shown that limestones had a lower interrelation. In case of field seismic velocity and deformation of limestone, SIG solid of cement milk mixed with coal and limestone pieces had a highly interrelation.

Key words : limestone zone, super injection grouting, uniaxial compressive strength, seismic velocity, seismic elasticity modulus.

1. 서론

우리나라 석회암지대는 강원도부터 전라남도까지 대각선으로 넓게 분포하고 있다. 이 석회암은 화학적인 풍화작용에 의해 공동부와 파쇄대가 형성된다. 이러한 지반조건 위에 교량기초 구조물을 안치시키기 위해, 물-시멘트비(w/c)가 65%인 시멘트밀크를 삼중관식 초고압 분사공법(super injection grouting, SIG)으로 보강하였다. 그라우팅을 실시하여 재령 28일 경과후, 석회암 공동부와 파쇄대에 NX 크기로 시추하여 석회암, 순수 SIG 고결체, 그리고 암편 섞인 S.I.G. 고결체의 3가지 시료에 대해 일련의 실내외 시험을 실시하였다. 본 연구에서 실시한 실내시험의 종류는 일축압축강도(q_u), 탄성파속도($V_{p,l}$), 정탄성계수(E_{50})이고, 실외시험은 탄성과 토모그래피 탐사이다. 시험이 이루어진 대상지반은 동해 제 2공구 도직교 현장과 망상 I.C. 현장이다. 석회암과 SIG 시멘트 고결체의 실내외 탄성계수와 일축압축강도 그리고 실내외 탄성파속도와의 관계를 서로 비교하여 동해지역에 분포하는 석회암과 SIG 시멘트 고결체에 대한 상관관계를 나타내고자 한다.

2. 코아 시추 현장

석회암 공동부와 파쇄가 매우 심한 탄질 석회암층에 SIG 방법으로 그라우팅을 실시한 지역은 그림 1과 같이, 각각 동해고속도로 도직교와 망상 I.C. 제 1교이다.

도직교 P1~P2 사이의 기초지반은 토사층과 연암 그리고 경암으로 이루어져 있다. 토사층은 자갈 및 실트질 점토(0~1.5m), 모래 및 실트질 점토(1.5~7.5m), 암편 및 실트 섞인 모래(7.5~9m)로 구성되어 있으며 깊이 9~15m 사이의 연암층에 두께 0.1~1.0m의 석회암 공동이 산재해 있다. 도직교 A2의 기초지반은 토사층(0~6m), 연암층(6~14m), 경암층(14~30m)으로 구성되어 있으며 토사층 상부에 5m 정도 성토를 하였고, 지층 두께 0.1~3.0m 정도의 석회암 공동이 연암층과 경암층에 걸쳐 분포해 있다.

망상 I.C. 제 1교의 기초지반은 매립층(0~2.7m), 층적층(2.7~18m), 자갈층(18~21m), 풍화암층(21~35m)로 구성되어 있으며, 지하수위가 지표면에 위치하고 있다. 그리고 풍화암층은 탄층 또는 석회암의 차별풍화대로 구성되어 있다.

