

지하 대공간 슛크리트 품질관리를 위한 현장강도 시험기술에 관한 연구

장석부^{1)*}, 이성우²⁾, 홍의준³⁾, 문상조⁴⁾

A Study on Field Testing Methods for the Shotcrete Quality Control of Large Underground Spaces

Seok-Bue Chang, Soung-Woo Lee, Eui-Joon Hong and Sang-Jo Moon

Abstract It is well known that shotcrete is the most important support member for the construction of large underground spaces. Generally, the strength of the field shotcrete is heavily dependent on the field mixing and spraying conditions so that it is different from the strength of the shotcrete mixed in laboratories. As a support member, the early strength of shotcrete unlike concrete is very important to the initial stabilization of the underground spaces. Therefore, the field methods to efficiently test the early strength of shotcrete have been highly required. This paper aimed to verify the pneumatic pin penetration test and the point load test for measuring the early strength of the field shotcrete. As a result of the experiments through a series of uniaxial compression, pin penetration, and point load tests for the range of the early shotcrete strength, two equations to estimate reliably the uniaxial compressive strength by the pin penetration and the point load tests were acquired.

Key Words Shotcrete strength, Quality control, In-situ test, Pin penetration test, Point load test

초 록 지하대공간 건설에 있어서 슛크리트는 가장 중요한 지보재임은 주지의 사실이다. 슛크리트의 강도는 현장 배합 및 타설 조건에 따라 실험실 조건의 슛크리트와는 큰 차이를 보이는 것이 일반적이다. 구조부재인 일반 콘크리트와 달리 슛크리트의 초기강도는 지하공간의 초기 안정화에 매우 중요하다. 그러나, 슛크리트 초기 강도의 측정은 적절한 현장강도시험방법의 부재로 인하여 잘 관리되지 않은 실정이다. 따라서, 현장에서 슛크리트 초기강도를 효과적으로 측정할 수 있는 방법이 요구되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 핀관입시험법 및 점하중강도시험법의 현장 슛크리트 초기강도 측정에 대한 적합성을 검토하였다. 이를 위해 다양한 양생강도에 따른 일축압축시험, 핀관입시험, 점하중시험을 수행하여 일축압축강도에 대한 신뢰성 높은 핀관입깊이와 점하중 지수의 상관관계식을 도출하였다.

핵심어 슛크리트강도, 현장시험, 핀관입시험, 점하중시험

1. 서 론

지하 대공간 건설에 있어서 슛크리트는 안정성 확보에 가장 중요한 지보재이므로 시공중 품질관리에 많은 주의가 요구된다. 특히, 슛크리트의 초기강도는 구조적으로 취약한 막장 주변의 안정성에 매우 중요하므로 슛크리트의 품질관리를 위한 강도기준은 1일 강도와 28

일 강도에 대해 규정되어 있다.(터널설계기준, 1999) 슛크리트의 초기압축강도는 원칙적으로는 갱내에서 현장 타설된 슛크리트의 코어를 채취하여 측정되어야 하나 현장 시험상 많은 제약으로 인하여 실내시험결과로 평가되고 있는 실정이다(장석부 등, 2005a). 그러나, 현장타설 조건의 슛크리트는 시험실내 배합조건에 비해 약 80% 정도 낮은 강도를 보이는 것이 일반적이며, 현장 품질관리 상태에 따라 더 큰 차이가 발생할 수도 있다(Melbye, 2001). 이에, 실질적인 현장타설 슛크리트의 초기강도를 효과적으로 측정할 수 있는 방법의 필요성이 요구되고 있는 실정이다.

스�크리트의 지지메커니즘에서 볼 때, 지하공간이 대단면화 될수록 슛크리트는 압축강도 외에 부착력이 매우 중요해진다(장석부 등, 2005b, 2005c). 그러나, 부착력

¹⁾ (주)유신코퍼레이션 이사

²⁾ (주)유신코퍼레이션 사원

³⁾ (주)유신코퍼레이션 대리

⁴⁾ (주)유신코퍼레이션 전무이사

* 교신저자 : sbchang@yooshin.co.kr

접수일 : 2006년 8월 23일

심사 완료일 : 9월 28일

시험은 압축강도 시험에 비해 매우 어렵고 부착력은 압축강도와 비례하기 때문에 슛크리트의 역학적 성질을 측정하기 위해서는 압축강도가 여전히 적절한 기준이 된다. 즉, 슛크리트의 압축강도는 현장타설 슛크리트의 구조적 특성을 평가할 수 있는 가장 중요한 지표가 된다.

