무근콘크리트 해체시 무소음화학팽창제의 최소요구팽창압 예측

김 경 진¹ · 조 황 기² · 손 동 우² · 구 재 현³ · 이 재 하^{4*}

¹한국해양대학교 토목환경공학과, ²한국해양대학교 기계공학과, ³(주)한양이엠씨, ⁴한국해양대학교 건설공학과

Prediction of the Minimum Required Pressure of Soundless Chemical Demolition Agents for Plain Concrete Demolition

Kyeongjin Kim¹, Hwangki Cho², Dongwoo Sohn², Jaehyun Koo³ and Jaeha Lee^{4*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

³Hanyang EMC, Busan, 48094, Korea

⁴Department of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

Abstract

In construction site, conventional methods such as jackhammer or explosive methods(dynamite) have been often used for the demolition of structures. Use of those methods are more carefully treated in environmentally and historically sensitive area. For those reasons, use of Soundless Chemical Demolition Agent(SCDA) is getting the spotlight. The SCDA is a powder which has expansive strength when it is mixed with water. In these Characteristics, SCDA can destroy the concrete or rock as it is poured into boreholes of the concrete or rock structures. However, there is no industrial standard for the use of SCDA effectively yet. In this study, experimental study to measure the expansive pressure was conducted depending on various boundary conditions such as waterproof, length of the steel pipe, submerged of steel pipe. Furthermore, computational analysis using damage plasticity model to predict the minimum required pressure of the SCDA for the concrete demolition depending on spacing between holes(k-factor) and compressive strength of the concrete was conducted. Obtained results indicates that water heat dissipation with submerged steel pipe shows the stable pressure for measuring the SCDA and hole distance(k-factor) is the most important factor for crack initiation of concrete.

Keywords : concrete demolition, crack propagation, SCDA, minimum required pressure

1. 서 론

건설현장에서는 콘크리트 구조물이나 암반해체를 위해 잭해머를 이용한 공법과 다이너마이트를 이용한 공법이 빈번하게 사용되고 있다. 그러나 이러한 기존의 공법들은 경제성과 시공성에서 유리하여 가장 많이 사용되는 방법이라 할 수 있으나 도심지나 문화재가 인접한 지역 등에서는 소음, 진동, 안전성 등으로 인해 환경 문제나 인근 주거지의 민원 등 많은 제약이 따르며 이는 건설비용의 상승으로 이어지기도 한다. 이러한 제한적인 조건에서 소음 및 진동을 줄이고 안전성을 개선할 수 있는 무소음화학팽창제(soundless chemical demolition agents, SCDA)를 이용한 해체방법이 있다. SCDA는 Fig. 1과

같이 포틀랜드 시멘트와 같은 분말형태로 수화반응시 150℃ 이상의 고온과 함께 결정체를 생성하여 보통 초기 배합부피의 약 3배로 부피가 증가하게 된다. 따라서 구속된 조건에 SCDA를 주입할 경우 높은 팽창압을 발생시킨다. 이러한 특성을 이용하여 해체가 필요한 암반이나 콘크리트 구조물에 천공을 하고 물과 배합된 SCDA를 주입 후 균열을 유도함으로써 구조물을 해체한다. SCDA를 활용한 콘크리트 구조물 및 암반 해체 공법은 1970년대 초반부터 활용되었으나 현재까지 활용에 대한 표준이 정립되지 못하고 있다. 또한 국내에서는 더 이상 SCDA 제품이 생산되지 않아 그 활용이 미미한 수준이다. 해외(중국, 일본, 미국 등)에서는 SCDA의 수급 및 활용이 용이하여 다양

* Corresponding author:

Tel: +82-51-410-4466; E-mail: jaeha@kmou.ac.kr

Received June 29 2018; Revised August 27 2018;