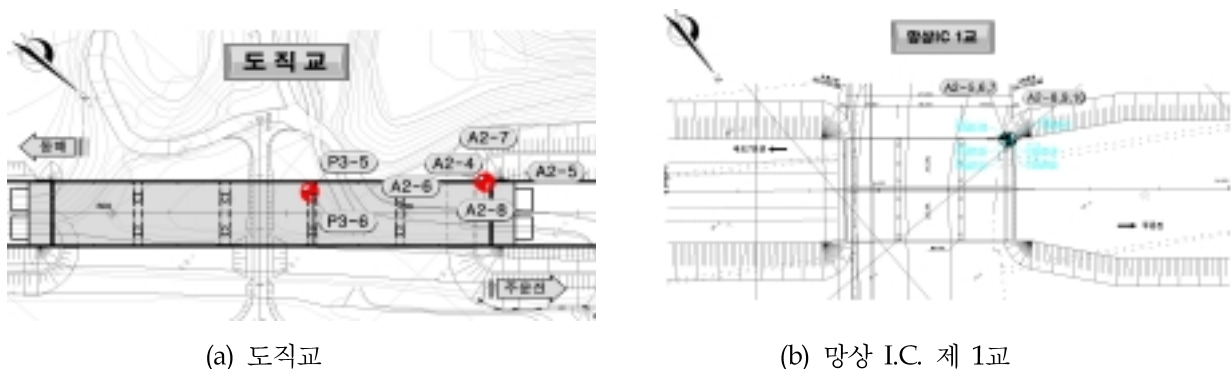


그림 1. 코아시료 시추 위치

3. 석회암과 SIG 고결체의 정탄성계수

3.1 탄성계수, 탄성파속도, 점착력, 내부마찰각

도직교와 망상 IC 교량의 기초지반이 상이하어 석회암, 암편 섞인 SIG 고결체, 탄질 섞인 SIG 고결체로 구분하여 표현한다. 이들 시편에 실내시험 항목은 정탄성계수, 탄성파속도, 일축압축강도, 내부마찰각, 점착력이며, 이들의 값은 표 1에 나타내었다.

암반의 시료코아의 탄성계수는 일축압축시험으로부터 응력-형방향 변형을 곡선을 구한후 ISRM 방법에 의거 강도의 50% 수준에서 접선의 기울기로서 구한다. 이를 접선탄성계수(tangential young's modulus) 또는 정탄성계수(E_{50})라고도 한다.

표 1. 도직교와 망상 IC 교의 석회암과 SIG 고결체의 물성치

	코아의 탄성계수 (10^5kgf/cm^2)	코아의 탄성파속도 (p파, m/sec)	일축압축강도 (kgf/cm^2)	내부마찰각 (degree)	점착력, (kgf/cm^2)
석회암 (도직교)	5.73	6,000	1,390	45.8	230
	4.42	5,690	1,160	51.4	51.4
	4.34	5,560	1,130	38.5	38.5
	5.94	6,130	1,210	51.7	51.7
	5.32	6,290	850	52.3	130
	4.73	6,100	1,100	49.8	170
	4.44	6,190	1,400	52.7	200
5.74	6,150	1,530	50.9	230	
평균	5.08	5,240	1,221.25	49.14	137.7
SIG 고결체 +암편 (도직교)	0.1	2,010	90	30.80	12
	0.11	1,880	60	41.62	21
	0.16	1,880	80	-	-
	0.05	1,710	30	-	-
	0.09	1,790	40	31.3	17
	0.15	1,830	70	-	-
	0.37	2,470	130	-	-
	0.38	2,460	170	-	-
	0.29	3,290	100	-	-
	0.35	2,460	170	43.62	28
	0.37	2,210	170	-	-
0.32	1,840	150	-	-	
0.11	1,880	50	-	-	
	0.22	2,131.54	100.77	36.84	19.5
SIG 고결체 +암편 (망상 IC)	0.35	2,520	190	-	-
	0.45	2,480	210	44.4	31.90
	0.25	2,020	160	-	-
	0.34	2,580	180	38.6	31.10
	0.28	2,660	160	-	-
	0.21	2,260	130	-	-
	0.13	1,900	50	-	-
	0.20	2,020	130	-	-
	0.35	2,530	170	-	-
0.25	2,180	190	-	-	
평균	0.28	2,315	157	41.5	31.5
도직교와 망상 IC의 평균	0.25	2,211.30	125.22	38.39	23.5
탄질 섞인 SIG 고결체 (망상 IC)	0.06	1,320	50	-	-
	0.11	1,450	70	23.6	15.6
	0.14	1,840	90	29.7	20.2
	0.07	1,180	50	24.2	10.7
평균	0.095	1,447.5	65	25.83	15.5

표 1에 나타난 도직교 석회암의 평균 정탄성계수, E_{50} 는 $5.08 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 이었고, 도직교와 망상 IC 교의 암편 섞인 SIG 고결체는 $0.25 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 이었고, 망상 IC 교의 탄질 섞인 SIG 고결체는 $0.095 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 이었다. 그리고 도직교 석회암의 평균 탄성파속도, V_{p1} 는 $5,240 \text{m/sec}$ 이었고, 도직교와 망상