최근의 연구에 의하면, 현장타설 슛크리트의 초기강도시험 장비로 공기압식 핀관입시험기(Pneumatic pin penetration test)의 적용이 제안되었다(Iwaki et al., 2001, 이석원 등, 2003). 또한, 일축압축시험에 비해 시험이 매우 간편하고 갱내 시험이 가능한 점하중시험(Point load test)의 적용이 제안된 바 있다(장석부 등, 2005a).

이에, 본 논문에서는 효율적인 현장타설 슛크리트의 초기강도시험기술 개발을 위해 핀관입시험과 점하중시험을 통한 일축압축강도를 산정하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 다양한 양생강도에 따른 일축압축시험, 핀관입시험, 점하중시험을 수행하여 일축압축강도에 대한 핀관입 깊이와 점하중지수(Point load index)의 상관관계를 도출하였다.

2. 슛크리트 현장강도 시험 방법

2.1 개요

스�크리트 현장강도 측정을 위한 방법으로는 인발시험(Pull-out test), 핀관입시험 및 점하중시험 등을 들 수 있다.

인발시험은 슛크리트 타설 전에 볼트를 삽입한 후 인발하여 그 저항력을 측정하는 방법으로 여러나라에 시험기준이 마련되어 있다. 그러나, 실제 터널현장에서는 시험방법이 복잡하고 시공에 지장을 주기 때문에 별도 형틀에 슛크리트를 타설하여 시험되고 있어 엄밀한 현장시험방법으로 간주하기엔 어려운 점이 있다.

핀관입시험에는 Windsor probe method, Spring-loaded method, 공기압식 핀관입시험이 있다. 본 연구에서는 공기압식 핀관입시험이 화약을 사용하지 않고 폭 넓은 강도 범위에 용이하게 적용될 수 있는 장점을 고려하여 본 방법을 채택하였다. 비록 현재 설계기준상으로 슛크리트의 초기강도는 낮은 편이나 최근 슛크리트 고강도화가 세계적인 추세이며 국내에서도 이에 대한 연구의 필요성이 부각되고 있으며 지속적인 연구가 이루어지고 있기 때문에 초기강도시험법의 선정에도 이를 고려할 필요가 있다.

점하중시험방법은 많은 암석에 대한 시험결과에 대해 압축강도를 산정하기에 손쉬운 방법으로 평가되고 있다. 암석에 비해 슛크리트는 인공재료이기 때문에 상대적으로 점하중시험과 일축압축시험간의 상관성이 높을 것으로 예상되었다.

따라서, 본 절에서는 공기압식 핀관입시험과 점하중 시험에 대한 특징 및 개요를 간단히 소개하였다.

2.2 공기압식 핀관입시험

공기압식 핀관입시험은 압축공기를 이용하므로 안전하다는 장점이 있으며 강도측정범위에 따라 핀을 교체하면서 시험하기 때문에 슛크리트의 초기강도에서 최대 30 MPa 까지의 넓은 범위를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

핀은 일반적인 공기압식 네일러(Nailer)를 사용하여 슛크리트에 발사된다. 공기압식 네일러의 작동원리는 Fig. 1(a)와 같다. 공기압은 기본적으로 15.0 kgf/cm²로 설정되어 있으나, 시험전에 폴리에틸렌 재질의 테스트 앤빌(Anvil)에 대한 검증을 통해 결정한다. Fig. 1(b)와 같이 강도 추정범위를 넓히기 위해 지름과 길이가 다른 Pin A, Pin B를 사용한다. 시험 후 깊이 측정기로 핀의 관입깊이를 측정한다. Fig. 1(c)와 같이 핀관입시험은 시험할 지점에서 일반적으로 10회 이상 수행하며, 측정된 핀 관입깊이가 평균 관입깊이의 ±5 mm 이상이 되었을 때 이를 이상 값으로 규정하여 소정의 시험회수(표준10회)가 이루어지도록 측정값을 보충하도록 한다.

