

건설재료의 비파괴 압축강도산정을 위한 누적 반발각의 적용성에 관한 연구

A Study on the Applicability of a Cumulative Rebound Angle for the Assessment of Compressive Strength of Construction Materials Nondestructively

손 무 락[†] · 장 병 식¹⁾ · 김 무 준¹⁾

Moorak Son · Byungsik Jang · Moojun Kim

Received: November 24th, 2016; Revised: December 8th, 2016; Accepted: January 13th, 2017

ABSTRACT : This paper is to grasp the applicability of a cumulative rebound angle measured from the rebound action generated after impacting an object for the assessment of compressive strength of construction materials nondestructively and to propose the test results. For this study, an impact device was devised and used for impacting an object by an initial rotating free falling impact and following repetitive impacts from the rebound action which eventually disappears. Five types of construction materials, which are soil cement, cement paste, wood (pine tree), and two types of rock (shale and granite), were tested and both peak rebound angle and cumulative rebound angle were measured for each material by using a high-speed camera. The measured angles were compared with the directly measured compressive strength for each material. The comparison showed that for materials such as cement and rock the cumulative rebound angle, which reflects energy dissipation, rather than the peak rebound angle is more appropriate indicator for assessing the compressive strength of a material, but for a construction material such as wood which has a high toughness the magnitude of rebound is not an indicator to assess the compressive strength of a material.

Keywords : NDT, Compressive strength, Cumulative rebound angle, Energy dissipation, Impact device

요 지 : 본 논문은 건설재료의 비파괴 압축강도를 산정하기 위하여 재료타격 시 반발작용에 의해 발생하는 반발각을 모두 측정하고 이를 누적한 누적 반발각의 적용성에 관해 파악하고 그 결과를 제시하는 것이다. 본 연구에서는 이를 위해서 타격장치를 고안하였고 이를 이용하여 건설재료를 회전 자유낙하에 의해 초기 타격토록 하고 이 후 반발작용에 의한 반복타격이 소멸될 때까지 발생할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 소일시멘트, 시멘트페이스트, 목재(소나무), 세일암석 및 화강암석의 5가지 건설재료를 대상으로 반발각실험을 실시하고 최대 반발각 및 누적 반발각을 초고속카메라를 이용하여 측정하였다. 재료별 측정된 최대 및 누적 반발각은 직접압축강도시험을 통한 재료별 압축강도와 상호 비교하였다. 비교결과, 시멘트에 바탕을 둔 건설재료나 암석과 같은 재료에 있어서는 최대 반발각보다는 에너지 감쇄특성이 반영된 누적 반발각이 재료별 특성을 보다 뚜렷하게 나타내어 압축강도 산정을 위한 보다 적절한 인자인 것으로 나타났으나 목재와 같이 인성이 큰 건설재료에 대해선 반발정도가 압축강도를 산정하는 인자가 아니라는 것을 파악할 수 있었다.

주요어 : 비파괴시험, 압축강도, 누적반발각, 에너지 감쇄, 타격장치

1. 서 론

최근 국내외 여러 가지 사고의 잦은 발생으로 인해 안전에 대한 사회적 관심이 많이 증가하고 있으며, 이에 따라 안전사고를 예방하기 위한 정부 및 지자체 등의 다각적인 노력이 대두 시 되고 있다. 특히 토목 및 건축구조물의 사회 기반시설물에 대한 안전문제는 시민의 생명 및 재산 등과 직접적으로 연관되어 안전에 대한 최우선 대상으로 분류되고 있다. 따라서 구조물 및 시설물의 안전한 설계, 시공 및

유지관리를 위하여 관련 주체는 사용재료에 대한 철저한 조사와 더불어 반드시 강도측정을 실시하여야 한다.