Accepted September 3 2018

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 분야에 활용되고 있으며 관련연구도 활발하다. Parsakho와 Lotfalian(2009)의 연구에서는 다양한 해체공법의 경제성을 비교하였는데 환경영향과 안전성 등을 종합적으로 고려할 경우 SCDA가 해체방법으로 합리적인 선택임을 보였다. Parsakhoo와 Lotfalian(2009)는 각 공법에 대한 활용성을 평가하여 Fig. 2와 같이 나타냈다. 전반적으로 소음, 진동, 안전성, 비산물 등에서 모두 높은 평가를 받는 구조물 해체방법이 SCDA임을 확인할 수 있다. SCDA는 구조물 해체에 가장 널리 사용되는 다이내마이트와 잭 해머를 사용한 공법과 비교하여 소음과 진동성이 발생하지 않아 주거 밀집지역이나 문화재가 많은 지역 등에서도 사용이 가능하다. 이러한 활용도에도 불구하고 사용을 위한 규격서나 가이드라인에 필요한 해석적 연구는 지금까지 미미한 편이다. 따라서 대부분 SCDA의 활용을 위해서는 제조사의 설명서를 참조하여야 한다. Gambatese(2003)와 Huynh와 Laefer(2009)의 연구와 같이 재료적 특성에 대한 연구가 간헐적으로 진행되었으나 넓은 범위에 다양한 연구결과를 토대로 구체적인 가이드라인정립이 필요하다고 볼 수 있다. 이를 위해서는 SCDA를 주입할 천공홀의 간격, 수, 대상 구조물의 강도(콘크리트 압축강도 등) 및 경계조건이 주요 변수일 것이며, 이러한 조건에 따라 균열 형성에 필요한 SCDA의 팽창압은 상이할 것이다.

Fig. 1 SCDA powder

따라서 이 연구에서는 실내실험을 통해 다양한 조건에 따른 SCDA의 팽창압을 비교하여 팽창압 발현을 위한 효과적인 조건을 제시하였다. 이후 콘크리트의 손상을 모사할 수 있는 Damage Plasticity(Lee and Fenves, 1998) 재료모델을 활용하여 천공홀 간격, 천공홀 수, 콘크리트 압축강도 등에 대한 변수해석을 수행하고 콘크리트 해체 시 필요한 팽창압을 비교하였다. 이 연구에서는 구조물 해체 시 필요한 최소한의 팽창압을 최소요구팽창압으로 정의하였으며 Fig. 3과 같이 균열이 발생하는 시점(팽창압이 급격하게 감소하기 직전 최대값)에서 발

생한 압으로 정의하였다.

Fig. 2 Availability of demolition method (Parsakhoo and Lotfalian, 2009)

Fig. 3 Minimum required pressure of SCDA

2. 팽창압 측정 실험조건

이 장에서는 실내 실험에 의한 SCDA의 팽창압 측정방법을 기술하고 다양한 조건에서 실내실험을 수행하여 팽창압 측정에 필요한 적정 실험조건과 SCDA의 현장적용 시 팽창압을 적정하게 발현하기 위한 조건에 대해 기술하였다.

2.1 SCDA 팽창압 측정방법

수화열 발산이 용이하지 못하여 SCDA 내부 온도가 상승하거나, 이와는 반대로 외기온도가 너무 낮아 수화반응이 느릴 경우 모두 적절한 팽창압 발현은 어렵다. 따라서 이 연구에서는 수화열 발산을 위한 수분 활용 등의 조건에 따른 SCDA의 팽창압 변화를 관찰하였다. SCDA의 팽창압 측정을 위해 Harada 등(1987)의 연구에서는 세 가지의 방법을 제안하였다. 먼저 배합된 SCDA 내부에 직접측정장치를 설치하여 측정하는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법은 측정장치의 위치에 따라 그 편차가 클 것으로 예상되며 고온, 고압에 의한 장비 손상 우려도 있다. 고가의 측정장치를 사용하지 않고도 측정이 가능한 방법이 강관을 활용하는 것이다. 강관 활용방법에는 강관을 배합된 SCDA에 삽입하여 측정하는 내관법과 강관 안에 배합된 SCDA를 주입하여 팽창압을 측정하는 외관법이 있다. 이 연구에서는 재료를 많이 소진하지 않으면서 비교적 합리적인

측정이 가능한 외관법을 사용하였다. 외관법은 내부에 주입된 SCDA가 팽창압을 발생시키면서 강관 외경에 발생하는 변형률을 변형률게이지로 측정하여 팽창압을 유추하는 방법이다 (Fig. 4).