Fig. 2는 핀 관입 깊이와 압축강도 및 인발시험결과와의 관계를 나타낸 그래프로써 다음과 같은 슛크리트 강도 추정식이 제시되었다.

$$F = -0.000246D^3 + 0.051D^2 - 3.66D + 92.4 \quad (1)$$

(핀A, 강도10 ~ 30MPa)

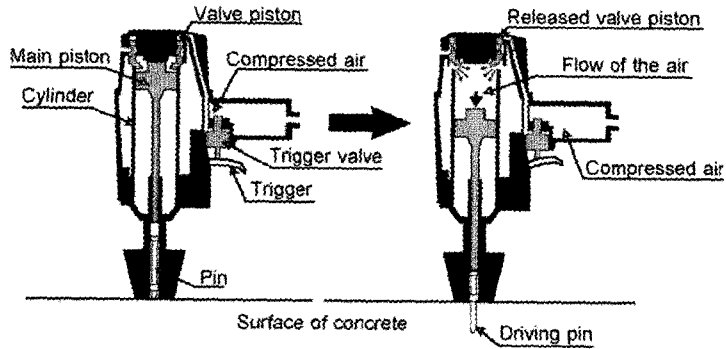
$$F = -0.000255D^3 + 0.0399D^2 - 2.21D + 45.7 \quad (2)$$

(핀B, 강도10MPa 이하)

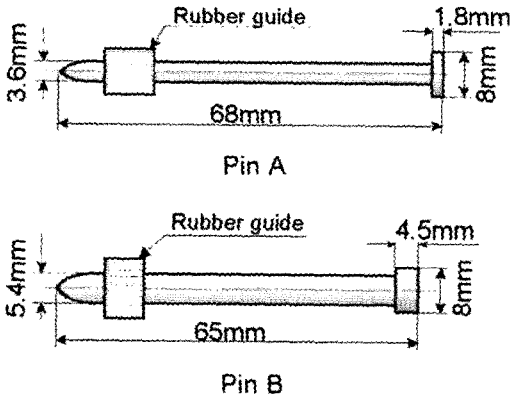
위 식에서 F는 추정압축강도(MPa)이고 D는 핀의 관입깊이(mm)이다. 그리고 강섬유 사용량이나 최대골재 크기와 같은 변수들의 영향은 없으며 슛크리트 타설면의 거칠기도 거의 영향을 미치지 않는다고 보고되었다(Iwaki et al., 2001).

2.3 점하중 시험

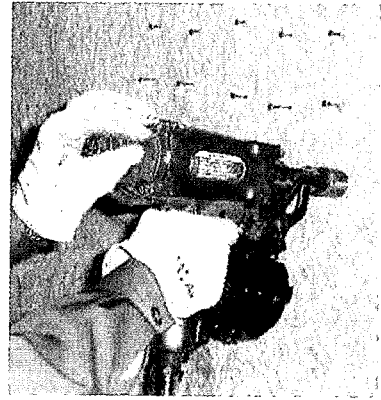
점하중 시험장비의 구성은 Fig. 3과 같이 점하중 시험기, 유압잭, 그리고 하중 측정 장치로 구성되어 있다. 암석을 단단한 강철 콘(Cone) 사이에 넣고 하중을 가하여 하중방향과 평행하게 인장 균열이 생기도록 하여 파괴를 유도한다. 이 시험법은 불규칙한 암석의 형상과 크기의 효과가 상대적으로 적은 장점이 있다. 시료는 임의의 형상을 가져도 무방하나 점하중 축상의 시편의 크기를 측정하여 시험후 그 값을 계산식에 이용한다(Brown, 1981).



(a) Mechanism of pneumatic nailer



(b) Specification of pins



(c) State of pneumatic pin penetration test

Fig. 1. Pneumatic Pin Penetration Test (Iwaki et al., 2001)

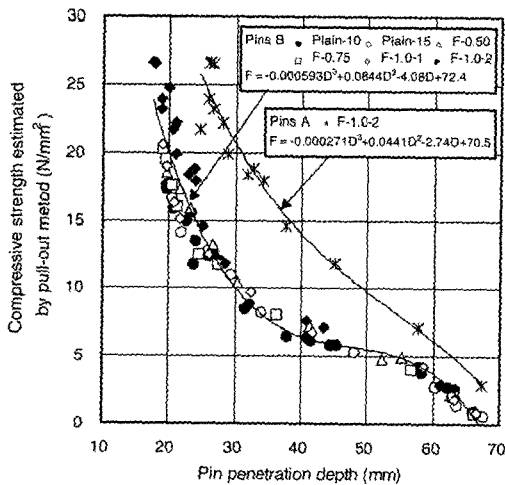


Fig. 2. Relationship between the pin penetration depth and the estimated compressive strength (Iwaki et al., 2001)