콘크리트나 암석을 포함한 다양한 건설재료에 대한 강도 측정방법에는 크게 직접적인 강도측정법과 간접적인 강도 측정법이 있다. 직접적인 강도측정법은 시험시편을 압축강도 시험장치 등을 통해 직접적으로 파괴시켜 강도를 측정하는 것으로서 현장에서의 시편 채취, 공시체 준비 및 시험과정 등의 번거로움과 불편함 등의 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 이에 비해 간접적인 강도측정법의 하나인 비파괴

† Department of Civil Engineering, Daegu University (Corresponding Author : mson@daegu.ac.kr)

1) Department of Civil Engineering, Daegu University

검사(NDT, Non-Destructive Testing)는 강도측정 절차가 용이하고 더욱 짧은 시간에 보다 많은 횟수의 강도를 측정할 수 있는 등의 여러 가지 장점이 있다. 현재 실무에서 가장 많이 적용되고 있는 강도측정 비파괴검사법은 표면 타격법과 초음파법으로 스위스 Proceq사와 미국 NDT James Instruments사의 제품들이 많이 사용되고 있다. 표면 타격법은 슈미트 해머법 (ASTM C805-13, 2013)이라고도 불리는 반발경도법으로서 측정대상물에 손상을 주지 않으면서 강도를 추정할 수 있는 방법으로 널리 사용되어 지고 있다. 반발경도법의 원리는 타격 시 해머의 타격에너지에 따라 반사되는 반발력의 크기와 측정대상물의 강도와 상관을 이용하는 것으로서 간단하고 단시간에 강도측정이 가능하지만 금속재료를 바탕으로 개발되어 복합재료인 콘크리트, 아스팔트, 암석 등에 적용 시에는 많은 제약이 따를 뿐만 아니라 상대적으로 높은 타격에너지에 의해서 시험시편이 종종 파괴되는 문제가 발생한다. 또한, 한 타격지점에서의 일회성의 반발력만을 이용함으로써 강도 추정의 정확성이 떨어진다는 단점이 있다. 초음파법을 이용한 압축강도 산정(Naik & Malhotra, 1991; FHWA, 1997)은 측정대상물을 통과하는 초음파의 전달속도에 바탕을 두고 있으나 재료 내부의 음파 전달속도는 재료와 시험장비의 접촉상태, 시험 시 재료의 온도, 습도, 비균질성, 통과길이 등의 여러 인자 및 국부적인 미소결함에 의해 큰 영향을 받는 특징이 있다. 이로 인해 초음파법은 재료 내부의 결함 등을 파악함에 있어서는 큰 활용성이 있으나 재료의 압축강도와 관련해서는 신뢰성 있는 강도추정이 어렵다는 문제점이 있었다. 이 외에도 여러 가지 비파괴시험법이 존재하며 이에 관한 설명은 국제원자력기구(IAEA, 2002)와 Patil & Patil(2008)이 발표한 보고서에 자세하게 나타나 있다.

본 연구는 이와 같은 기존 강도측정법에서 야기되는 여러 가지 결점 및 문제점들을 해소하고 건설재료의 비파괴 압축강도를 보다 신뢰성 있게 산정할 수 있는 방안을 강구하기 위해 수행되었다. 이를 위해 본 연구에서는 재료타격 시 반발작용에 의해 발생하는 반발각을 모두 측정하고 이를 누적한 누적반발각의 적용성에 관해 파악하고 그 결과를 제시하였다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 실험시편 준비

본 연구에서는 5가지 건설재료 시편을 준비하였다(Table 1). 소일시멘트 제작에 사용된 흙은 카올리나이트 점토이며, 사용한 시멘트는 보통포틀랜드시멘트이고, 건조 흙-물(점

토함수비 50% 및 물-시멘트비 80% 고려)-시멘트의 중량비는 4 : 4.8 : 1로 하여 제작하였다. 시멘트 페이스트 시편은 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 물-시멘트비(W/C) 40%로 제작하였다. 목재시편은 한국의 경북 청송이 원산지인 소나무를 사용하여 제작하였으며, 셰일 암석시편은 한국의 경남 함안지역에서, 화강암 암석시편은 한국의 경북 영천지역에서 채취하였다. 상기 5가지 재료의 시편은 모두 직경 50mm, 높이 100mm의 크기로 제작되었고(Fig. 1) 실험결과의 평균을 위하여 각 재료당 3개씩 제작되었다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 시험시편의 타격을 위해 타격장치를 고안하여 제작하였으며(Fig. 2), 또한 타격 시 반발작용에 의해 발생하는 반발각을 측정하기 위하여 초고속카메라를 이용