IC교의 압편 쉼인 SIG 고결체는 2,211.3m/sec이었고, 망상 IC 교의 탄질 쉼인 SIG 고결체는 1,447.5m/sec이었다. 그리고 도직교 석회암의 평균 일축압축강도, q_u 는 1,221.3kgf/cm²이었고, 도직교와 망상 IC교의 압편 쉼인 SIG 고결체는 125.22kgf/cm²이었고, 망상 IC 교의 탄질 쉼인 SIG 고결체는 35kgf/cm²이었다. 또한 도직교 석회암의 평균 내부마찰각과 점착력은 각각 49.14도, 137.7kgf/cm²이었고, 도직교와 망상 IC교의 압편 쉼인 SIG 고결체는 각각 38.39도, 23.5kgf/cm²이었고, 망상 IC 교의 탄질 쉼인 SIG 고결체는 각각 25.83도, 15.5kgf/cm²이었다.

3.2 상관성

표 1로 부터 석회암, 압편 쉼인 SIG 고결체, 그리고 탄질 쉼인 SIG 고결체의 정탄성계수와 일축압축강도 그리고 정탄성계수와 실내 탄성파속도와의 상관관계를 그림 3~그림 5에 나타내었다.

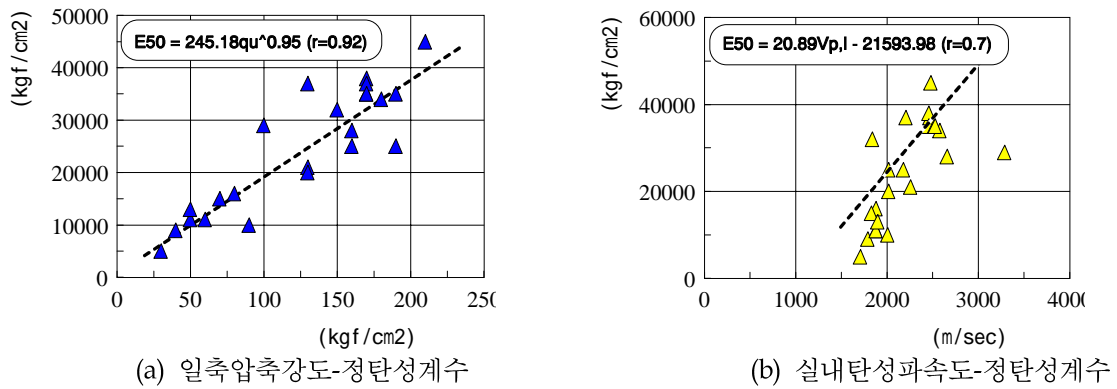


그림 3. 압편 쉼인 SIG 고결체

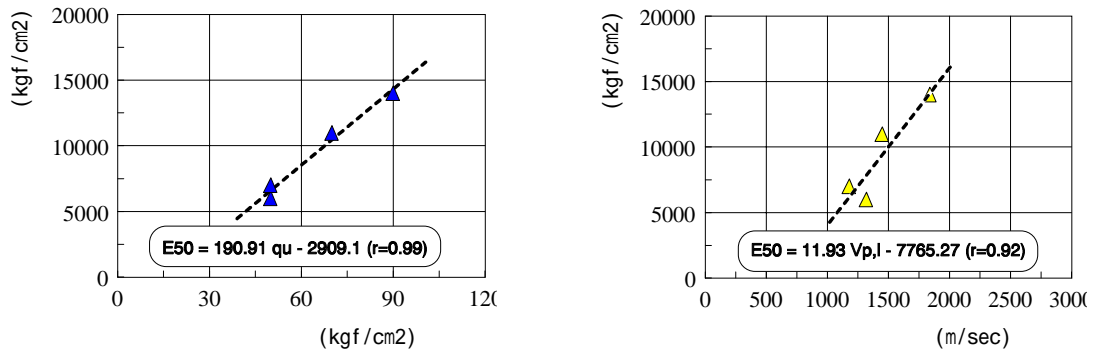


그림 4. 탄질 쉼인 SIG 고결체

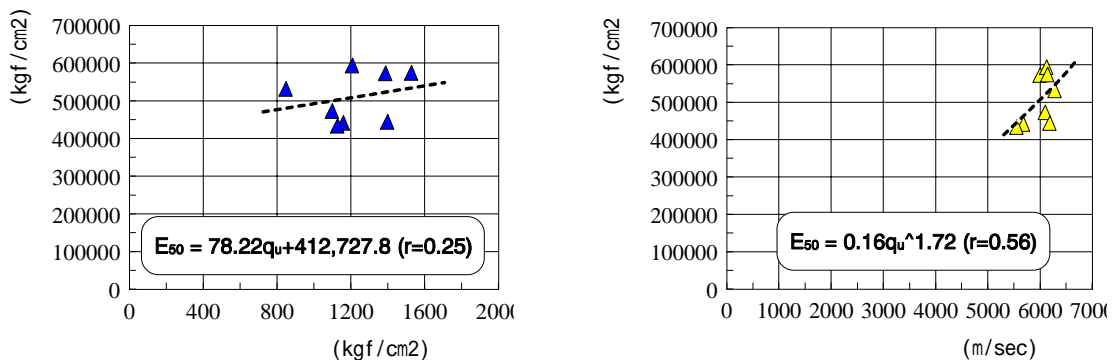


그림 5. 석회암

그림 3과 그림 4는 암편과 탄질 섞인 SIG 고결체에 대한 탄성계수와 일축압축강도와 실내 탄성파속도와의 상관관계를 나타내고 있다. 이들의 상관성은 고결체 속에 암편 또는 탄질의 유무에 상관없이 전반적으로 상관성이 높게 나타났다.

반면에 그림 5의 석회암은 그 상관성이 낮았다.

4. 암반의 변형계수

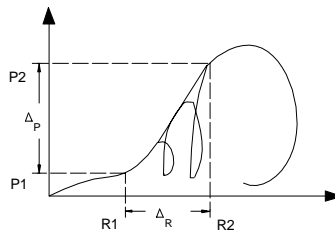
