

RC 라멘구조물의 발파해체 붕괴거동 수치모사

이희광²⁾ · 정재웅³⁾ · 전석원²⁾

1. 서 론

최근 급속도로 이루어진 도시화로 인하여 기존도시가 점점 거대해지고 노후화된 구조물들에 대한 철거나 리모델링 등으로 인한 해체수요가 증가하고 있는 상황이다. 과거 지어진 저층구조물에 대해서는 기계식 해체가 주를 이루었다면, 최근에 해체가 요구되는 구조물들은 1970~80년대에 지어진 12층 이상의 고층구조물들로 이들은 기계식 해체보다 발파에 의한 해체가 효율성 측면이나 안전성 측면에서 더욱 요구되고 있는 현실이다. 그러나 발파해체의 경우 기계식 해체보다 화약의 장약량이나 지연시차 그리고 장약위치 등 여러 가지 면에서 엔지니어의 숙련된 기술과 경험이 필요하며, 이는 외국의 몇몇 구조물 발파해체 회사가 오랜 경험으로 축적된 기술을 그들만의 노하우로써 그 공개를 꺼리고 있는 실정이다. 또한 발파해체 특성상 다양한 지연시차 및 장약위치에 따른 구조물의 붕괴거동을 실험하기란 쉽지 않으므로 컴퓨터를 이용하여 미리 여러 가지 상황에 대하여 붕괴거동을 모사할 수 있다면 발파해체 설계 시 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 이를 위해서 Itasca에서 개발한 상용코드인 PFC3D(Particle Flow Code in 3 Dimensions)를 이용하여 구조물의 발파해체 거동을 모사하였다. 대상 구조물은 기둥과 보를 가진 RC (Reinforced Concrete) 라멘조의 구조물로 콘크리트의 거시물성을 결정하기 위하여 PFC3D에서의 미시변수를 결정하였으며, 결정된 미시변수 값을 구조물에 적절히 변환 대입하여 실제 구조물과 같은 거시물성을 가질 수 있도록 하였다. 다음으로 실제 발파해체를 실시한 군산화력발전소의 발파해체 붕괴거동을 모사하고 실제거동과 비교하였다.

2. PFC3D에서의 미시변수 결정

2.1 이론적 배경

PFC3D는 서로 결합된 구형 강성 입자간의 상호작용 및 운동을 모델링하여 그 입자로 이루어진 해석 대상물의 거동을 구현하는 개별요소법의 한 방법으로 입자간의 동적거동이나 분리거동을 모사하는데 적합한 코드이다. 따라서 각 입자가 가지는 물성(미시변수)을 조정하여 그 입자들로 구성된 해석대상 전체의 물성(거시물성)을 맞추는 것이 중요하며, 그 연산과정은 Fig. 1에서 보는 것처럼 뉴턴의 운동법칙과 힘-변위법칙을 번갈아가며 적용하여

2) 서울대학교 지구환경시스템공학부

3) 서울대학교 에너지시스템공학부

입자 접촉간의 위치, 속도, 힘 등을 평형상태에 도달할 때까지 계산하게 된다(Potyondy and Cundall, 2004; Itasca Consulting Group, 2003).

이러한 입자간의 결합과 관련하여 PFC3D에서는 접촉구성모델 중 결합모델에서 접촉결합 모델과 병행결합모델을 제공하고 있으나 본 연구에서 각 결합모델에 따른 차이가 없어 결정해야할 미시변수의 수가 적은 접촉결합모델을 적용하였다.

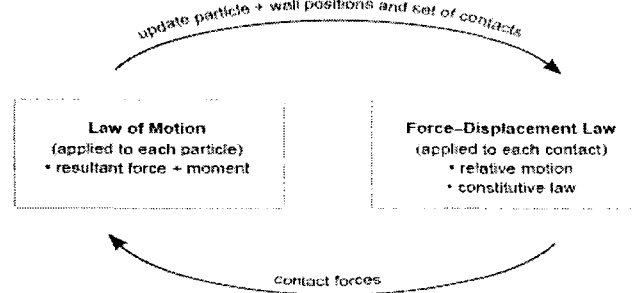


Fig. 1. Calculation cycle in PFC3D (Itasca Consulting Group, 2003)