Fig. 1. Different material types of specimens used in this study

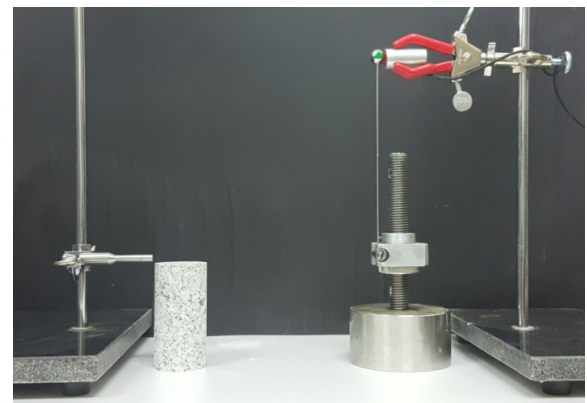


Fig. 2. Impact apparatus and rebound angle measurement

Table 1. Specimens used in this study

| Specimen type | Specimen number | Remark |
|------------------|-----------------|------------------------------|
| Soil cement | 3 | Age 55 days |
| Cement paste | 3 | Age 55 days |
| Wood (pine tree) | 3 | Cheongsong, Gyeongbuk, Korea |
| Shale | 3 | Haman, Gyeongnam, Korea |
| Granite | 3 | Youngcheon, Gyeongbuk, Korea |

Table 2. Comparison of impact energy for different test methods

| Test method Index | This study | Scleroscope | Schmidt hammer (N-type) |
|----------------------|------------|-------------|----------------------------|
| Energy (N.m) | 0.0326 | 0.0065 | 2.25 |

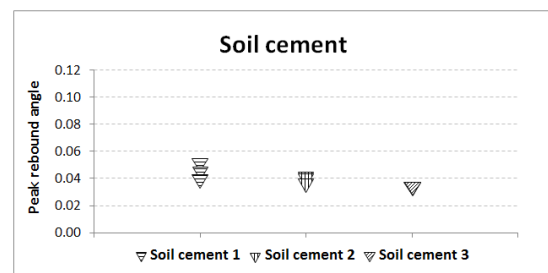
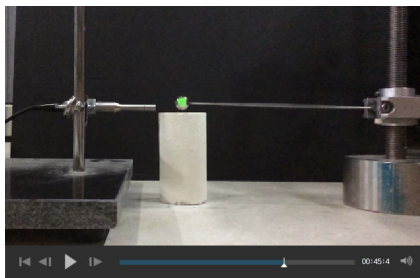
하였다. 본 연구에 사용된 재료타격장치는 타격높이 조절대, 타격봉(길이: 200mm, 직경: 2mm) 및 타격구(15mm 직경)로 이루어져 있으며 타격봉과 타격구는 크롬강으로서 일체로 제작하였으며 타격봉은 타격높이 조절대에 힌지로서 연결되어 자유 회전낙하에 의한 재료의 초기타격 및 반발작용에 의한 반복타격이 연속적으로 발생할 수 있도록 하였다. 실험은 콘크리트 바닥 위에서 실시하였으며 반발작용에 의한 반발각은 초고속카메라로 촬영 후 동영상 분석프로그램을 이용하여 측정하였다. 본 연구에 사용된 타격봉 및 타격구로 인한 에너지를 다른 기존시험법의 타격에너지와 비교하여 Table 2에 나타냈다. 표에서 보는 바와 같이 본 연구에 사용된 타격장치는 기존 재료 경도시험법의 하나인 Scleroscope 방법과 비교하여 약 5배의 높은 에너지를 나타냈으며 기존

반발타격시험법인 슈미트해머의 타격에너지와 비교하여서는 약 70배 낮은 에너지를 나타냈다.

