

원통형 콘크리트 사일로의 발파해체 전도공법 적용을 위한 사전취약화 구조해석

최 훈¹⁾, 김효진²⁾, 박 훈³⁾, 윤순종⁴⁾*

Structural Analysis of the Pre-weakening of a Cylindrical Concrete Silo for the Application of Overturning Explosive Demolition Method

Hoon Choi, Hyo-Jin Kim, Hoon Park and Soon-Jong Yoon

Abstract Recently, several cases of destruction of old cylindrical silos by explosive demolition method have been reported. This study deals with the subject concerning the pre-weakening of a cylindrical concrete silo for the application of overturning explosive demolition method. In the past, the pre-weakening operation of structure in explosive demolition has been done by use of some empirical methods. These empirical approaches, however, have possibilities of unexpected accidents. In order to provide a guideline for the pre-weakening of cylindrical silos and similar structures, this paper shows the result of a case study, in which the instability of a silo due to pre-weakening is investigated by a numerical structural analysis before actually conducting pre-weakening and demolition operations.

Key words Pre-weakening, Cylindrical concrete silo, Explosive demolition, Overturning method, Structural safety

초 록 최근 노후화와 기능적 요건을 만족시키지 못하여 사용이 불가능한 원통형 사일로 구조물의 해체 수요가 증가하고 있다. 이 연구는 원통형 콘크리트 사일로 구조물의 전도공법에 의한 발파해체를 위한 사전취약화와 관련된 연구이다. 기존의 발파해체를 위한 사전취약화 작업의 경우 시공기준의 부재로 인해 경험에 의해 시공되어 왔으며, 이러한 경험적 시공은 시공도중 구조물이 붕괴 또는 뜻하지 않는 기타 사고로 이어질 수 있는 위험성을 내포하고 있다. 따라서 이 연구에서는 이러한 현실적 상황을 고려 원통형 콘크리트 사일로 구조물의 사전취약화 설계의 과정을 소개하여 원통형 콘크리트 사일로 구조물 및 이와 유사한 형태의 구조물의 사전취약화와 관련된 설계지침을 마련하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 이를 위해 국내에 있는 원통형 콘크리트 사일로 구조물을 대상으로 시공계획 순서대로 사전취약화를 실시하였으며, 사전취약화에 따른 유한요소해석 및 구조해석을 각각 실시하여 사전취약화에 따른 구조물의 안전성 및 공법의 적용가능성을 검토하였다.

핵심어 사전취약, 원통형 콘크리트 사일로, 발파해체, 전도공법, 구조안전성

1. 서 론

사전취약화는 구조물의 일부를 기계적으로 절단하

거나 발파하여 작업공간을 확보하고 구조물 전체의 발파해체시 붕괴거동을 유도하기 위해 임의로 취약화하는 것을 말한다. 구조물이 노후화됨에 따라 구조물의 해체공사가 증대되고 있는 반면 아직까지 국내에는 사전취약화 작업에 대한 설계기준 없이 현장경험에 의존해 해체공사가 수행되고 있어 이에 따른 안전문제가 대두되고 있는 실정이다.

콘크리트 사일리와 유사한 원통형 구조물은 원통형 구조가 일체로 설계 시공되어 일반적으로 전도공법을

¹⁾ 홍익대학교 박사과정

²⁾ 한국토지주택공사 주택도시연구원 연구위원

³⁾ 전북대학교 겸임교수

⁴⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수

* 교신저자 : sjyoon@hongik.ac.kr

접수일 : 2009년 11월 30일

심사 완료일 : 2009년 12월 11일

게재 승인일 : 2009년 12월 22일

적용하여 발파해체한다. 그러나 이 연구에서 고려하고 있는 콘크리트 사일로 구조물의 경우 일반적인 굴뚝구조물과 비교하여 구조물의 높이-지름 비가 크지 않고(박 훈, 2008a) Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 콘크리트 사일로 내부에 링거더(Ring Girder)와 콘(Cone)이 분리 배치되어 구조물의 전도과정 중 저항요소로 작용하기 때문에 전도공법이 비교적 용이하지는 않다. 따라서 이러한 구조물의 발파에 의한 전도공법을 위해서는 구조물의 구조적 특성을 고려하여 사전취약 설계 및 발파가 각각 수행되어야 한다(Stangenberg, 1994).