2.2 미시변수 결정

표준 콘크리트 공시체($\varnothing 150 \times 300$ (mm))의 일축압축실험을 모사하여 일반적인 압축강도 24MPa을 가지며, 이 압축강도에 대한 미국 콘크리트 협회의 탄성계수 추정식 (American Concrete Institute Code, ACI Code)에 따른 탄성계수 23.2GPa 와 평균적인 포아송 비인 0.18(Nilson, 1997) 을 거시물성으로 가질 수 있도록 Table 1과 같은 접촉결합에서의 미시변수를 결정하였다. 미시변수를 결정하기 위해서 최근 정용훈(2006)이 발표한 논문에서 제안한 PFC2D에서의 암반의 물성과 구성입자의 미시변수간의 정량적인 관계를 도출하는 방법을 암

Table 1. Micro parameters for generation of a contact bonded model in PFC3D

Micro-parameter	Unit	Abbreviation	Explanation	Determined value
ρ	kg/m ³	A	Ball density	2,324
r_{min}	mm	B	Minimum ball radius	4
μ	-	C	Ball friction coefficient	0.5
E_c	GPa	D	Ball-ball contact modulus	49.98
k_n/k_s	-	E	Ball stiffness ratio	2.39
σ_c (mean)	MPa	F	Contact-bond normal strength	20.33
τ_c (mean)	MPa	G	Contact-bond shear strength	20.33
s.d./mean (σ_c, τ_c)	-	H	Ratio of standard deviation to the mean value of contact-bond normal/shear strength	0.1

석보다 압축강도가 낮고 표준 공시체가 더 큰 콘크리트에 적용하여 정량적인 관계를 도출하였다.

우선 8개의 미시변수 중에서 거시물성에 중요한 영향을 미치는 영향인자를 알기 위해 통계학에서 많이 사용하는 실험계획법의 하나인 부분배치법(Fractional Factorial Design) 과 회귀분석(Regression analysis) 등 민감도 분석을 실시하여 Table 2에 거시물성에 중요한 영향을 미치는 미시변수들을 나타내었다(Minitab Lnc, 2003). 이들 가운데는 영향인자들의 주 영향뿐만 아니라 상호영향(interaction effect)도 함께 나타났지만, 대부분 주영향이 다른 상호작용에 의한 영향인자보다 큰 것으로 확인되었으며, 실제 이들 영향인자들로 다중회귀분석을 실시한 결과 결정계수가 95% 이상으로 다른 상호작용에 의한 영향력이 미미한 것으로 밝혀졌다(Box and Draper, 1987). 이를 바탕으로 각 중요한 영향인자에 대하여 거시물성에 대하여 회귀분석을 실시하여 Table 1의 각 미시변수의 값을 도출할 수 있었다.

Table 2. Significant micro-parameters affecting each macro-property

Macro-properties	significant micro-parameters
Young's modulus	D » E > D·E B > B·D
Poisson's ratio	E » B > D·E > D > G > B·E
Compressive strength	G > F > F·G B > H > E·F > C > B·G > G·H

3. RC 라멘조 구조물의 구성

미시변수 결정법에 의하여 결정된 미시변수 값들을 PFC3D 상에서 만든 RC라멘 구조물의 물성값으로 Table 3과 같이 적용하였으며, 이는 Table 1의 값을 만들어진 RC 구조물의 입자 반경 및 입자분포특성에 맞도록 적절히 변환시킨 값이다.

구조물은 사용자가 X, Y, 그리고 Z (높이) 축 방향으로 기둥 및 보에 적절한 길이 및 경간의 수를 설정하고 이를 구성하는 입자의 반경을 결정하면 그에 맞게 직육면체 모양의 구조물을 구성할 수 있도록 되어 있으며 각 기둥과 보에는 ID가 부여되어 각 ID별로 서로 다른 물성을 입력할 수 있다.