Fig. 4 Prediction of SCDA using steel pipe

강관에 발생한 변형률을 이용하여 팽창압을 유추하는 식은 Hinze와 Brown(1994)의 연구에서 제시한 식을 사용하였으며 다음과 같다.

$$p_i = \frac{E\epsilon(r_o^2 - r_i^2)}{2r_i^2} \quad (1)$$

r_i : 강관의 내경

r_o : 강관의 외경

E : 강관의 탄성계수

ϵ : 측정된 변형률

2.2 외부 조건에 따른 SCDA 팽창압 측정

강관을 이용한 SCDA의 팽창압 측정에서 강관의 길이가 길어진다면 개방된 강관 끝단의 경계조건에 의한 영향력이 미미하여 비교적 정확한 팽창압을 측정할 수 있으나 적은 양의 재료를 사용하는 것이 효율성이 높으며 다루기 쉬운 실내실험에 적합하다. 따라서 실내실험에 적합한 강관의 길이를 선정하기 위한 실험을 수행하였다. 강관의 직경은 구조물 천공에 많이 활용되는 34.5mm이며 길이는 30cm와 15cm로 하여 SCDA를 강관 내부에 주입하고 발생하는 팽창압을 비교·분석하였다.

실험결과를 Fig. 5에 나타냈으며 강관의 길이가 짧은 경우에도 오히려 30cm에 상응하는 팽창압을 발생시키는 것으로 보아 강관 길이가 15cm와 30cm 모두 길이에 의한 팽창압 차이는 없는 것으로 판단하였다. 따라서 효율적인 실험을 위해 강관의 길이를 15cm로 하여도 개방된 끝단에 의한 경계조건이 실험결과에 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

Fig. 5 Pressure of SCDA depending on length of steel pipe

두 번째 외부조건으로 열발산 여부에 따른 팽창압의 차이를 확인하기 위한 실험을 수행하고 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 원활한 열발산을 위해 강관 전체길이의 1/2을 수중에 관입하고 수중에 관입된 끝단을 방수처리 하여 실험을 수행하고 외기에서 수행한 실험결과와 비교하였다.

열발산이 원활하지 않은 경우(외기) SCDA 내부에 높은 온도가 발생하여 수분을 증발시키며 급격한 수화반응에 의한 팽창압의 증가와 수증기에 의한 압이 더해져 안정적으로 팽창압을 발생시키지 못한 채 SCDA가 개방된 강관 상단으로 분출되는 현상이 발생하였다. SCDA 분출 직전까지는 순간적으로 높은 팽창압은 발생시켰으나 지속적으로 팽창압을 발생시키지 못하는 것으로 나타났다. 팽창압을 순간적으로 발생시키는 것보다 구조물에 지속적으로 발생시키는 것이 구조물 해체에 유리하며 분출로 인해 SCDA가 유실된다면 팽창압 또한 감소하게 되므로 안정적인 팽창압 발생을 위해서는 SCDA의 화학반응에 의한 수화열 발산이 중요하다. SCDA가 실제 천공홀에 주입될 경우 구조물의 체적이 얇은 강관보다 크며 외기에서보다 열발산이 효과적이다. 공기와 콘크리트의 열전도율은 0.025 W/mk와 1.6W/mk이며 콘크리트 해체 대상체의 체적이 강관보다 훨씬 클 것이다. 따라서 외기상황에 따른 적절한 타입의 SCDA를 선택했을 경우 구조물에서는 수중관입이 필요가 없으며 해당 외기조건에 따른 적절한 SCDA를 선정하는 것만으로도 적절한 수화반응을 유도할 수 있다. 다만 강관을 이용한

Fig. 6 Time-pressure graph depending on submerge

Fig. 7 Pressure of SCDA depending on waterproof

실험을 수행할 경우 외기에 노출된 강관 내부 SCDA의 수화열을 적절하게 발산시킬 필요가 있다.