이 연구에서는 원통형 콘크리트 사일로 구조물의 발파해체를 위한 시공계획의 일부를 소개하고 유한요소해석법을 이용하여 각 시공단계별 구조물의 거시적 거동특성을 분석하였으며, 분석결과를 이용하여 가장 취약단면으로 예상되는 단면에 대해 구조검토를 실시하여 사전취약화전, 후 및 발파후 구조물의 안전성 및 전도공법의 적용가능 유무를 조사하였다. 사전취약 설계 후 발파시공이 성공적으로 수행되었으며 전도공법

의 적절성을 확인할 수 있었다.

2. 원통형 콘크리트 사일로 구조물

이 연구에서 고려한 원통형 콘크리트 사일로는 총 2개이며, 2009년 발파 시공한 구조물(인천광역시 영종도 소재)이다. 구조물의 형태는 Fig. 2에서 보여주고 있는 바와 같으며 구조물의 치수는 각각 외경 22.0m, 높이 33.8m와 외경 24.0m, 높이 36.1m이다. 구조형식은 Fig. 2(b), (c)에서 각각 보이는 바와 같이 쉘 형태의 내력벽과 구조물하부의 내부기본골조로 이루어진 철근콘크리트 구조물이다. 구조물하부의 내부기본골조와 내부기본골조사이의 내력벽이 구조물의 자중, 풍하중 및 기타 하중요소 모두를 지지하는 형태이며, 계획된 전도방향에 따라 최 등(2008)이 제안한 방법을 참고하여 계산된 사전취약화 가능면적을 내부기본골조사이의 내력벽을 순차적으로 먼저 사전취약화를 실시하였다.

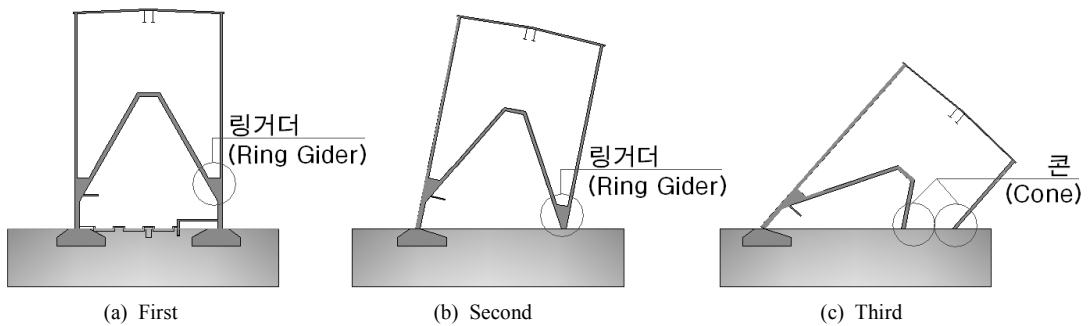


Fig. 1. Overturning steps.

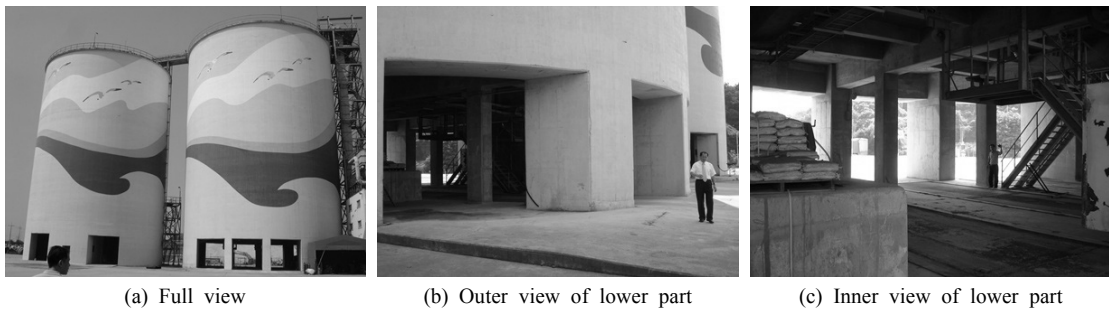


Fig. 2. Cylindrical concrete silo structure.