비선형성을 가지는 흙 또는 암석의 하중과 변형의 관계에서 선형구간에 착안한 탄성계수는 그 값이 상대적으로 크게 된다. 이에 어느 범위에 변형량에 착안하여, 그 범위에서의 하중과 변형량을 직선적인 비례관계에 있는 것으로 간주하게 되는데 이때 하중과 변형량에서의 기울기를 변형계수라 한다. 변형계수를 산정하는 대표적인 방법으로 재하시험에 의한 방법, RMR값을 적용하는 방법 그리고 탄성파속도를 적용하는 방법 등이 있다.

본 연구에서는 재하시험과 RMR값에 의한 방법은 개략적인 내용만 제시하였으며, 탄성파속도를 적용한 Onodera(1963)의 식을 적용하여 암반의 변형계수를 산정하여 일축압축강도와 관계를 분석하였다.

4.1 암반의 변형계수 산정법

4.1.1 재하시험에 의한 암반의 변형계수 산정법

일반적인 재하시험시 어느 하중-변형곡선에서나 반복 재하단계에서 잔류 변형량은 점차 축적되어 증가하지만 각 재하단계에서의 곡선의 기울기 변화는 적다. 현장 암반의 변형계수는 그림 6에서 보듯이 하중재하시 전체 압력-변형 곡선상에서 잔류변형량을 포함한 직선성을 보이는 구간의 기울기($\Delta P/\Delta R$)를 변형계수 또는 탄성계수라 한다(신중호, 1998).



여기서, P1, P2 = 재하압력, R1, R2 = 변형량

그림 6. 재하시험시 하중-변형곡선에서 암반 변형계수 산정

4.1.2 RMR값을 적용한 암반의 변형계수 산정법

암반의 변형계수는 절리, 편리 등의 불연속면으로 인하여 시추코아 암석의 변형계수와는 다른 값을 가진다. 이러한 암반의 요인들을 보완하기 위해 Bieniawski(1978)와 Serafim(1983)는 현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 RMR 값을 이용하여 변형계수를 산정하는 식을 제시하였다.