Fig. 7은 SCDA 배합 후 외부에서 유입되는 수분의 차단 유무에 따른 실험결과를 나타낸다. 외부 수분차단 방법은 수중에 넣은 강관의 한쪽 끝단을 막아 외부 수분을 차단하고 다른 강관은 끝단을 막지 않아 수분이 직접적으로 화학반응에 관여하도록 하였다. 배합 후 15시간 경과 시 외부 수분을 차단한 SCDA는 팽창압을 20MPa 발생시켰으나 유입을 허용한 SCDA는 팽창압이 10MPa 발생하여 팽창압이 2배 이상 차이가 났다. 이는 외부 수분 유입에 대해 SCDA가 희석되어 그 효과가 반감된 것으로 수중에 활용하기 위해서는 수중불분리제를 혼입한 형태의 SCDA의 개발이 필요할 것으로 보인다. 수중 구조물의 해체에도 유용히 활용되기 위해서는 이처럼 수중불 분리제형 SCDA의 배합 및 성능평가 연구도 필요한 실정이다.

해당 실험의 14시간~16시간에 팽창압의 일시적인 상승 및 감소가 확인되었으며 이러한 일시적인 상승과 감소는 외기 온도의 영향으로 확인되어 앞에서 기술한 바와 같이 온도에 매우 민감하여 외관법으로 팽창압 측정 시 온도변화에 대한 보정이 필요할 것으로 보인다.

실험결과를 종합하면 SCDA를 이용한 구조물 해체 시 효과적으로 팽창압을 발현하기 위해서는 열발산을 원활히 하고 수중 구조물 해체시에는 수중불분리제의 활용과 함께 외부 수분 유입을 차단하는 것이 필요하며 강관을 이용한 실험조건에서는 수분 등을 통한 수화열의 발산조건을 고려할 필요가 있다.

3. 수치해석을 통한 최소요구팽창압 예측모델 개발

본 장에서는 SCDA를 이용한 콘크리트 구조물 해체 시 필요한 최소요구팽창압 예측을 위한 해석모델과 그 결과에 대해서 기술하였다. 개발된 해석모델을 이용하여 홀 간 간격과 천공홀 수 그리고 콘크리트 압축강도에 따른 변수해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

3.1 해석모델 개발

수치해석 모델은 상용해석 프로그램 Abaqus/Explicit를 이용하여 개발하였다. 재료모델에는 콘크리트의 손상해석이 가능하고 이에 따른 균열 진전 및 검토가 가능한 Damaged Plasticity Model(Lee and Fenves, 1998)을 이용하였다. 균열진전을 예측하기 위해 중요한 응력-균열폭 관계는 Fig. 8과 같이 fib Model Code 2010을 따라 예측하였다. fib Model Code 2010에서 콘크리트의 인장강도 및 파괴에너지 예측식은 다음과 같다.

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot (f_{ck})^{2/3} \quad (2)$$

$$G_F = 73 f_{ctm}^{0.18} \quad (3)$$

f_{ctm} : 콘크리트 인장강도(MPa)

f_{ck} : 콘크리트 설계 압축강도(MPa)

f_{cm} : 평균압축강도(MPa)

G_F : 콘크리트 파괴에너지(N/m)

파괴에너지 예측식에 대한 상세한 내용은 fib Model Code 2010에 나타나 있다.