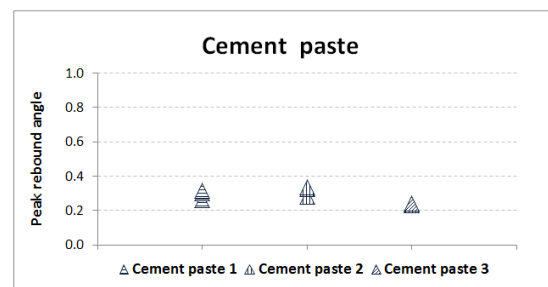
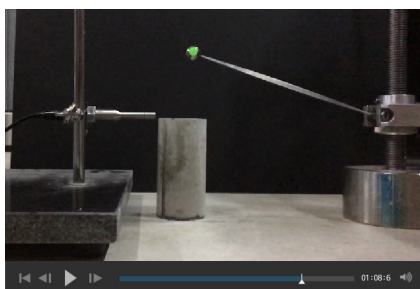
본 연구에서는 준비된 시편을 타격하기 전에 타격이 가해지는 표면을 연마석을 이용하여 평탄하게 연마하였다. 연마된 시편의 중심에 시편 하나당 총 3번의 타격을 실시하였다. 초기타격은 타격봉을 타격면과 89°의 각도를 이루는 위치에서 회전 자유낙하에 운동에 의해 이루어졌으며 초기타격 후 타격구의 반발작용에 의한 반복타격이 자유롭게 발생하여 소멸될 때까지 반발각을 라디안 단위로 측정하였다.

3. 실험결과 비교

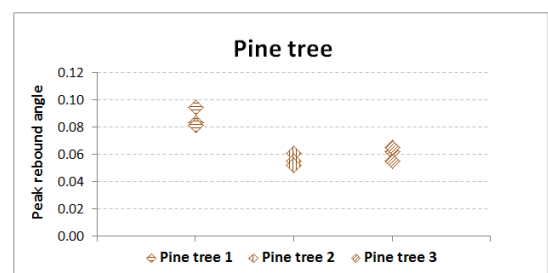
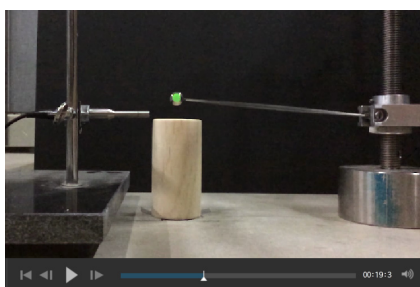
Fig. 3 및 Fig. 4는 본 연구에서 준비한 5가지 종류의 건설재료들에 대해 측정한 반발각을 최대 반발각(peak rebound angle) 및 모든 반발각을 누적한 누적 반발각(cumulative rebound angle)을 기준으로 정리한 것이다(각 실험결과와 명시된 해당 시편 상에 나타냄). 앞서 설명한 바와 같이 각



(a) Soil cement

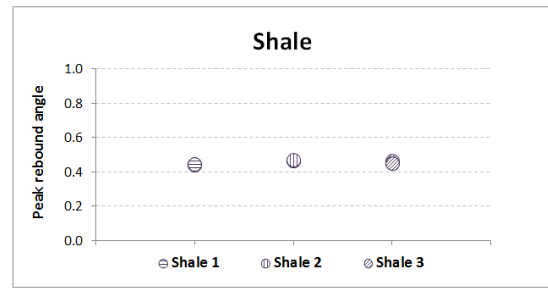
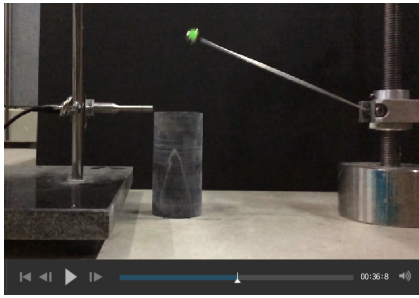