Bieniawski의 경우, $RMR > 50$ 그리고 Serafim의 경우, $RMR < 50$ 일 때 적용 가능하다.

$$E_m = 10 \frac{RMR-10}{40} \tag{1}$$

$$E_m = 2RMR - 100 \tag{2}$$

여기서, E_m : 암반의 변형계수(GPa)이다.

4.1.3 탄성파속도를 적용한 암반의 변형계수 산정법

Onodera(1963)는 현장 탄성과 탐사로부터 측정된 탄성파속도와 암석 코아로부터 측정된 실내 탄성파속도와의 관계를 이용하여 변형계수, $E_{f,50}$ 을 구하는 방법을 제시하였다.

$$E_{f,50} = E_{50} \left(\frac{V_{b,f}}{V_{b,l}} \right) \quad (3)$$

여기서, E_{50} : 암석 코아의 정탄성계수, $V_{b,f}$: 현장 탄성파속도 그리고 $V_{b,l}$: 암석 코아에 대한 실내 탄성파속도이다.

4.1.4 형태별 암반의 변형계수

본 연구에서 Onodera(1963)의 식을 적용하여 암반의 변형계수를 구하기 위해 필요한 일련의 실내 물성시험이 이루어졌다. 그리고 실외 탄성파속도는 탄성과 토모그래피 탐사 결과에서 얻은 값이다. 또한 석회암의 경우 물성의 경계가 뚜렷하지 않아서 연암과 경암으로 따로 분류하지 않았으며, 시험에 의한 결과 값들은 다음의 표 2에 나타내었다.

표 2. 실내시험 물성치와 산정된 암반의 변형계수

교량명 (암 종)	공번	심도(m)	실내 탄성파속도 (V_{pl} , m/sec)	실외 탄성파속도 (V_{pf} , m/sec)	일축강도 (kgf/cm^2)	접선탄성계수 (kgf/cm^2)	암반의 변형계수 (kgf/cm^2)	암반의 평균변형계수 (kgf/cm^2)
고결체 (도직교)	A2-45	8.4	1,830	2,050	70	15,000	16,803	*암반의 평균변형계수 ($E_m=46,763$) *망상 IC의 암석 섞인 고결체를 포함하면 ($E_m=40,060$)
		12.35	2,470	5,900	130	37,000	88,380	
		13.95	2,460	3,900	170	38,000	60,244	
	A2-2	14.85	1,710	4,300	30	5,000	12,573	
		14.925	2,010	4,300	90	10,000	21,393	
	A2-4	16.675	1,880	4,400	50	11,000	25,745	
		17.5	1,880	5,100	60	11,000	29,840	
		17.875	3,290	4,400	100	29,000	38,784	
		19.8	1,880	4,000	80	16,000	34,043	
	A2-6	19.975	2,460	3,900	170	35,000	55,488	
		22.05	2,210	5,800	170	37,000	97,104	
	A2-1	22.5	1,840	5,800	150	32,000	100,870	
23.65		1,790	5,300	40	9,000	26,648		
석회암 (도직교)	A1-1	22.5	6,000	2,271	1390	573,000	216,881	석회암 ($E_m=284,083$)
		16.5	5,560	9,000	1130	434,000	702,518	
	P1-1	28.4	6,130	2,157	1210	594,000	209,014	
		11.55	6,290	1,089	1400	444,000	76,870	
A2-1	26.35	6,150	2,305	1530	574,000	215,133		
	고결체 (망상 IC)	A2-5	14.7	1,320	1,050	50	6,000	4,773
15.6			2,480	1,100	210	45,000	19,960	암편 섞인 고결체 ($E_m=18,278$)
16.7			2,580	1,219	180	34,000	16,064	
17.5			2,660	1,726	160	28,000	18,168	
18.5		2,260	2,036	130	21,000	18,919		
A2-8	22	1,840	2,036	90	14,000	15,491	탄질 섞인 고결체 ($E_m=11,672$)	
A2-9	21	1,450	1,756	70	11,000	13,321		
A2-10	23	1,180	2,209	50	7,000	13,104		