해석모델은 2차원 평면 변형률 요소(CPE4R)를 사용하였으며 균열 발생 전까지 구속된 조건에서 SCDA의 팽창을 모사하기 위해서는 천공홀 내부 SCDA 파트에 온도하중을 적용하여 요소의 팽창을 모사하였다. SCDA와 콘크리트 간의 팽창압 전달은 tie 조건을 사용하지 않고 접촉조건(hard contact)을 적용하였다. 모델검증을 위해서는 Fig. 9와 같은 제원으로 해석모델을 개발하여 균열진전을 확인하고 동일한 제원으로 실제 실험을 수행하여 해석결과와 비교·분석하였다. 해석모델에서 천공홀은 규칙적인 크기의 요소를 사용하기 위해 동일한 간격으로 구조물 전체에 모델링하였으며, SCDA의 팽창은 SCDA가 주입된 천공홀에만 적용하였다. 이러한 경우 SCDA가 주입되지 않은 인접 천공홀이 균열진전에 영향을 미칠 수도

Fig. 8 Stress-crack opening curves depending on concrete compressive strength

Fig. 9 Specimen geometry and hole locations for model verification

Fig. 11 Model for parametric study

Fig. 10 Model verification

있으나 Cho 등(2017)의 연구결과 본 시험체에서는 SCDA가 주입되지 않은 인접한 천공홀은 균열진전에 영향이 없음을 보였으며 유사한 시험체의 본 해석에서도 영향이 없음을 확인하였다. 다만 천공홀 간격과 천공홀 직경이 매우 작은 경우 인접한 천공홀의 영향이 커질 수 있으며 이러한 내용은 Gambatese (2003)에서 확인할 수 있다. 모델은 해석 효율성 향상을 위해 Symmetry로 고려하였으며 천공홀의 크기는 현장에서 사용 가능한 드릴코어의 크기를 고려하여 38mm로 동일하게 적용하였다.

해석결과와 실험결과에서 발생한 균열 패턴을 비교하여 Fig. 10에 나타냈다. 해석에서 발생한 균열형상이 실험 결과와 매우 유사하게 나타나 개발된 해석모델은 SCDA에 의한 콘크리트의 균열진전 및 손상을 유사하게 예측할 것으로 보인다.

3.2 천공홀 배치 변수 해석

개발된 해석모델을 이용하여 콘크리트 구조물을 효과적으로 해체하기 위한 변수해석을 수행하였다. 콘크리트 구조물을 해체를 위해서는 먼저 일차적으로 균열 생성이 필요하다.

Table 1 Hole Parameters and Results

Number of holes	Concrete compressive strength (MPa)	k-factor (1=38mm)	Minimum required pressure (MPa)
2	20	3	10.8
		6	11.4
		9	16.1
	30	3	13.7
		6	14.2
		9	20.2
	40	3	15.8
		6	16.4
		9	23.7
3	20	3	5.7
		6	12.7
		9	15.6
	30	3	7
		6	13.8
		9	19.5
	40	3	8
		6	16.1
		9	22.8
4	20	3	5.9
		6	10.6
		9	16.3
	30	3	7.2
		6	13.3
		9	20.7
	40	3	7.9
		6	15.5
		9	24.5

Sohn 등(2017)의 연구에서는 Fig. 11과 같이 자유단으로부터 가로 균열과 세로 균열을 함께 유도하여 콘크리트 블록의

해체를 유도하였으나 이 연구에서는 가로균열만을 고려하였다. 세로균열에 대한 해석이 가로균열에 대한 해석보다 자유단과의 거리가 가까워 자유단의 영향을 많이 받을 것이므로 가로균열의 최소요구팽창압이 세로균열의 최소요구팽창압보다 더 높을 것이다. 따라서 가로균열의 최소요구팽창압을 세로균열에 적용 하도록 하면 비교적 간단한 설계식을 이용한 콘크리트 해체 설계가 가능할 것이다. 이 연구에서 수행한 변수는 Table 1에 나타냈다.

