

극한 진동에 의한 철근콘크리트 뼈대구조물에 균열전파의 파괴 역학적 특성 연구

Fracture Analysis on Crack Propagation of RC Frame Structures due to Extreme Loadings

정 제 평* 이 명 곤** 김 우***
Jeong, Jae-Pyong Lee, Myung-Gon Kim, Woo

Abstract

The inelastic response of many structural steel and reinforced concrete structures subject to extreme loadings can be characterized by elastoplastic behaviors. Although excursion beyond the elastic range is usually not permitted under normal conditions of service, the extent of permanent damage a structure may sustain when subjected to extreme conditions, such as severe blast or earthquake loading, is frequently of interest to the engineer. A blast is usually the result of an explosion defined as a "sudden expansion". This paper discusses the basic concept that defines blast loadings on structures and corresponding elastoplastic structural response (displacement, velocity, and acceleration) and try to explain a crack propagation of concrete in sudden expansion. According to nonlinear finite element analysis, the crack forms of static and dynamic states displayed different in RC structural members. This paper also provides useful data for the dynamic fracture analysis of RC frame structures.

요 지

대부분 강구조 및 철근콘크리트 구조물은 탄소성 거동에 의해 극한강도가 지배된다. 비록 평상시에는 탄성 범위를 초과하는 진폭(振幅)이 발생하지 않지만 심각한 폭발이나 지진하중과 같은 극단적인 경우가 발생할 때, 엔지니어는 구조물에 영구적인 손상을 줄 수 있는 상황들을 접하게 된다. 이러한 상태 평가를 위해 본 연구는 폭발 등의 극한하중에 특성에 의해 발생하는 구조물의 동적거동을 분석하였다. 그리고 본 연구는 극한진동 특성을 분석하기 위해 비선형 유한요소프로그램(ATENA2D, FRANC2DL)을 사용하였다. 본 연구의 해석결과, 평상시와 횡하중시의 균열은 발생 위치와 양태가 매우 다르게 나타났다. 또한, 초기 손상균열이 있는 RC라멘의 보에 단면형상과 기하학적 형상비 변화를 고려하여 균열각의 변화를 분석하였으며 이를 통해 동적 횡하중 작용에 의한 피해여부를 판단할 수 있었다.

Keywords : Crack Propagation, Nonlinear FEM, Elastoplastic Behavior, Blast Vibration

핵심 용어 : 균열성장, 비선형유한요소해석, 탄소성거동, 발파진동

* 정희원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

** 정희원, 전남대학교 토목공학과 석사과정

*** 정희원, 전남대학교 토목공학과 교수

E-mail : jjpeunju@hotmail.com 062-530-0297

•본 논문에 대한 토의를 2003년 11월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

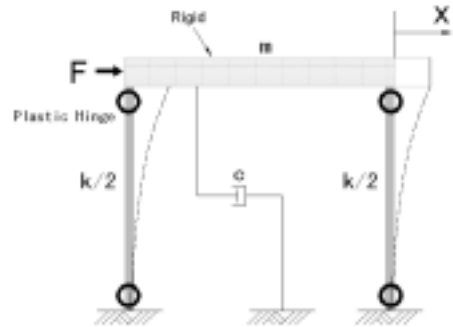
강구조 및 철근콘크리트구조물의 극한하중은 탄소성 거동의 특성에 의해 결정될 수 있다. 일반적으로 평상 시에는 탄성범위를 초과하는 진폭(振幅)이 발생하지 않지만 심각한 폭발이나 지진하중과 같은 극단적인 경우가 발생할 때, 엔지니어는 구조물에 영구적인 손상을 줄 수 있는 상황들을 접하게 된다. 최근 지하철공사와 같이 도심 내의 굴착공사 도중 발파 등으로 인해 RC 구조물에 균열이 발생하는 사례가 증가하고 있는 추세이며, 손상평가에 관심이 집중되고 있다(변근주 등, 2000). 이러한 손상은 동적 구조계의 거동을 파악하기 위한 비선형 진동 해석과 균열성장을 통해 평가할 수 있다. 첫 번째 비선형 진동해석 평가방법은 적절한 운동방정식, 구성모델, 시간적분계획 그리고 합리적인 구조계 해석모델 사용에 기초하여야 한다.