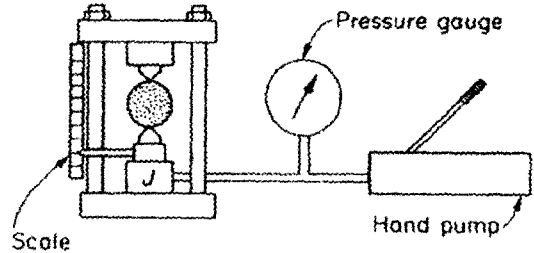


Fig. 3. Point Load Test

점하중 강도지수는 다음과 같은 식으로 정의할 수 있으며, 여기서, P는 파괴시 하중이며 D는 점하중 간의 거리이다.

$$I_s = \frac{P}{D^2} \tag{3}$$

시험시편의 크기와 모양은 특별하게 지정된 것은 아니나 직경의 1.4배 이상 되는 길이의 시편에 대해 이루어져야한다. 실제로 강도/크기 효과는 일반적인 크기에 대한 결과로 보정되어야 한다. 이 점하중지수로부터 암석의 압축강도를 추정할 수 있으며 다음과 같은 식으로부터 압축강도의 추정이 가능하다.

$$q_u = 24I_{s(50)} \tag{4}$$

여기서, q_u 는 암석의 일축압축강도이며 $I_{s(50)}$ 은 직경

50 mm에 대해 보정된 점하중강도지수이다.

코어의 크기나 시험 압중 및 절리의 형태에 따라 그 값을 추정하는 관계식에 대한 많은 연구가 여러 연구자들에 의하여 오랜 기간 이루어져 왔다. 점하중 강도와 일축압축강도의 일반적 상관관계식은 다음과 같다.

$$q_u = K I_{s(50)} \tag{5}$$

상수 K에 대한 많은 연구가 오랜 기간 이루어져 왔으며 그 내용을 요약하면, Table 1과 같다.

3. 실험 및 결과분석

3.1 시료준비

실내실험을 위한 재료는 골재, 시멘트, 물, 모래이고 Table 2와 같은 비로 배합되었다. 골재는 10 mm 이하를

Table 1. Summary of available correlations for rock properties using the Point Load test (Grasso, P., 1992)

References	Correlations Obtained Equations	γ (결정계수)	Rock Types Studied	Remarks
Broch & Franklin 1975	$q_u = 23.7I_{s(50)}$	0.88	15 litho. units from 3 major rock types	일축압축강도에 대한 크기보정 없이 38 mm 직경 코어에 대한 실험
Bieniawski 1975	$q_u = 24I_{s(54)}$ $q_u = 21I_{s(42)}$ $q_u = 18I_{s(21.5)}$	알수 없음	sandst, quartz, norite (weak), norite (strong)	54, 21, 18 mm 직경에 대해 각 압중별로 20번의 실험
Cargill & Shakoor 1990	$q_u = 23I_{s(50)} + 13$	0.94	13 litho. units sandst, lmst, dolost, marble and gneiss	암중별로 적어도 10번의 시험 : 모든 시험은 54 mm 코어

Table 2. Mix proportion for tests

Aggregate	Portland cement	Water	Sand
568 kg/m ³	450 kg/m ³	194 kg/m ³	1,054 kg/m ³



Fig. 4. Large mould.

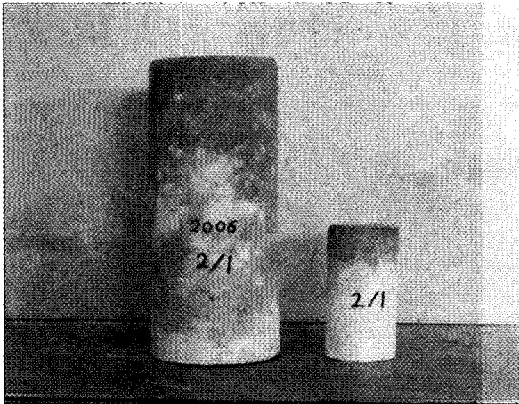


Fig. 5. Core specimens for an uniaxial compression test and a point load test

사용하였고 골재 표면에 부착되어 있는 세립자를 제거하기 위하여 세척 후 건조시켰다. 시멘트는 포틀랜드 시멘트, 모래는 석영사를 사용하였다. 숏크리트는 급결제를 혼합해야하나, 실험경험상 초기 급결에 의해 실험시간이 제한되는 문제가 있어 본 실험에서는 급결제를 배제하였다.