Onodera(1963)의 식을 이용하여 구한 암반의 변형계수를 산정하여 평균값을 취한 결과, 석회암과 암편 섞인 SIG 고결체 그리고 탄질 섞인 SIG 고결체는 각각 $2.84 \times 10^5 \text{kgf/cm}$, $0.4 \times 10^5 \text{kgf/cm}$, $0.12 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 이었다. 그리고 암편이 섞인 SIG 고결체의 경우 그 값의 차이가 큰데 그 이유는 암편의 비율이 일정치 않고 다소 차이가 나기 때문으로 판단된다.

4.2 암반의 변형계수와 일축압축강도 관계

상기에서 구한 암반의 변형계수가 일축압축강도, 실내외 탄성파속도, 실내 탄성계수와의 상관관계를 알아보기 위하여 암편 섞인 SIG 고결체, 탄질 섞인 SIG 고결체, 석회암에 대하여 그림 7~그림 10에 나타내었다.

이들 그림에 의하면, 암석 섞인 SIG 고결체의 변형계수는 실외 탄성파속도와와의 분포도는 비교적 좋게 나타나지만 반면에 일축압축강도, 실내 탄성계수, 실내 탄성파속도와는 상관성이 뚜렷하지 않았다.

그리고 탄질 섞인 SIG 고결체의 변형계수는 사용한 자료가 부족하지만 일축압축강도, 실내의 탄성파속도, 실내 탄성계수와의 상관성은 좋게 나타났다. 또한, 석회암의 변형계수는 현장 탄성파속도와와의 관계를 제외한 모든 상관성이 나쁘게 나타났다. 여기서 상관관계가 뚜렷하지 않은 가장 큰 이유는 암편 또는 탄질 섞인 고결체가 암편 또는 석탄 덩어리가 지층 깊이 마다 그 비율이 일정치 않기 때문이라고 판단된다.

특히, 현장 탄성파속도와 암반의 변형계수 관계는 암편 또는 탄질 섞인 SIG 고결체와 석회암 지반에 가장 좋은 상관성을 보였다.