천공홀의 수와 콘크리트 압축강도 그리고 천공홀의 간격(k-factor)을 주요변수로 선정하였다. 여기서 천공홀 간의 간격을 의미하는 k-factor는 홀 직경(38mm)을 1로 하여 비례적으로 나타낸 값이다. 경계조건은 Fig. 11에 나타난 것과 같이 3면을 무한한 것으로 가정하고 변위에 대하여 고정하였다. 구조물의 크기는 Nam 등(2015)의 연구에서 천공홀과 최외곽 까지의 거리가 10m 이상일 경우 경계조건에 대한 영향이 없음을 보였으며, 이 연구에서도 10m×20m 크기의 경계를 구축한 조건이 반무한체의 효과를 나타내는 것으로 확인되었다.

3.2 해석결과

해석 결과를 Fig. 12~15 및 Table 1에 나타냈다. 균열은 Fig. 12와 같이 자유단으로부터 가장 가까운 천공홀에서 균열이 먼저 발생하고 내측으로 진전되었다. Fig. 16에는 압축강도 증가에 따른 최소요구팽창압 증가(%)를 천공홀 수에 따라 정리하여 종합적으로 나타냈다.

천공홀이 2개인 경우의 해석결과를 살펴보면 예상한 바와 같이 콘크리트의 압축강도와 k-factor가 증가함에 따라 균열 생성을 위한 최소요구팽창압이 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 13). 압축강도가 20MPa에서 30MPa로 증가하는 동안 최소요구팽창압이 평균 25.3% 증가하였으며 30MPa에서 40MPa로 증가하는 동안에는 최소요구팽창압이 평균 16.1% 증가하고 압축강도가 10MPa 증가할 경우 최소요구팽창압이 평균적으로 20.7% 증가함을 보였다. k-factor의 증가에 따른 최소요구팽창압의 증가(%)를 확인하면, k-factor 3과 k-factor 6은 홀의 수가 2개일 경우 최소요구팽창압에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 천공홀이 2개인 경우 인접 홀에서 발생하는 팽창압의 상호작용이 상대적으로 작았기 때문으로 판단된다.

천공홀이 3개인 경우 콘크리트 압축강도와 k-factor가 증가함에 따라 비교적 선형적으로 최소요구팽창압이 증가함을 볼 수 있다(Fig. 14). 콘크리트 압축강도가 20MPa에서 30MPa로 증가하는 동안에 최소요구팽창압은 평균 18.8% 증가하였으며 30MPa에서 40MPa로 증가하는 동안에는 최소요구팽창압이 평균 16.0% 증가하여 압축강도가 10MPa 증가할

Fig. 12 Crack propagation

Fig. 13 Minimum required pressure(two holes)

경우 최소요구팽창압이 평균 17.4% 증가하였다(Fig. 14). k-factor 증가에 따른 최소요구팽창압의 변화를 확인하면 k-factor가 3에서 6으로 100% 증가하는 동안 최소요구팽창압은 평균 105.8% 증가하였으며 k-factor 3에서 k-factor 9로 200% 증가하는 동안 평균 179.7% 증가하여 천공홀 3개를

Fig. 14 Minimum required pressure(three holes)

Fig. 15 Minimum required pressure(four holes)

이용하여 균열을 발생시킬 경우 k-factor 9가 k-factor 6보다 천공홀 간격의 증가량 대비 최소요구팽창압 증가량을 고려할 때 더욱 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 16). 높은 k-factor는 천공홀간 간격이 넓다는 뜻이며, 이는 재료의 효과적 활용에 기여한다. 다만 이를 현장에 적용시 선정된 SCDA의 최대 팽창압 성능이 최소요구팽창압을 초과하는지 확인하여 외기조건에서 이를 초과하는 성능을 지닌 SCDA를 선정하여야 한다.