시간이 경과된 뼈대 구조의 현재 상태를 정확히 파악하기는 힘들지만 보통의 RC 구조물은 균열이 발생하지 않은 초기 탄성 상태에서 구조물에 심각한 균열이 발생하여 소성흔지가 발생한 소성 구조계 사이의 중간상태에 있다고 볼 수 있다(김우 등, 2002). 초기 균열이 있는 많은 구조물에 폭발하중 등의 극한 진동상태가 발생하게 되면 손상원인에 의한 판정이 필요하게 된다. 이러한 상황에서 초기 균열의 성장 예측을 통해 발파 등의 급격한 진동에 의한 피해 여부를 판단할 수 있는 균열성장 예측평가 방법에 대한 기본개념 수립이 필요한 실정이다. 진동 특성 중 철근콘크리트 뼈대 구조물에 심각한 영향을 주는 횡변위(side sway)는 주로 보와 기둥의 절점부에 균열이 집중적으로 발생하게 되며 이로 인해 소성흔지 거동이 발생하게 되고 횡강성의 변화를 유발하게 된다. 이러한 균열상태는 평상시 탄성 하중상태의 균열과는 발생위치와 균열각 등 성장이 매우 다르게 나타난다. 본 연구는 이러한 점을 착안하여 초기 손상균열의 성장 예측을 통해 극한 진동에 의한 RC 구조물에 피해여부를 판단하는 기초연구를 수행하고자 한다. 균열의 발생위치와 양태파악은 ATENA2D 프로그램을 사용하였고, 균열각 변화 예측은 FRANC2DL 프로그램을 사용하였다.

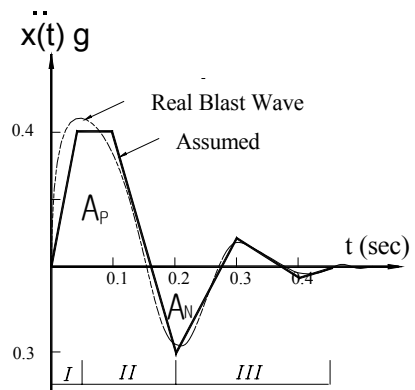
2. 극한진동의 상태평가 방법

2.1 극한진동의 특성

일반적으로 도심 공사 중 극한 진동은 주로 폭발에 의해 나타나며, 폭약의 종류와 장약량에 따라 지반가속도는 크게 변화하며 지층을 구성하고 있는 매질의 탄성파속도 그리고 지반과 구조물 경계구속 정도에 따라 구조물에 작용하는 입력가속도의 크기가 결정된다. 그리고 Fig. 1(a)와 같이 구조물의 질량, 감쇠, 강성에 따라 각 모드(mode) 별 응답변위, 응답속도, 응답가속도가 결정되며, 이들 결과로부터 각 부재나 절점에 작용하는 등가하중을 계산할 수 있다. 이때 기존 폭발하중에 의한 지반가속도를 나타낸 Fig. 1(b) (Tedesco, 1998)를 살펴보면, 지진과 달리 지반진동시간이 매우 짧고 지반수평방향의 가속도가 대칭성이 없는 특징이 있다.



(a) dynamic system



(b) acceleration of blast loading

Fig. 1 Elastoplastic System and Blast Load

발파 등의 극한 진동의 특성은 매우 짧은 시간에 최대 지반가속도에 도달하는 구간 I(증가구간)이 발생한다. 그리고 구간 II(감소구간)와 같이 급격히 지반가속도의 크기가 작아진 후 구조물에 거의 영향이 없는 구간 III(소멸구간)으로 구분할 수 있다. 이때 일반적인 폭발하중의 경우 positive 측 지반가속도면적 A_P 가 Negative 측 지반가속도 면적 A_N 보다 크게 작용한다.

2.2 탄소성구조계의 응답 평가방법

본 연구에서 탄소성거동 응답해석과정은 Fig. 2의 탄소성저항력 R_m 과 변위 관계(Tedesco, 1998)를 적용하였다. 일반적으로 탄소성해석의 절차과정에서 탄성하중재하구간(stage 1)과 탄성회복구간(stage 3, 5)은 구조물의 강성계수를 동일하게 적용하고 소성단계(stage 2, 4)에서는 강성을 "0"로 계산한다(Tedesco, 1998). 본 연구에서는 위의 탄소성응답과정을 Fortran 언어를 사용하여 응답 프로그램을 작성하였고, 이때 해 수립과정은 Newmark- β 방법을 적용하였다.

2.3 균열 성장평가방법

2.3.1 면내균열모델에 의한 해석법

면내균열모델(smearred crack model)의 특징을 살펴보면, 균열띠(crack band)의 폭은 구조물에서 가장 큰 비균질성 골재의 크기보다 여러 배 더 커야 하며, 균열방향의 함수는 대부분 직교성 거동에 기초해서 균열띠 내에 평균 특성이 사용된다. 균열띠의 폭은 안정적인 해를 보장하기 위해 제한되어야 하지만 면내 균열모델은 계산이 편리하고 요소망의 재설계가 필요하지 않는 장점이 있다. 균열성장은 Fig. 3과 같이 균열폭과 인장강도 f_t 를 구성하는 에너지방출률 G_f 의 크기(면적)와 형태(직선, 포물선 등)에 따라 변한다. 본 연구에서는 콘크리트압축강도에 따라 G_f 크기를 자동으로 계산해 주는 면내균열모델 방법의 ATENA 2D 프로그램(Cervenka, 2000)을 사용하였다. 이 범용 프로그램에 내장된 균열 콘크리트의 구성방정식