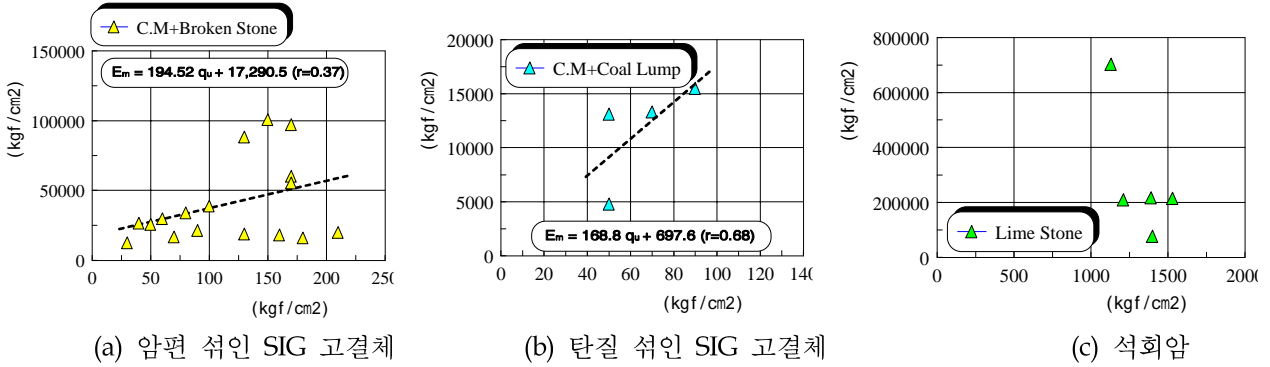


그림 7. 일축압축강도-암반의 변형계수

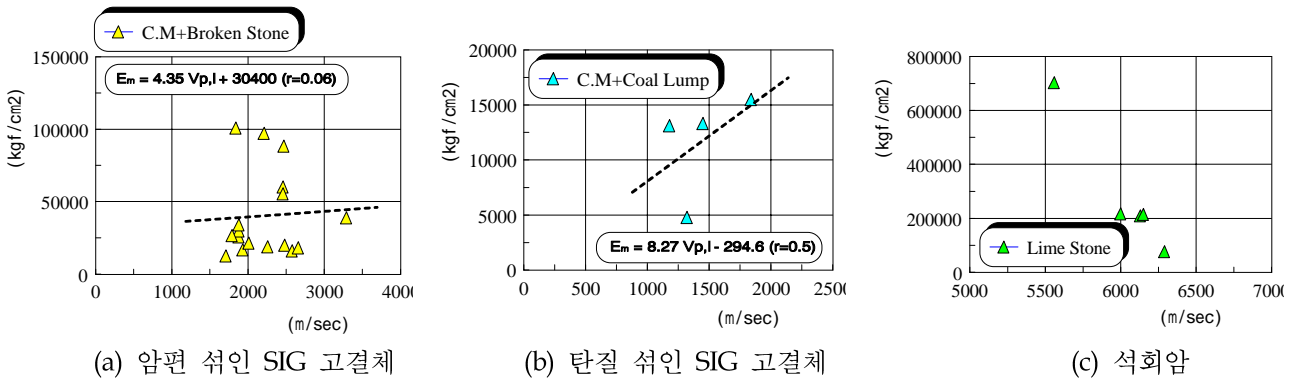


그림 8. 실내 탄성파속도-암반의 변형계수

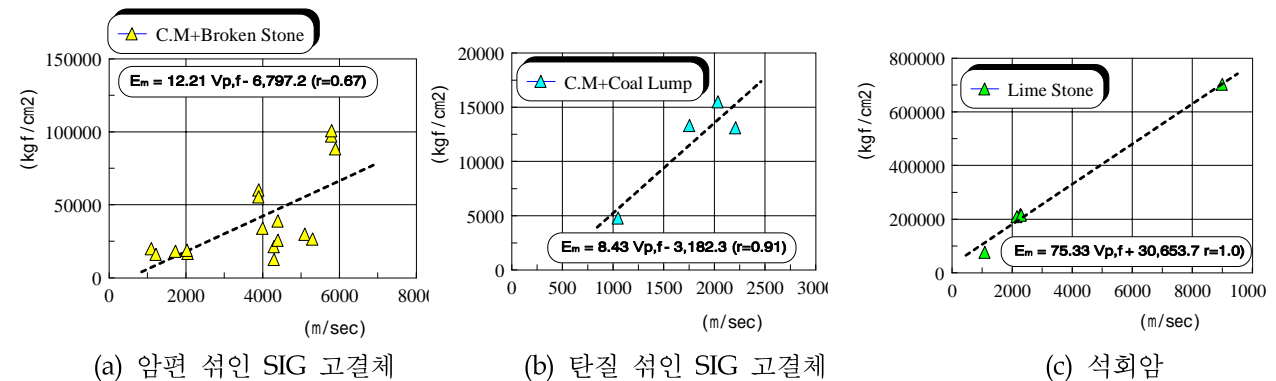
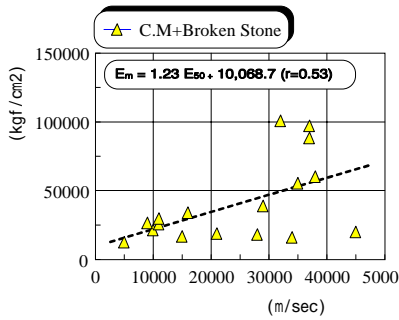
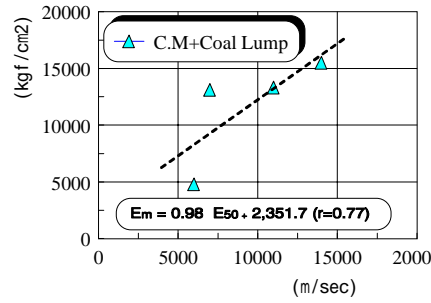