(b) Cement paste

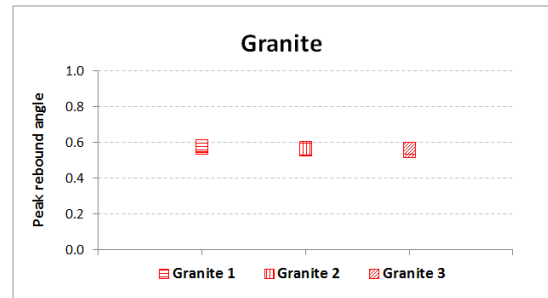
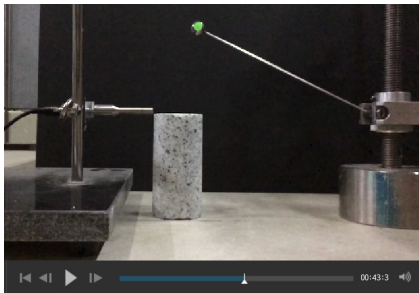


(c) Pine tree

Fig. 3. Measurement of peak rebound angle (radian)

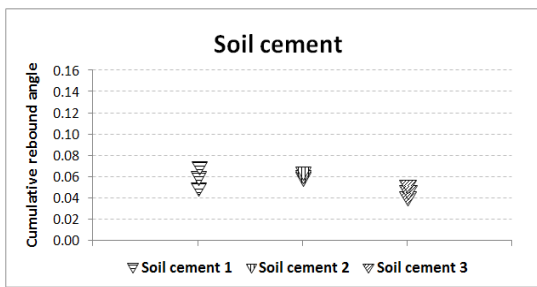


(d) Shale

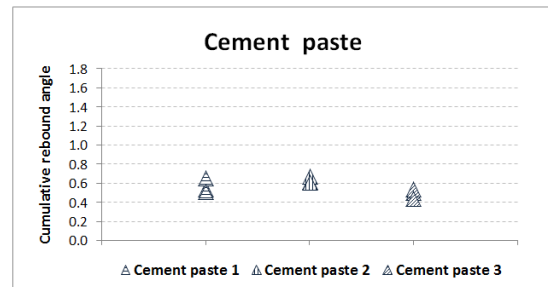


(e) Granite

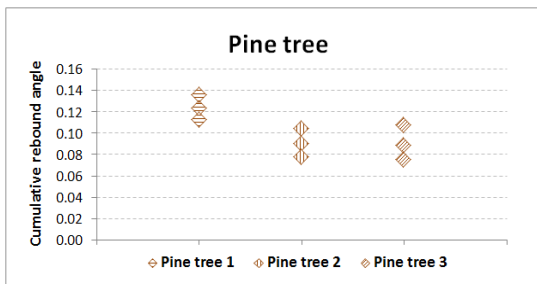
Fig. 3. Measurement of peak rebound angle (radian) (Continued)



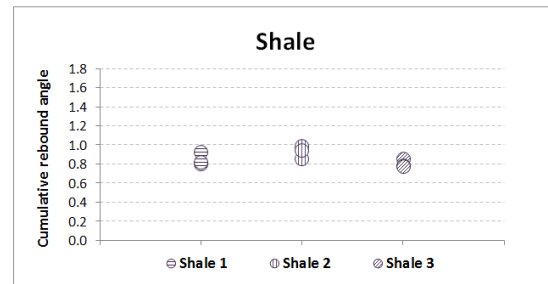
(a) Soil cement



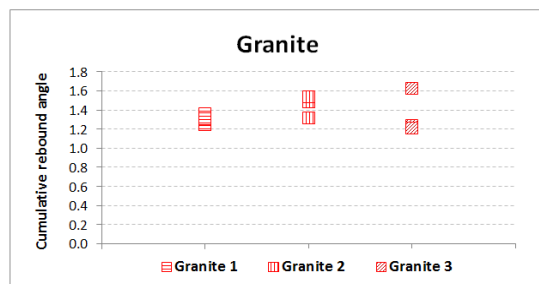
(b) Cement paste



(c) Pine tree



(d) Shale



(e) Granite

Fig. 4. Measurement of cumulative rebound angle (radian)

종류의 건설재료에 대해 3개의 시편을 각각 준비하였으며 각 시편당 3번의 타격을 가해서 3개의 최대 반발각(peak rebound angle) 및 누적 반발각(cumulative rebound angle)을 각각 산정하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 재료별로 측정된 시편당 3개의 반발각을 평균하여 서로 비교한 것이다. 비교결과 최대 및 누적 반발각에 상관없이 소일시멘트의 반발각이 가장 작게 나타났고 화강암의 반발각이 가장 크게 나타났다. 또한, 시멘트 페이스트보다 목재(소나무)의 반발각이 더 작게 발생한 것을 알 수 있으며, 세일에 대한 반발각은 시멘트 페이스트보다는 크지만 화강암보다는 더 작게 발생함을 알 수 있다.