Table 3. Particle property values that are assigned to the structure

Particle property [unit]	Value
Normal bond strength [Pa]	120,800
Shear bond strength [Pa]	120,800
Normal stiffness (k_n) [GPa]	1.06
Shear stiffness (k_s) [GPa]	0.44

```

PFC3D Command Window
-----
*****
> All model specific information has been cleared *
*****
Pfc3D>variables1
입자의 반경 (m)을 입력해주세요(기본값:1m):0.2
이제부터 구조물의 기하학적 형상에 관한 정보를 입력받겠습니다.
기둥 및 들보의 두께방향으로 들어갈 볼 입자의 개수를 입력해주세요(기본값:2개):2
구조물의 x 방향 경간의 개수를 입력해주세요(기본값:2개):2
구조물의 y 방향 경간의 개수를 입력해주세요(기본값:1개):1
구조물의 층수를 입력해주세요(2 방향)(기본값:5층):8
x 방향 들보의 길이방향으로 들어갈 볼 입자의 개수를 입력해주세요(기본값:16개):10
x 방향 들보의 길이는 4.0000000000e+000m 입니다.
y 방향 들보의 길이방향으로 들어갈 볼 입자의 개수를 입력해주세요(기본값:16개):20
y 방향 들보의 길이는 8.0000000000e+000m 입니다.
z 방향 기둥의 길이방향으로 들어갈 볼 입자의 개수를 입력해주세요(기본값:8개):13
기둥의 높이는 5.2000000000e+000m 입니다.
기둥과 들보 사이의 결합강도 강화계수를 입력해주세요(기본값:3):3
기둥과 들보 사이의 결합강도 강화계수를 적용할 범위(1에서 5사이) 입력해주세요(기본값:1.5000000000e+000):3.5
기둥의 중심으로부터 입자직경의 3.5000000000e+000배 범위까지 강화되었습니다.
붕괴과정을 저장할 시간간격을 입력해주세요.(기본값:3.0000000000e-001초):0.1
붕괴과정을 저장할 회수를 입력해주세요(기본값:10회):200
총 기록시간은 1.0000000000e-001초 간격으로 2.0000000000e+001초 입니다.
장약량에 따른 폭발의 강도를 입력해 주세요(2 이상의 값으로 폭발의 위력이 클수록 큰 값을 입력)(기본값:4):4.5
이 정도 장약량일 경우 기둥은 가운데 부분부터 전체의 4.4444444444e-001가 파괴될 겁니다.
기둥의 취약화 상수(0과 1 사이 값)를 입력해주세요(기본값:3.3000000000e-001)0.33
    
```

Fig. 2. Input values for the construction of the structure

Fig. 2는 사용자가 입력창에 각 구조물의 형상을 입력하는 모습을 나타낸 것이다. 또한 사전 취약화 작업을 모사하기 위하여 각 기둥의 일정부분의 강도를 적절한 약화계수를 입력할 수 있도록 하였으며, 또한 기둥과 보의 결합부분의 경우 전단 및 인장력에 저항할 수 있도록 철근 배근량이 많은 점을 감안하여 강화계수를 입력할 수 있도록 하였다. 또한 본 발파 전 실시하는 시험 발파에서 각 기둥의 장약량을 결정하는데, 화약량에 따른 기둥의 파쇄부분을 모사하기 위하여 제거되는 기둥의 부분을 정할 수 있으며, 발파 후 일정 시간간격으로 붕괴거동을 저장할 수 있도록 프로그램 되어있다. 그럼에도 불구하고 대부분의 구조물들이 직육면체모양이 아니고, 보의 길이가 같은 방향임에도 서로 다른 점들은 사용자가 코드 상에서 수작업을 해서 구조물을 구성해야 한다.

4. 발파해체 구조물 붕괴거동 모사 및 비교

이상의 방법으로 PFC3D상에서 만든 구조물의 발파해체 거동을 실 발파해체 거동과 비교 하였다. 발파해체 대상 건물은 군산화력발전소로 1967년에 지어진 11층짜리 RC 라멘조 구조물이다. Fig. 3은 군산화력발전소 전경과 PFC3D상에서 구성한 구조물을 보여주고 있다. 직육면체 모양의 건물이 아니어서 가장 큰 X, Y, 그리고 Z 방향의 경간을 구성하고 실제 존재하지 않는 기둥과 보는 제거하는 방식으로 구조물을 만들었다. 또한 각 방향마다 다른 경간의 길이는 전체크기에 비해 미비해서 평균값으로 결정하였다. 각 기둥과 보는 반경이 0.15 m 인 볼 입자를 2열로 배열하여 구성하였으며, 이는 실제 기둥 두께인 610 mm 와 비슷한 값이다. 구조물을 구성하는데 소요된 입자의 수는 대략 75,000 개이며 해석에 걸린 시간은 펜티엄4 3.6 GHz, 2.0 GB 메모리 사양의 개인용 컴퓨터로 거의 5일 정도가 소요되었