3. 사전취약 시공계획

구조물의 전도방향은 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 단면의 Y축 방향으로 결정되었으며, 원통형 콘크리트 사일로 구조물의 구조형식 및 치수 등을 고려하여 전도공법을 적용할 수 있도록 사전취약화를 계획하였다. 사전취약화 작업에서는 전도방향의 원통형 셸과 링거더의 일부를 취약화하였다. 또한 사일로 내부에 설치된 시설물이 붕괴거동에 영향을 미치지 않게 하기 위해 구조부재 및 계단의 일부를 절단 시공하였다.

3.1 사전취약 단면계획

결정된 전도방향에 따른 사전취약화를 계획하였다. 사전취약화 작업에 따른 시공전, 후 및 발파후의 단면을 Fig. 4, 5에 각각 나타내었다. 그림 Fig. 4(a), 5(a)는 사전취약전 콘크리트 사일로의 하부단면을 각각 나타낸 그림이고 그림 Fig. 4(b), 5(b)는 사전취약후 콘크리트 사일로 하부단면을 나타낸 그림이다. 사전취약화가 종료된 후 그림 Fig. 4(b), 5(b)의 단면하부 전면부의 기둥부들을 발파하여 Y방향으로 구조물을 전도 시키도록 계획하였으며, 발파후 구조물의 하부

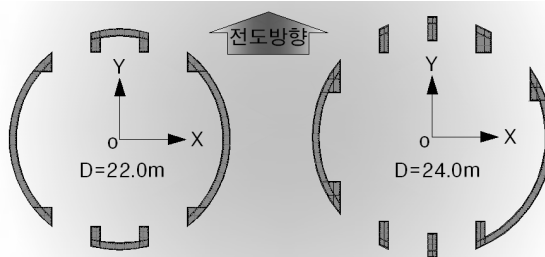
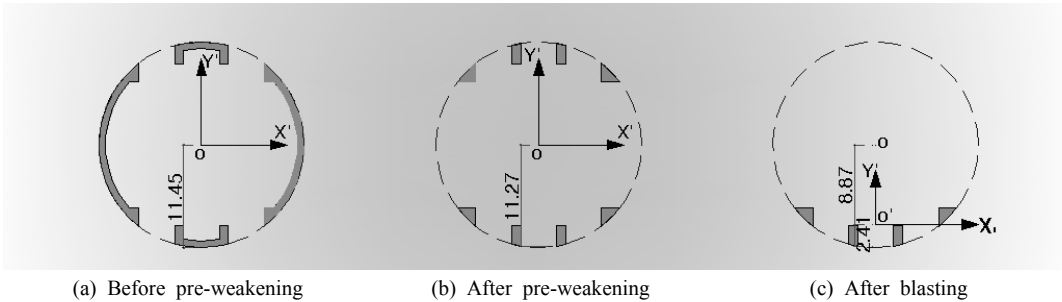
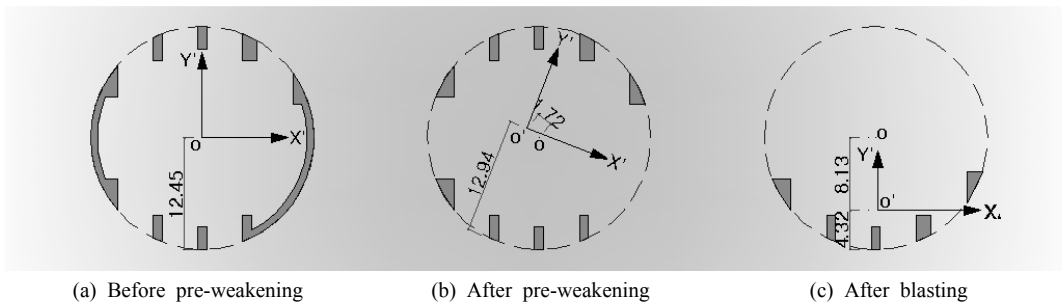


Fig. 3. Overturning direction.