그뿐만 아니라, Fig. 5 및 Fig. 6의 비교로부터 재료별 발생한 반발각의 특성은 최대 반발각이 아닌 누적 반발각에서 보다 뚜렷하게 나타난다는 매우 중요한 사실을 파악할 수 있다. 같은 재료에 대한 타격당 반발각이 조금씩 다른 이유는 재료의 국부적인 차이에 기인한 것으로 판단한다.

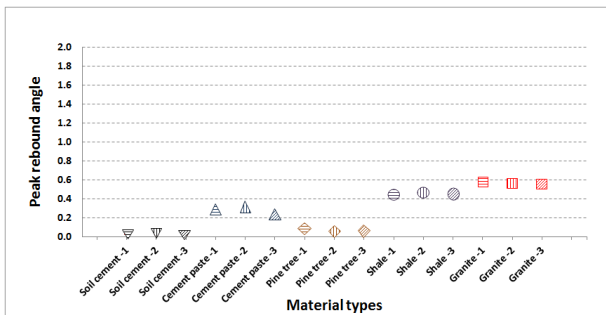


Fig. 5. Comparison of mean peak rebound angle (radian) for different materials

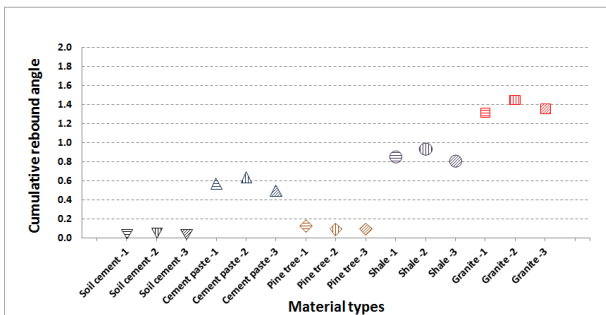


Fig. 6. Comparison of mean cumulative rebound angle (radian) for different materials

4. 재료별 일축압축강도 측정

본 연구에서 측정된 최대 및 누적 반발각의 크기와 재료의 압축강도와와의 관계를 파악하기 위하여 직접압축강도시험을 실시하고 재료별 압축강도를 측정하였다. Fig. 7은 일

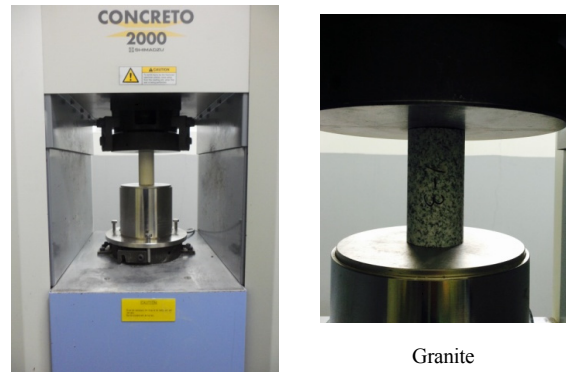


Fig. 7. Uniaxial direct compressive test of granite

Table 3. Measured compressive strength (MPa) of different materials

| Material | Compressive strength (MPa) | | |
|--------------|----------------------------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Soil cement | 3.1 | 4.0 | 3.7 |
| Cement paste | 33.9 | 32.3 | 29.0 |
| Pine tree | 48.7 | 46.6 | 44.7 |
| Shale | 60.6 | 60.4 | 70.5 |
| Granite | 116 | 107 | 110.5 |

축압축강도 시험장비 및 측정모습을 보여주고 있다. 일축압축강도 시험은 2000ton 용량의 만능시험기(UTM: Universal Test Machine)를 사용하였으며 하중재하방식(1MPa/sec)으로 압축강도를 측정하였다.