다. 또한 Fig. 4는 발파해체 붕괴거동을 0.5 또는 1.0 초 간격으로 저장하여 보여준 것으로 Fig. 5의 실제 발파해체 붕괴거동과 매우 유사한 거동을 보임을 알 수 있다. 해석상 구조물이 모두 붕괴되기까지 13 초가 소요되었으며, 이는 Fig. 5에서 보는 것처럼 실제 붕괴거동 시 걸린 시간 6.5 초와 비교하면 거의 2 배 가까이 걸린 것이다. 이는 PFC3D에서의 동적해석 알고리즘 상의 문제로 이에 대한 추가적인 조정이 필요할 것으로 판단된다.

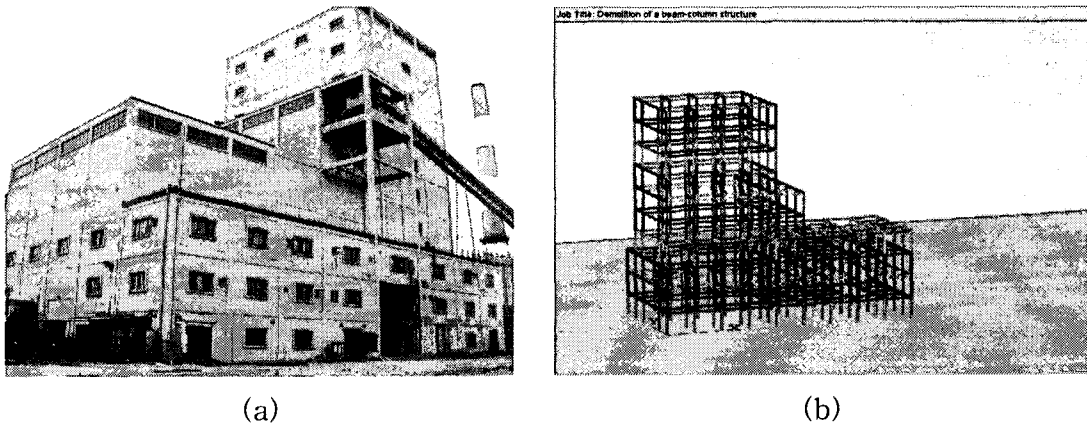
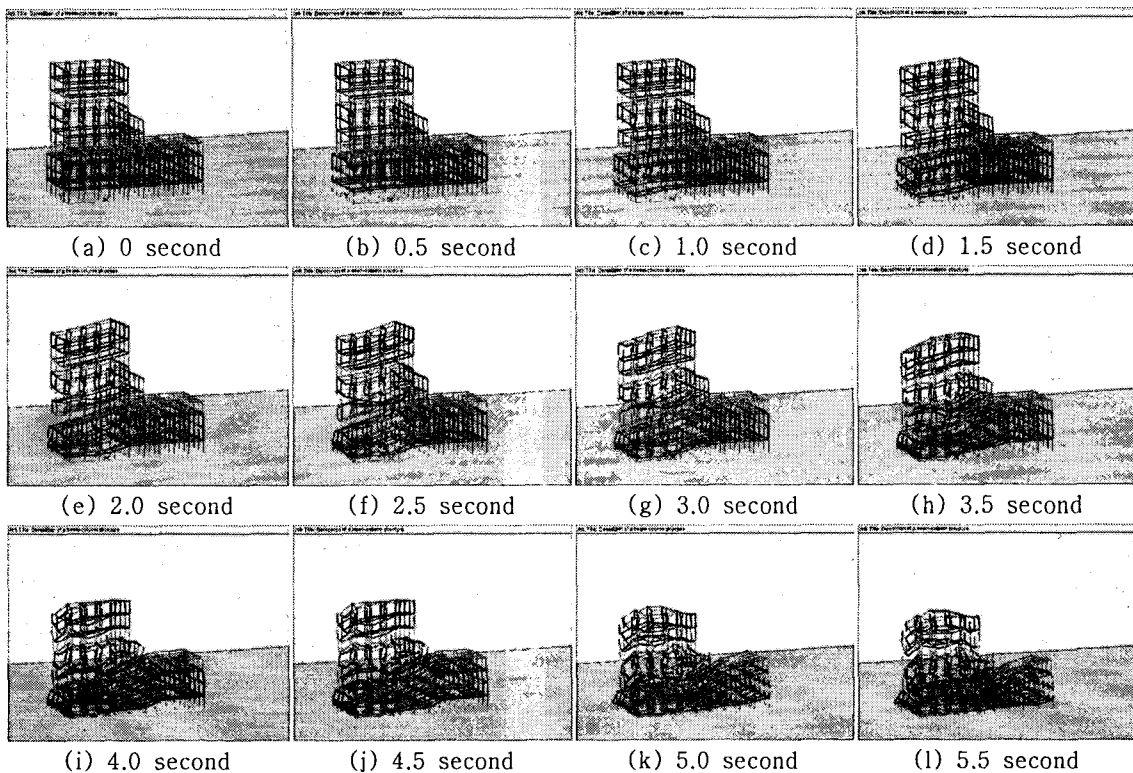