(a) Before pre-weakening (b) After pre-weakening (c) After blasting

Fig. 4. Sections of D=22.0m at each construction step.



(a) Before pre-weakening (b) After pre-weakening (c) After blasting

Fig. 5. Sections of D=24.0m at each construction step.

단면의 모습은 그림 Fig. 4(c), 5(c)와 같다. 콘크리트 사일로의 설계도면을 참조하여 작성한 사전취약화전, 후 및 발파후 단면의 변화에 따른 도심의 위치변화는 Fig. 4, 5에 표시하여 나타냈으며, 단면변화는 Table 1에 정리하여 나타내었다.

3.2 사전취약 높이계획

Fig. 6은 이 연구에서 고려되고 있는 콘크리트 사일로의 발파 후 구조물의 붕괴 거동을 예측한 그림이다. 발파 후 콘크리트 사일로는 총 3단계에 걸쳐 붕괴될 것으로 예측하였으며, 이를 위해 사전취약화도 총 3 단계에 걸쳐 실시하였다. 1단계에서는 전도방향에 따라 콘크리트 사일로의 하부로 부터 높이 약 11.80m로 링거더와 콘의 일부를 함께 전면파쇄하여 사전취약 하였다. 2단계에서는 발파 후 전도방향 반대쪽 내력벽의 11.0m 지점의 일부를 절단하여 붕괴를 유도 하였으며, 3단계에서는 전도방향 반대쪽 내력벽의 약 7.0m 지점을 일부 절단하여 최종붕괴가 유도되도록 계획하였다.

4. 유한요소해석

사전취약화전, 후 및 발파후 원통형 콘크리트 사일로 구조물의 가장 취약한 단면의 높이방향 위치를 파악 하여 각 시공단계별 단면을 검토하고자 유한요소해석

을 실시하였다. 이 연구에서 고려하고 있는 직경 22.0m, 24.0m의 원통형 콘크리트 사일로의 경우 적용하는 사전취약화 시공방법이 유사하므로 유한요소해석에서는 직경 22.0m인 원통형 콘크리트 사일로에 대해서만 실시하여 구조물의 거시적 거동의 경향을 파악하고 해석결과를 직경 24.0m인 원통형 콘크리트 사일로에도 동일하게 적용하고자 한다(박 훈, 2008b).

실제 구조물의 치수를 해석에 정확하게 반영하기 위해 AutoCAD 2008을 사용하여 모델링 하였으며, 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS Ver. 11을 사용하여 해석(ANSYS Inc., 2008)하였다. 유한요소해석에 사용된 콘크리트 재료의 역학적 성질 중 압축강도(f_{ck})는 설계도면을 참조하여 30MPa을 적용하였다. 결정된 콘크리트압축강도를 국내설계기준(콘크리트 구조설계기준 해설, 2007)에 적용하여 탄성계수(E_c)는 29GPa, 포아송비(ν)는 0.18, 단위중량(w_c)는 23kN/m³을 각각 적용하였다. 경계조건은 구조물의 하단을 고정으로 가정하였고 하중은 콘크리트 사일로 자중과 풍하중을 조합하여 재하하였다. 풍하중은 지역의 특성을 고려하기 위해 현행설계기준(건축구조설계기준, 2006)을 참고하여 1.73kPa로 결정하였다.