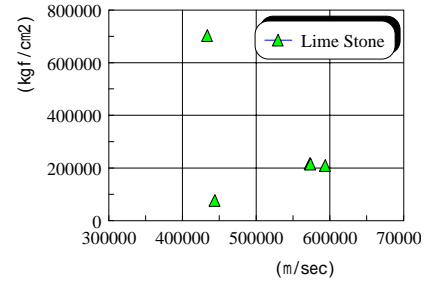
그림 9. 현장 탄성파속도-암반의 변형계수



(a) 압편 쉼인 SIG 고결체



(b) 탄질 쉼인 SIG 고결체



(c) 석회암

그림 10. 실내 탄성계수-암반의 변형계수

5. 결론

동해지역의 석회암과 SIG 시멘트 밀크 고결체에 대한 내부마찰각, 점착력, 일축압축강도, 탄성과속도, 정탄성계수와 변형계수의 크기 및 상관성은 다음과 같다.

1. 석회암의 평균 정탄성계수, E_{50} 는 $5.08 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 이었고, 압편 쉼인 SIG 고결체는 $0.25 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 이었고, 망상 IC 교의 탄질 쉼인 SIG 고결체는 $0.095 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 이었다.
2. 석회암의 평균 탄성과속도, $V_{p,i}$ 는 5,240m/sec이었고, 압편 쉼인 SIG 고결체는 2,211.3m/sec이었고, 망상 IC 교의 탄질 쉼인 SIG 고결체는 1,447.5m/sec이었다.
3. 석회암의 평균 일축압축강도, q_u 는 1,221.3kgf/cm²이었고, 압편 쉼인 SIG 고결체는 125.22kgf/cm²이었고, 탄질 쉼인 SIG 고결체는 35kgf/cm²이었다.
4. 석회암의 평균 내부마찰각과 점착력은 각각 49.14도, 137.7kgf/cm²이었고, 압편 쉼인 SIG 고결체는 각각 38.39도, 23.5kgf/cm²이었고, 탄질 쉼인 SIG 고결체는 각각 25.83도, 15.5kgf/cm²이었다.
5. 압편과 탄질이 쉼인 SIG 고결체에 대한 탄성계수와 일축압축강도와 실내 탄성과속도의 상관관계는 고결체 속에 압편 또는 탄질의 유무에 상관없이 전반적으로 상관성이 높게 나타났다. 하지만 석회암은 그 상관성이 낮았다.
6. 정탄성계수, 현장탄성과속도, 그리고 실내탄성과속도의 관계를 이용하여 구한 석회암과 압편 쉼인 SIG 고결체 그리고 탄질 쉼인 SIG 고결체의 평균 변형계수는 각각 $2.84 \times 10^5 \text{kgf/cm}$, $0.4 \times 10^5 \text{kgf/cm}$, $0.12 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 이었다.
7. 현장 탄성과속도와 암반의 변형계수 관계는 압편 또는 탄질 쉼인 SIG 고결체와 석회암 지반에 가장 좋은 상관성을 보였다.

참고 문헌

1. 장명환, 양형석(1999), "암반구조물의 수치해석을 위한 입력 자료의 분석", *터널과 지하공간 한국암반공학회*, Vol.9, pp. 221-229
2. 신중호(1998), "암석 및 암반 시험", *건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술 한국암반공학회*, pp.504~510
3. Bieniawski, Z.T(1978) "Determining Rock Mass Deformability - experience from case histories", *Mining Science and Geomechanics*, ISRM, Abstract, 15, pp.237-247
4. Onodera, T.F(1963) "Dynamic Investigation of Foundation Rock in-situ", *Proceedings of 5th Symposium on Rock Mechanics*, pp.517-533
5. Ramamurthy, T(1993), "Strength and Modulus Responses of Anisotropic Rocks", *Principles, Practice & Projects*, Pergamon Press, Vol. 1-I. pp.315-330

6. Serafim, J.L. and Pereira, J.P(1983), "Consideration of the Geotechnical Classification of Bieniawski", *Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, Lisbon, Vol. 1(ii)*, pp.33-44