Table 3은 각 재료당 3개의 시편에 대해 측정된 일축압축강도 시험결과를 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 소일시멘트가 가장 작은 일축압축강도를 나타냈으며 화강암이 가장 큰 일축압축강도를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 시멘트 페이스트보다 pine tree의 압축강도가 더 크게 발생한 것을 알 수 있으며, 세일의 압축강도는 pine tree보다 더 크게 발생했다.

5. 재료별 타격 반발각과 일축압축강도의 비교

Fig. 8 및 Fig. 9는 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 고안된 타격장치를 이용하여 5가지 재료에 타격을 가해서 발생한 최대 반발각과 누적 반발각을 측정하고 이를 평균하여 일축압축강도와 서로 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시멘트에 바탕을 둔 건설재료나 암석과 같은 재료에 대해선 발생 반발각이 압축강도가 증가할수록 더 크게 나타남을 알 수 있다. 더 나아가 누적 반발각이 최대 반발각보다 압축강도와와의 관계가 더 선형적이고 연관성이 있는 것으로 나타났다.

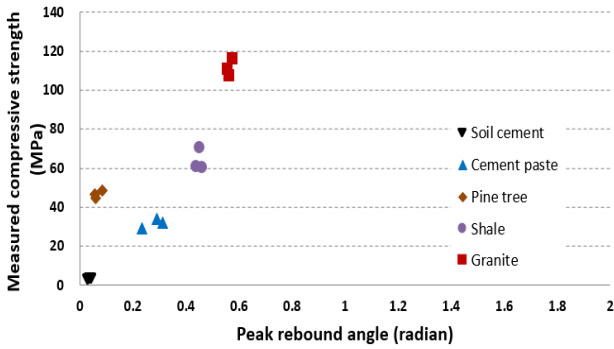


Fig. 8. Comparison between mean peak rebound angle and measured compressive strength

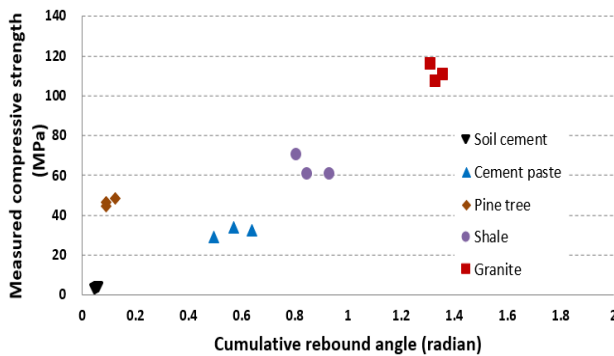


Fig. 9. Comparison between mean cumulative rebound angle and measured compressive strength

하지만 목재의 일축압축강도가 시멘트 페이스트보다 더 크게 측정되었음에도 불구하고 타격 반발각은 시멘트 페이스트가 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 목재와 같은 인성이 큰 건설재료에 대해선 반발정도가 압축강도를 산정하는 적절한 인자가 될 수 없다는 것을 파악할 수 있었다.

이러한 결과로부터 본 연구에서 수행한 시험방법을 포함하여 재료의 비파괴 강도측정을 위해서 재료 반발정도에 기본을 둔 Non-destructive testing 방법들(슈미트해머 시험법 등)을 인성이 큰 재료들에 적용하는 것은 잘못된 결과를 초래할 수도 있다는 것을 알았다. 따라서 이와 같은 방법을 적용함에 있어서 문제점이 발생하지 않도록 재료의 적용범위 및 조건에 있어서 주의 깊은 접근이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 타격으로 인한 최고 또는 일회성 반발정도를 이용(슈미트해머 시험법 등)하는 시험법 보다는 본 연구에서 수행한 것과 같은 반복적 반발작용을 통한 에너지감쇄 영향을 고려할 수 있는 시험법이 압축강도 산정을 위해서 보다 적절한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 재료의 비파괴 강도측정을 위하여 다양한