현장 실험과 같은 조건을 구현하기 위하여 Fig. 4와 같이 가로 2.6 m, 세로 1.3 m, 높이 20 cm인 일체형 거푸집을 제작하여 숏크리트를 타설하였다. 일축압축강도 시료와 점하중강도 시료는 시료 추출 비트를 시료 추출기에 결합하여 채취하였다. 각 압축시험과 동일한 조건에서 핀관입시험이 수행되도록 시료채취 주변에서 10회 이상을 수행하도록 계획하였다.

일축압축 강도시험과 점하중강도시험을 위한 코어는 각각 지름 10 cm와 5 cm 비트를 이용하여 Fig. 5과 같이 추출되었다. 점하중 코어는 세로 길이가 20 cm로 추출되어 절단기(Cutter)를 이용하여 10 cm로 성형하고 점하중 실험을 수행하였다.

비트에 의하여 추출된 시료를 비트로부터 안전하게 분리하기 위하여 더블튜브 코아바렐(Double tube core barrel)을 사용하여 순환수를 튜브 사이로 통과시켜 비트 내부에서 코어를 분리하도록 하였다.

3.2 실험결과

숏크리트의 재령일에 따른 일축압축강도, 핀관입깊이, 점하중시험결과는 Table 3과 같이 약 27 MPa의 압축강도에 이를 때까지 3종류의 시험을 10회 수행하였다.

Fig. 6은 재령일에 따른 일축압축강도, 핀관입깊이 및 점하중지수를 나타낸 것으로 일축압축강도의 경우 약 20일의 재령일을 기준으로 증가추세가 감소하는 경향을 전형적인 콘크리트 양생과정을 보여주고 있다. 관입깊이는 양생시간에 따라 대체로 선형적으로 반비례하

는 양상을 보이고 점하중지수는 일축압축강도와 유사한 경향을 보여주고 있다.

일축압축강도와 핀관입깊이의 상관성 분석결과, 식(6)과 같이 높은 상관성을 보이는 선형 상관식을 구할 수 있었다.

$$q_u = -0.64D + 42.53 \text{ (결정계수 0.98)} \quad (6)$$

Iwaki 등(2001)은 10 MPa을 기준으로 2종류의 핀을 사용할 것을 제안하였으나, 최근 숏크리트의 고강도화에 따라 초기 1일강도를 10 MPa 이상을 제안하는 추세이다. 따라서, 10 MPa 이상에 대한 핀 A에 대해서 상관성 분석을 수행하였으며, 실제로 10 MPa 이하에 대해서도 큰 오차 없이 압축강도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 일축압축강도와 핀관입깊이의 상관성을 그래프로 나타낸 것으로 참고로 Iwaki 등(2001)의 결과를 함께 도시하였다. Iwaki의 상관식은 3차원 회귀식으로 본 연구에서 구한 식(6)의 선형식과 비교하여 정밀도에 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.

일축압축강도와 점하중지수의 상관성 분석결과, 식(7)과 같이 높은 상관성을 보이는 선형 상관식을 구할 수 있었다.

$$q_u = 27.68I_{s(50)} + 0.14 \text{ (결정계수 0.96)} \quad (7)$$

Fig. 8는 식(7)과 Table 1의 기존 연구자들의 상관관계식을 함께 도시한 것으로 본 연구의 상관식의 기울기는 기존 연구에 비해 다소 급하나 여러 암석 시험결과와 중간에 위치함을 볼 수 있다. 또한, Table 1의 기존 연구에 비해 상관계수가 높은 이유는 자연에서 채취한 암석에 비해 상대적으로 균질한 시료에 대해 시험이 이루어졌기 때문이다.