Fig. 3. (a) Overview of Gunsan Power Plant; (b) Beam and column structure of Gunsan Power Plant in PFC3D



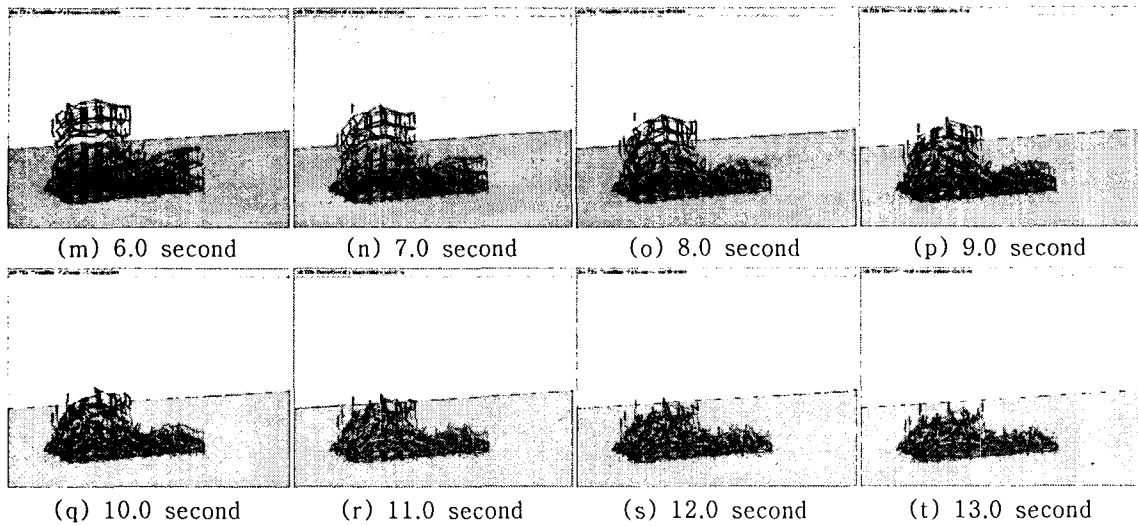


Fig. 4. Collapsing behavior in PFC3D simulation

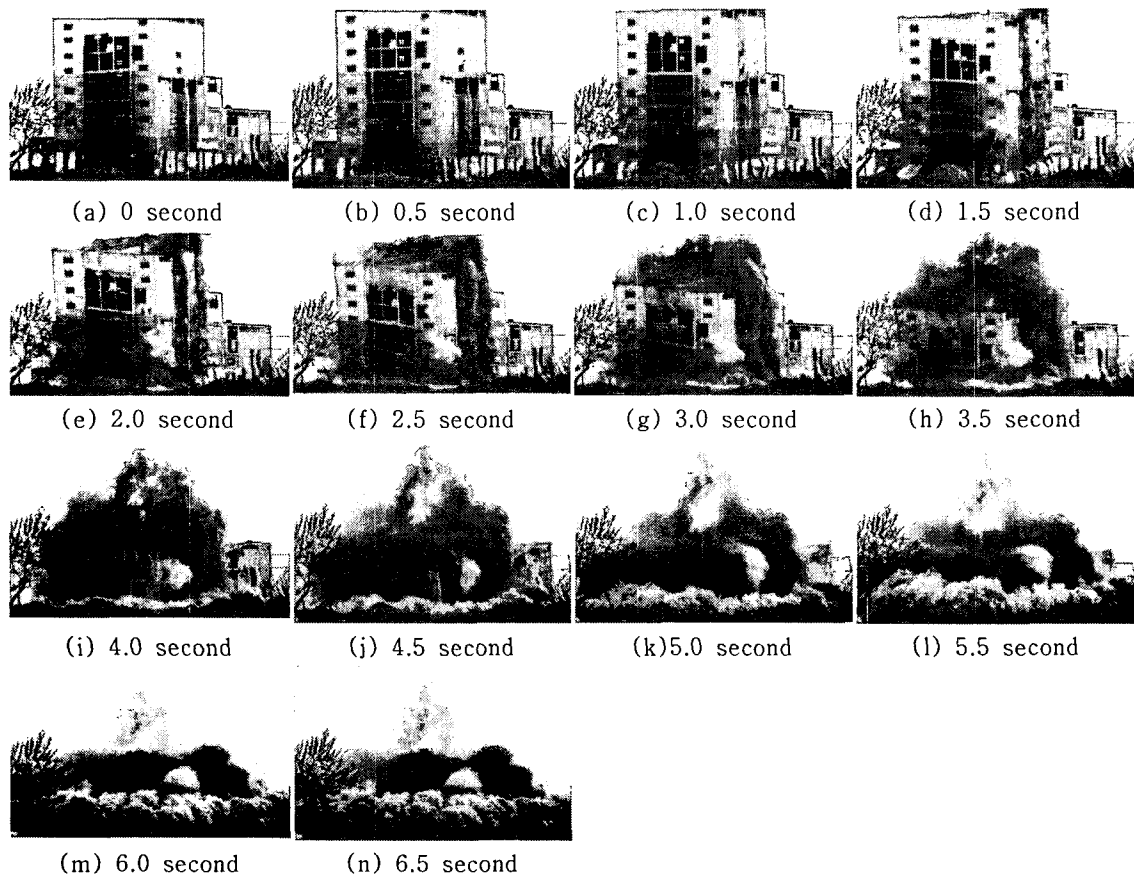


Fig. 5. Real collapsing behavior by blasting demolition

5. 결 론

PFC3D를 이용하여 구조물의 발파해체 거동을 모사하고자 하였다. 콘크리트의 거시물성(탄성계수, 포아송비, 일축압축강도)를 구현하기 위하여 PFC3D상의 입자간의 미시변수들 값을 실험계획법 및 회귀분석 등 민감도 분석을 실시하여 결정하였다. 또한 PFC3D 상에서 RC구조물을 구성할 수 있도록 적절히 프로그래밍을 하였으며, 비교적 규칙을 갖는 구조물인 경우 특히 직육면체 형태의 구조물인 경우에는 비교적 쉽게 기둥과 보로 이루어진 구조물을 만들 수 있다. 복잡한 형태의 구조물일지라도 조금의 수작업을 통하여 원하는 형태의 구조물을 구현할 수 있으며 실제로 발파해체한 군산화력발전소의 발파해체를 모사한 결과 유사한 붕괴거동을 보이는 것으로 나타나 추후 발파해체 물건에 대하여 사전에 붕괴거동을 관찰하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 그러나 모두 붕괴할 때까지 걸린 경과시간에서 2배 가까이 차이가 나는 것으로 나타나 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호: 06건설핵심B04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 정용훈, 2006, 발파에 의한 굴착손상영역의 수치해석적 산정, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
2. Potyondy, D. O. and Cundall, P. A., 2004, A bonded-particle model for rock, International Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 41, No. 8, pp. 1329-1364.
3. Minitab Inc., 2003, Fractional design, USA, pp. 7-44.
4. Box, G. E. P. and Draper, N. R., 1987, Empirical model-building and response surface, John Wiley & Sons, Canada, pp. 105-181.
5. Nilson, A. H., 1997, Design of concrete structures, McGraw-Hill Companies Inc., pp. 30-66.
6. Itasca Consulting Group Inc., 2003, Manuals for PFC3D, Minneapolis, MN, USA.