재료를 타격함으로써 발생하는 반발정도를 조사하고 일축 압축강도 시험 결과와 비교함으로써 재료의 비파괴 강도측정 방법에 대한 적용성 및 문제점을 검토하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서는 재료를 타격하여 발생하는 반발특성을 조사하고 이를 재료의 비파괴 강도측정을 위한 하나의 방법으로서 가능성 검토하기 위하여 먼저 타격발생 장치를 고안하고 구축하였다. 이를 이용하여 회전 자유낙하에 의한 재료의 초기타격 및 반발작용에 의한 반복타격으로부터 발생한 최고 반발각 및 누적 반발각을 측정하고 이를 통해 재료의 강도특성을 파악하고자 하였다.
- (2) 콘크리트바닥 위에서 실시한 다양한 재료(soil cement, cement paste, pine tree, shale, and granite)에 대한 재료별 초기타격 및 반발타격으로부터 발생한 반발각의 크기를 측정하여 비교한 결과 재료별 발생한 최대 반발각 및 누적 반발각은 소일시멘트, 목재, 시멘트 페이스트, 세일, 화강암의 순으로 나타났다.
- (3) 실험에 사용된 다양한 재료(soil cement, cement paste, pine tree, shale, and granite)에 대한 일축압축강도를 직접 측정된 결과 재료별 일축압축강도는 뚜렷한 차이를 나타냈으며 그 크기는 소일시멘트, 시멘트 페이스트, 목재, 세일, 화강암의 순으로 나타나 목재를 제외한 재료에서의 최대 및 누적 반발각의 크기순과 동일한 결과를 나타냈다.
- (4) 재료별 측정된 최대 반발각 및 누적 반발각을 일축압축강도와 서로 비교한 결과, 누적 반발각이 최대 반발각보다 압축강도에 관한 재료별 특성을 보다 선형적이고 뚜렷하게 나타내어 향후 반발정도를 이용하는 재료의 비파괴 압축강도 시험에서는 최고 또는 일회성 반발정도를 이용(슈미트해머 시험법 등)하는 시험법보다는 반복적 반발작용을 통한 에너지감쇄 영향을 반영할 수 있는 시험법이 압축강도 산정을 위해서 보다 적절한 시험방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 목재의 일축압축강도가 시멘트 페이스트보다 더 크게 측정되었음에도 불구하고 타격 반발각은 시멘트 페이스트가 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 목재와 같은 인성이 큰 건설재료에 대해선 반발정도가 압축강도를 산정하는 적절한 인자가 될 수 없다는 것을 파악할 수 있었다. 이러한 결과로부터 재료의 비파괴 강도측정을 위해서 재료 반발정도에 기본을 둔 Not-destructive testing 방법들(슈미트해머 시험법 등)을 인성이 큰 재료들에 적용하는 것은 잘못된 결과를 초래할 수도 있다는 것을 파악하였다.

(6) 본 연구는 누적 반발각을 통해서 건설재료의 압축강도를 비파괴적으로 산정할 수 있는 가능성을 파악하고자 하였으며 재료별 누적반발각과 압축강도를 관계시키는 압축강도 산정식의 제안은 향후 재료 및 시험조건 등의 다양한 경우를 고려한 많은 실험을 통한 자료축적 이후의 과제로 남겨두고자 한다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 결과가 압축강도 산정을 위한 비파괴 강도측정 분야에 새로운 정보를 제공하고 일익을 담당할 수 있기를 기대한다.

References

1. ASTM C805-13 (2013), Standard test method for rebound number of hardened concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
2. FHWA (1997), Guide to nondestructive testing of concrete, Federal Highway Administration, FHWA-SA-97-105 written by G.I. Crawford, pp. 1~58.
3. IAEA (2002), Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency, Training course series No. 17, Vienna, Austria, pp. 1~231.
4. Naik, T.R. and Malhotra, V.M. (1991), The ultra-sonic pulse velocity method, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, pp. 169~202.
5. Patil, N.R. and Patil, J.R. (2008), Non-destructive testing (NDT) advantages and limitations, SRES College of Engineering, Kopergaon, Maharashtra - 423 603, pp. 71~78.