Table 3. Test results data by different measuring method

Time (days)	일축압축강도 q_u (MPa)	핀관입깊이 D (mm)	점하중지수 $I_{s(50)}$
1	0	65.00	0
3	3.44	63.55	0.13
6	5.60	60.10	0.16
9	12.39	42.37	0.47
12	14.31	41.86	0.48
13	14.41	37.56	0.52
18	23.34	33.50	0.72
20	25.56	27.76	0.79
25	26.79	26.48	0.83
30	27.21	25.32	0.88

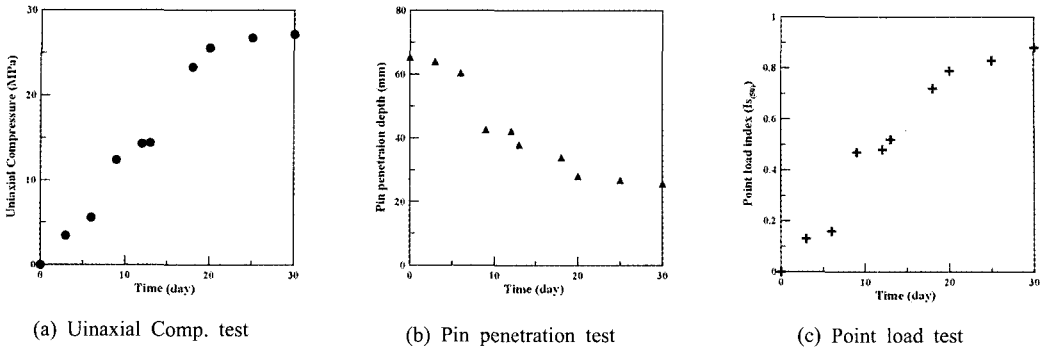


Fig. 6. Test results of 3 methods

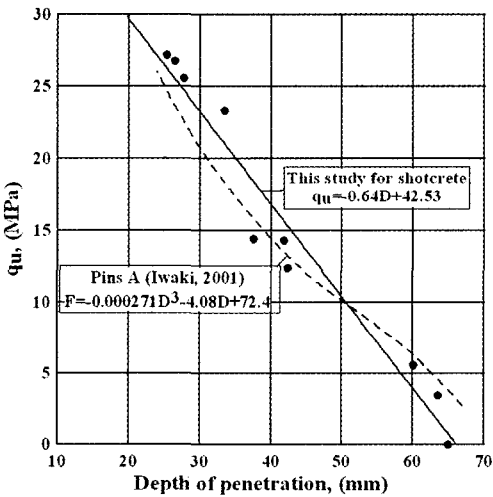


Fig. 7. Relationships between the depth of penetration and the estimated uniaxial compressive strength

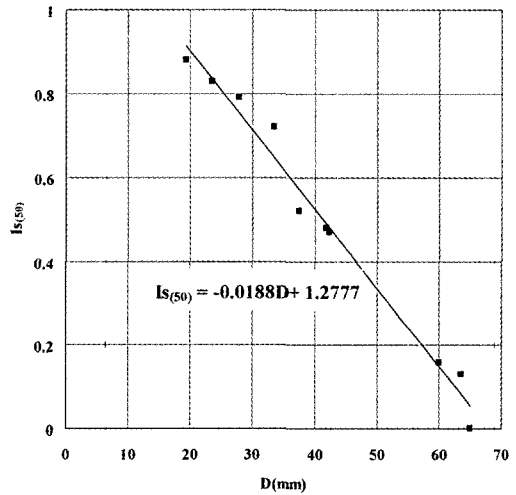


Fig. 9. Relationships between the depth of penetration and the point load index

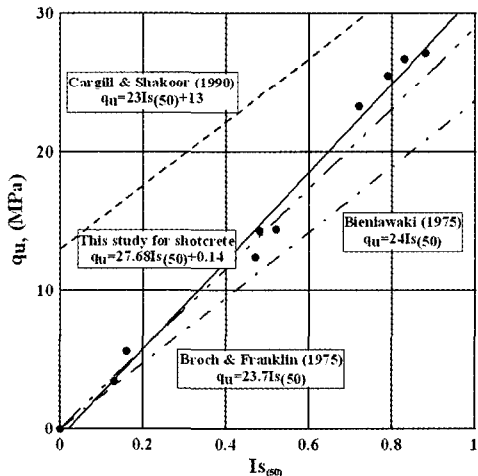


Fig. 8. Relationships between the point load index and the estimated uniaxial compressive strength

핀관입깊이와 점하중지수의 상관성 분석결과, 식(8)과 같이 높은 상관성을 보이는 선형 상관식을 구할 수 있다.

$$I_{s(50)} = -0.0188D + 1.277 \text{ (결정계수 0.96)} \quad (8)$$

Fig. 9은 점하중지수와 핀관입깊이의 상관성을 그래프로 나타낸 것으로 식(6)에서와 같이 일축압축강도와 핀관입깊이의 상관성 분석결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 시공중 슛크리트 현장강도 측정을 위한 핀관입시험법과 점하중시험법의 적용성에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과 및 결론은 다음과 같다.