유한요소해석을 실시한 결과 사전취약화전, 후 및 발파후의 구조물의 면내응력을 조사한 결과를 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 사전취약 전에는 구조물 상단으로부터 하부 개구부 시점에서 최대응력이 발생하

Table 1. Variations of concrete and steel area according to construction steps

Dia.	Area	Before pre-weakening	After pre-weakening	After blasting
22.0	Concrete (A_g)(m ²)	46.67	17.90	8.95
	Steel (A_{st})(cm ²)	2,270.80	870.96	435.48
24.0	Concrete (A_g)(m ²)	48.87	29.08	14.54
	Steel (A_{st})(cm ²)	2,012.61	1,197.57	681.87

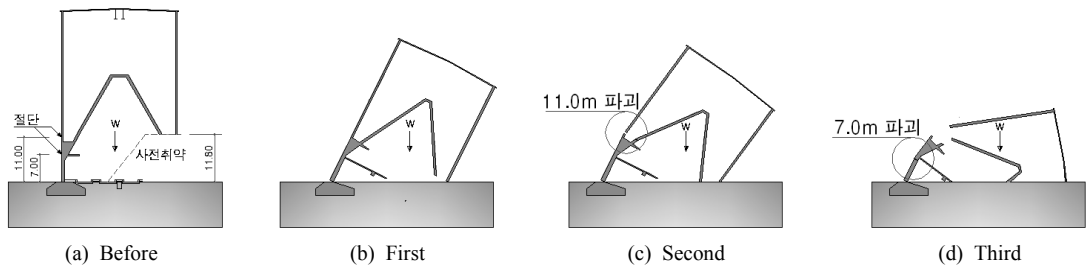


Fig. 6. Expected overturning steps.

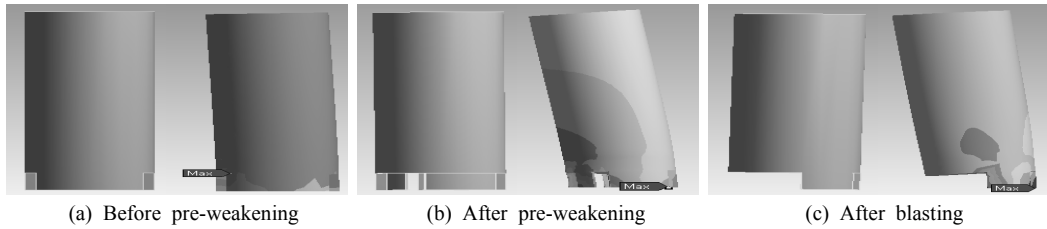


Fig. 7. Results of FE analysis.

Table 2. Results of structural analyzes

Diameter (m)	Construction Step	Compressive Stress (MPa)	Bending Stress (MPa)
22.0	After Pre-weakening	2.37	1.81
	After Basting	4.74	-58.81
24.0	After Pre-weakening	1.69	1.39
	After Basting	3.38	-43.17

였으며, 사전취약화 및 발파후에는 구조물의 전도 반 대방향 최하단에서 최대응력이 발생함을 관찰 할 수 있었다. 따라서 사전취약화전에는 구조물의 하단 개구 부 시점에 위치한 단면, 사전취약화 후 및 발파후에는 구조물 최하단면을 대상으로 구조검토를 실시하였다.

5. 구조안정성 검토

유한요소해석 결과를 조사된 각 시공단계별 최대취약단면을 대상으로 구조검토를 실시하였다. 구조검토를 위한 해석은 2단계에 걸쳐 실시하였다. 1단계에서는 사전취약화 후 구조물의 자중 및 풍하중에 따른 구조물의 거동을 예측하였으며, 2단계에서는 발파후 구조물의 자중, 풍하중 및 단면감소에 의한 단면내 도심축의 이동에 따른 구조거동을 조사 분석하여 구조물의 전도 가능성을 예측하였다.

1단계 사전취약화에서는 자중에 의한 압축응력, 풍하중에 의한 인장 및 조합하중에 대해 구조물이 모두 안전하여야 하며, 2단계에서는 발파후 발파되지 않은 단면은 압축에 대해서는 안전하여야 하며, 도심축의 이동에 따른 자중에 의한 휨 및 풍하중에 의한 휨에 의하여 휨파괴가 유도되어 전도가 발생하여야 한다.