천공홀이 4개인 해석결과(Fig. 15)를 살펴보면 콘크리트 압축강도가 20MPa에서 30MPa로 증가하는 동안에 최소요구 팽창압은 평균 24.8% 증가하였고 30MPa에서 40MPa로 증가하는 동안 평균 14.9% 증가하여 압축강도가 10MPa 증가할 경우 최소요구팽창압이 평균적으로 19.9% 증가하였다(Fig. 16). 이는 천공홀 3개의 해석결과보다 다소 높게 나타났다으며 천공홀 2개와 유사한 결과이다. k-factor 3에서 6으로 증가 시 최소요구팽창압은 평균 87.6% 증가하였으며 k-factor 3에서 9로 증가할 경우 최소요구팽창압이 평균 192.9% 증가하여 k-factor 6이 더욱 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 16). 천공홀 3개인 경우와 다른 경향성을 보인 이유는 홀의 수가 4개이고 k-factor가 9인 경우 천공홀의 전체 배열길이가 1,368 mm로 구조물의 크기(10,000mm) 대비 13.7%에 해당하여 구속된 경계조건이 영향을 주었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 16에는 천공홀 수에 따른 최소요구팽창압 증가율을 정리하여 나타내었다. 압축강도의 증가에 따른 최소요구팽창

(a) Increased pressure depending on concrete compressive strength

(b) Increased pressure depending on k-factor

Fig. 16 Increased pressure

압의 증가율은 천공홀 수와 상관없이 유사하게 증가하였다. 그러나 k-factor의 증가에는 최소요구팽창압이 매우 민감한 것으로 나타났다. 천공홀 2개의 경우 최소요구팽창압은 k-factor가 증가함에도 천공홀 3개와 4개인 경우와 비교하여 25% 수준으로 나타나 k-factor의 변화에 상대적으로 민감도가 낮은 것으로 나타났다. 이는 효율이 떨어짐을 보인 것이다. 동일한 조건(압축강도, k-factor)에서 천공홀이 3개 이상일 경우 최소요구팽창압이 유사한 비율로 증가함이 확인되어 천공홀 수가 3개 이상에서는 천공홀 수에 따른 최소요구팽창압 변화는 크지 않을 것으로 보인다. 천공홀 수가 증가함에 따라 균열의 길이 또한 증가하므로 3개 이상의 천공홀을 이용하여 구조물 해체에 적절한 크기로 설계할 수 있다.

이 연구의 해석결과를 활용하여 구조물의 강도와 SCDA의 최대팽창압 성능 등을 고려한 적정 홀의 수와 간격을 구성할 수 있을 것이며 자유단으로부터 콘크리트의 해체를 효과적으로 유도할 수 있을 것으로 예상된다. 다만 이 연구에서는 천공홀의 수가 4개까지로 한정되었으며 홀의 크기가 38mm, 1면 자유단에 3면이 고정된(반무한) 경계조건에서 가로균열에 대한 해석 결과이며 홀의 크기, 자유단과 자유단에 가까운 홀의 간격, 세로균열 등에 대한 추가적인 연구와 현장 적용성 등의 연구가 추가로 수행되어야 한다.

4. 결 론

이 연구에서는 실내실험을 통한 SCDA의 팽창 특성을 확인하여 적절한 실험조건을 제시하고 효과적인 콘크리트 구조물 해체를 위한 변수해석을 수행하였으며 이에 대한 결론을 다음과 같이 제시하였다.