- 1) 일축압축강도와 핀관입깊이의 상관성을 분석한 결과 Iwaki가 제안한 상관식보다 간편하고 실용적인 선형관계식을 구하였다. 또한, 최근의 고강도 슛크리트의 추세를 고려하여 핀 A에 대한 관입시험만으로 슛크리트의 초기압축강도를 충분히 평가할 수 있는 상관식을 구할 수 있었다.
- 2) 일축압축강도와 점하중지수 상관성을 분석한 결과, 기존 암석시험사례에 비해 높은 상관성을 보이는 상관식을 구할 수 있었다. 즉, 점하중시험만으로 신뢰성 높은 슛크리트의 일축압축강도를 산정할 수 있을 것으로 예상된다. 점하중시험은 일축압축시험에 비해 시험이 간편하고 저렴하기 때문에 슛크리트의 일축압축강도시험을 대체하는 경우 현장 품질관리비용과 시간의 큰 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 점하중지수와 핀관입깊이의 상관성이 매우 높게 분석된 것은 두 가지 점에서 시사하는 바가 크다. 첫 번째는 본 연구에서 사용된 시료들의 균질성이 매우 높다는 것을 반증하는 것이고 두 번째로는 현장 시험시 핀관입시험의 적정성을 확인할 수 있는 방법으로 점하중시험을 사용할 수 있다는 것이다.

앞으로 본 연구에서 개발된 핀관입시험과 점하중시험법에 대한 현장적용연구를 통하여 현장적용시 미비점을 보완하고 공사현장에서 적용할 수 있는 시험 절차를 작성할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 2005년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술 C01)에 의하여 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

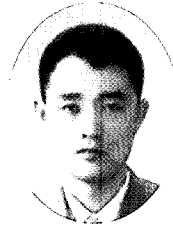
참고문헌

1. 이석원, 배규진, 장수호, 박해균, 이명섭, 김재권, 2003, 슛크리트의 압축강도를 추정하기 위한 공기압식 핀관입시험의 적용성 평가, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 4723-4728.
2. 장석부, 홍의준, 문상조, 2005a, 슛크리트 품질관리를 위한 현장 압축강도시험법에 관한 연구, 한국터널공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 175-186.
3. 장석부, 홍의준, 문상조, 2005b, 슛크리트 부착강도가 절리압반 터널지보에 미치는 영향에 관한 연구, 한국지구시스템공학회, 추계학술발표회 논문집, pp. 163-167
4. 장석부, 홍의준, 문상조, 2005c, 대단면 암반터널의 안정성에 미치는 슛크리트 부착강도의 영향에 관한 연구, 한국터널공학회 논문집, 7(4), pp. 305-311
5. 터널설계기준, 1999, 한국터널공학회
6. Brown E. T. 1981, Rock characterization testing & monitoring, ISRM
7. Iwaki, K, A. Hirama, K. Mitani, S. Kaise, K. Nakagawa. 2001, A quality control method for shotcrete strength by pneumatic pin penetration test, NDT & E International 34, pp. 395-402
8. Grasso, P. et. al. 1992, Problem and promises of index testing of rocks, Rock Mechanics, Tillerson & Wawersik (eds), pp. 879-888
9. Melbye, T. 2001, Sprayed concrete for rock support, MBT International, pp. 154-155



장 석 부

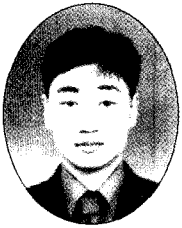
1990년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1992년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
1997년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학박사
Tel: 02-6202-0114
E-mail: sbchang@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 터널부 이사



이 성 우

2003년 성균관대학교 공과대학 토목환경
경공학과 공학사
2005년 성균관대학교 공과대학 토목환경
경공학과 공학석사

Tel: 02-6202-0114
E-mail: y13197@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 터널부 사원



홍 의 준

2000년 고려대학교 공과대학 토목환경공
학과 공학사
2003년 연세대학교 공과대학 토목공학과
공학석사

Tel: 02-6202-0114
E-mail: y12865@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 터널부 대리



문 상 조

1980년 한양대학교 공과대학 토목공학과
공학사
1997년 서울대학교 공과대학 토목공학과
공학석사
토질 및 기초 기술사

Tel: 02-6202-0076
E-mail: y12389@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 지반본부 전무이사