이러한 시공계획을 위해 콘크리트 구조설계기준(2007)을 참조하여 구조해석을 실시하였다. 자중(W_d)은 식 (1)을 이용하여 구했고, 식 (1)에서 V 는 콘크리

트 사일로의 부피이고 w_c 는 콘크리트의 단위질량이다. 압축응력(σ_1)과 자중 및 풍하중에 의한 휨응력(σ_2, σ_3)은 식 (2)-(4)를 이용하여 각각 구하였다. 여기서, A_g 는 콘크리트 사일로의 단면적이고 M_p 는 풍하중이 사일로의 전면에 작용할 경우 검토 위치에서의 휨모멘트이며, y 는 검토 단면내 x 축(Fig. 5 참조)에서 검토 위치까지의 수직거리, I_x 는 단면2차모멘트, l 은 자중 작용점과 단면의 중심 사이의 거리이다. 안전성 검토 시 콘크리트 압축강도와 인장강도는 구조물 설계도서를 참조하여 압축강도와 휨인장강도를 각각 30MPa, 4.3MPa($f_{ck}/7$)으로 가정하여 적용하였다. 안전성 검토결과 구조물 단면에 발생하는 응력을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

안전성 검토결과 Table 2에서 보여주는 바와 같이 사전취약화후, 발파후의 각 단면에서 발생하는 압축응력은 콘크리트의 설계기준압축강도인 30MPa보다 낮은 상태에 있음이 관찰되었으며, 이를 볼 때 원통형 콘크리트 사일로 구조물은 전체 시공과정에 걸쳐 압축에 대해서는 안전할 것으로 예측되었다. 또한, 발파 후 Fig. 4, 5에서 보여준 바와 같이 단면의 도심축이 이동되어 자중에 의한 휨응력이 크게 발생하였으며, D=22.0m, 24.0m인 원통형 콘크리트 사일로 구조물에 각각 -58.81MPa, -43.17MPa가 발생하였으며, 이는 가정한 휨인장강도 4.3MPa를 초과하는 값을 나타냄으로 원통형 콘크리트 사일로 구조물은 휨파괴에

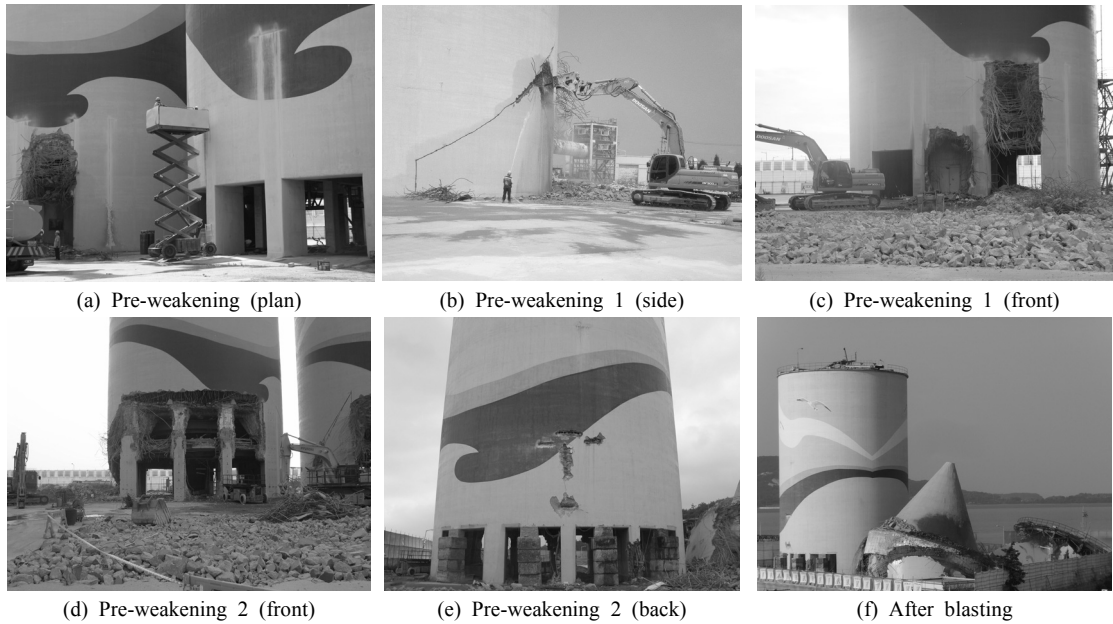


Fig. 8. Field application.