- 외관법을 이용하여 SCDA의 팽창압 측정 시 강관의 길이가 15cm 이상일 경우 SCDA의 팽창압 발현에 영향이 없는 것으로 확인되었다.
- 외관법을 이용하여 SCDA의 팽창압을 측정할 경우 수화열을 적절하게 발산시켜 갑작스런 온도증가에 따른 수증기의 영향 및 급격한 수화반응에 의한 순간적인 팽창압 증가를 완화시켜야 한다.
- SCDA를 활용한 구조물 해체에서 손상모델(Lee and Fenves 1985)을 고려한 최소요구팽창압 예측 해석모델을 개발하고 해석을 수행하였으며, 실험과 균열패턴을 비교한 결과 개발된 해석모델은 콘크리트의 균열패턴을 유사하게 예측하는 것으로 확인되었다.
- 구조물 해체를 위한 최소요구팽창압은 콘크리트 압축강도 증가 보다 k-factor(홀 간 거리)에 더욱 민감한 것으로 나타났다.
- 천공홀이 3개 이상인 경우 천공홀 수의 증가에도 큰 폭의 최소요구팽창압의 변화는 없는 것으로 확인되었다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(정부기술통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2018R1A1A1A05018602).

References

Cho, H.K., Nam, Y.M., Kim, K.J., Lee, J.H., Sohn, D.W. (2017) Effective Arrangement of Non-explosive Demolition Agents and Empty Holes for Improving Fragmentation of Square Concrete

Structures, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(2), pp.145~151.

Gambatese, J.A. (2003) Controlled Concrete Demolition using Expansive Cracking Agents, *J. Constr. Eng. & Manag.*, 129(1), pp.98~104.

Harada, T., Idemitsu, T., Watanabe, A., Takayama, S. (1987) The Design Method For The Demolition of Concrete with Expansive Demolition Agents, *SEM-RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock*, Houston, Texas, U.S.A.

Hinze, J., Brown, J. (1994) Properties of Soundless Chemical Demolition Agents, *ASCE J. Constr. Eng. & Manag.*, 120(4), pp.816~827.

Huynh, M.P., Laefer, D.F. (2009) Expansive Cements and Soundless Chemical Demolition Agents : State of Technology Review, *11th Conference on Science and Technology*, Ho Chi Minh City, Vietnam.

Lee, J.H., Fenves, F.L. (1998) Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *J. Eng. Mech.*, 124(8), pp.892~900.

Model Code 2010, First Complete Draft, Vol. 1. Fib Bulletin, (55).

Nam, Y.M., Kim, K.J., Park, S.H., Sohn, D.W., Lee, J.H. (2015) Arrangement of Agent Holes for Enhancing Crack Propagation in Structure Demolition Process using Soundless Chemical Demolition Agents, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(6), pp.683~690.

Parsakhoo, A., Lotfalian, M. (2009) Demolition Agent Selection for Rock Breaking in Mountain Region of Hyrcanian Forests, *Res. J. Environ. Sci.*, 3(3), pp.384~391.

Sohn, D.W., Lee, J.H., Kim, K.J., Cho, H.K., Kim, Y.H., Park, S.M. (2017) Minimum Required Pressure for Initiation of Crack in Concrete Structures depending on Hole Spacings using Soundless Chemical Demolition Agent, *Korea Inst. Struct. Maint. & Insp. Fall Conf.*, pp.115~116.

요 지

도심지나 문화재가 인접한 지역 등의 소음, 진동 등 기존 발파해체 공법이 제한적인 조건에서 사용할 수 있는 구조물 해체 공법으로 무소음화학팽창제(soundless chemical demolition agent, SCDA)를 이용한 공법이 있다. 그러나 SCDA의 사용에 대한 기준이나 가이드라인에 참고될 만한 연구는 미미한 실정이다. 이 연구에서는 실내실험을 수행하여 강관의 길이, 외부수분차단, 수화열 발산 등의 다양한 조건에 따른 SCDA의 팽창압 발현 특성을 확인하였다. 또한 SCDA의 최소요구팽창압 예측을 위한 해석모델(자유단 1면, 고정단 3면의 직사각형 모델)을 개발하고 주요변수해석(홀 간 거리, 콘크리트 압축강도)을 수행하였다. 이 연구의 해석결과를 활용하여 자유단으로부터 콘크리트 구조물의 박락을 효과적으로 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 콘크리트 해체, 균열진전, 무소음화학팽창제, 최소요구팽창압