의한 전도가 유도될 것임을 예측할 수 있었다. 이러한 이유는 발파후 단면의 도심이 이동하여 자중에 의한 휨모멘트가 크게 발생되었기 때문이라고 생각된다.

$$W_d = V \times w_c \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{W_d}{A_g} \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_p y}{I_x} \quad (3)$$

$$\sigma_3 = (W_d l) \frac{y}{I_x} \quad (4)$$

사전취약 계획 및 구조안전성 검토를 실시한 후 Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 사전취약화 작업을 실시하였고 계획대로 성공적으로 발파가 이루어졌다.

6. 결론

이 연구는 발파해체공법중 전도공법을 적용하여 원통형 콘크리트 사일로 구조물을 해체시공하기 위한 발파전 단계인 사전취약화와 관련된 것으로, 시공단

계별 사전취약화에 따른 단면에 대해 구조검토를 실시하여 공법의 적용 가능성에 대해 평가하였다.

먼저, 시공단계별 변화하는 단면의 특성을 조사 및 분석 하였으며, 유한요소해석을 실시하여 구조적으로 최대취약단면의 위치를 조사하였다. 조사된 최대취약 단면에 대해 현행시방규정에 따라 구조검토를 각각 실시하였다. 구조해석 결과 이 연구에서 고려한 사전취약 방법을 적용할 경우 원통형 콘크리트 사일로 구조물은 압축에 대해서는 안전하고 발파시공 최종단계인 발파후 단계에서 휨파괴가 유도되어 구조물은 전도 될 것이라 예측할 수 있었다. 사전취약 시공후 발파시공이 성공적으로 이루어졌으며, 이를 통해 이 연구에서 고려한 원통형 콘크리트 사일로 구조물의 이와 유사한 형태의 구조물의 발파시공에도 이 연구에서 적용한 방법을 적용하여 사전취약 시공을 실시 할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업(과제번호: 09CHUD-B043673-04-000000)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 2006, 건축구조설계기준 및 해설, 기문당, pp. 61-92.
2. 박 훈, 석철기, 김승근, 2008a, 원통형 구조물의 발파해체를 위한 사전 취약화에 따른 구조물의 안정에 관한 수치해석적 연구, 화약발파, 대한화약발파공학회지, Vol. 26, No. 1, pp. 1-5.
3. 박 훈, 석철기, 김승근, 2008b, 원통형 구조물의 발파해체설계에 대한 최신 발파해체 시뮬레이션 기법의 적용, 화약발파, 대한화약발파공학회지, Vol. 26, No. 1, pp. 7-14.
4. 최 훈, 주형중, 김효진, 윤순중, 2008, 발파해체를 위한 사전취약화 범위 설정 및 구조적 안전성평가, 2008년도 한국강구조학회 학술대회발표집, 경주, pp. 411-414.
5. 한국콘크리트학회, 2008, 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당.
6. ANSYS Inc., 2008, Release 11.0 Documentation for ANSYS, Pennsylvania.
7. Stangenberg, F., 1994, Blast Demolition of Reinforced Concrete Industrial Chimneys, International symposium Spatial, lattice and tension structures, pp. 290-299.



최 훈

홍익대학교 박사과정

Tel : 02) 3141-0774
E-mail : kamanana@hanmail.net

김 효 진

한국토지주택공사 주택도시연구원
연구위원Tel : 031) 738-4715
E-mail : red2395@naver.com

박 훈

전북대학교 겸임교수

Tel : 063) 270-2358
E-mail : hujin@jbnu.ac.kr

윤 순 중

홍익대학교 토목공학과 교수

Tel : 02) 3141-0774
E-mail : sjyoon@hongik.ac.kr