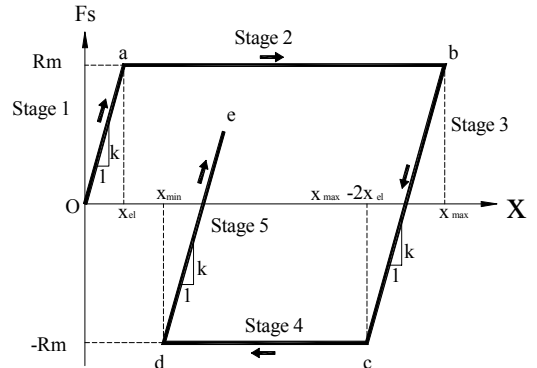


Fig. 2 Elastoplastic Resistance Displacement Relationship

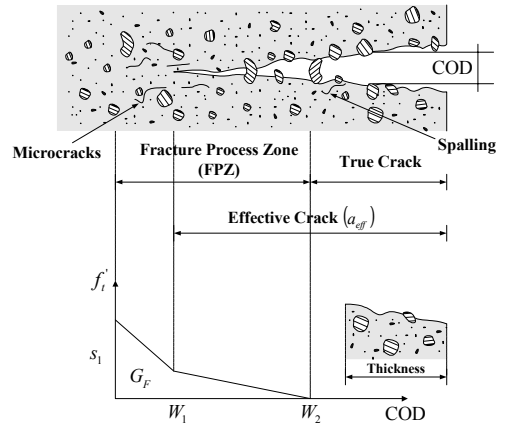


Fig. 3 에너지 방출률 G_f 와 균열폭 관계

은 1981년 Toronto 판 시험의 결과 예측 공모전에 최우수 모델로 선정된 것을 확대 발전시킨 것이다(Cervenka, 1985). 이 프로그램에 대한 자세한 정보는 참고문헌 ATENA(2000)를 참조하면 된다.

2.3.2 이산균열모델에 의한 해석법

이산균열모델(Discrete Crack Model) 방법은 간단한 적용에서는 균열경로가 미리 가정되고, 이 경로가 요소간의 경계와 일치하도록 요소망이 설계된다. 이 모델은 초기 균열발생의 위치와 방향의 결정, 균열 성장 방법, 균열성장 방향 결정 등을 해결하기 위한 문제점이 있다.

이러한 문제점은 최대 인장응력에 기초하여 해결되며, 일단 균열이 정해지면 요소망의 재설계가 필요하고, 균열 선단은 응력특이기가 발생하므로 Fig. 4와 같이 4분점에 절점을 갖는 6절점 등매개 삼각형 특이요소(6 node isoparametric triangle singular element) 또는 초요소(super element)을 사용하여 각 균열 선단에서 응력확대계수 K_I , K_{II} 를 다음 식 (1)과 같이 계산한다(Inggraffea and Manu, 1980). 이때 Fig. 4의 균열선단(crack tip) 주변 요소 내측의 절점번호는 자동 설정되기 때문에 해석시 절분점 번호를 이용하여야 한다.

$$K_I = \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \frac{\mu}{x+1} [4(v_2' - v_4') + v_5' - v_3'] \quad (1a)$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \frac{\mu}{x+1} [4(u_2' - u_4') + u_5' - u_3'] \quad (1b)$$

여기서, μ =포아송비이며, u_i' 는 절점 i 에서의 x' 방향변위이고, v_i' 는 절점 i 에서의 y' 방향변위를 의미한다.

파괴모드 I과 모드 II의 혼합상태의 균열 선단에서 균열의 진행여부를 판단하기 위하여 본 연구에서는 최대 주응력 $(\sigma_\theta)_{\max}$ 파괴기준을 적용하였다. $(\sigma_\theta)_{\max}$ 파괴기준은 균열정점의 응력이 한계값에 도달할 때, 주인장력을 받는 방향의 직각방향으로 균열이 진행된다는 기준이며, 혼합모드에서는 관계식은 다음 식(2)와 같다.

$$\cos \frac{\theta}{2} \left\{ \frac{K_I}{\sqrt{\pi}} \cos^2 \frac{\theta}{2} - 1.5 \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi}} \sin \theta \right\} = K_{IC} \quad (2)$$

여기서, θ 는 균열접선으로부터 반시계 방향각이고, K_{IC} 는 콘크리트의 파괴인성계수(material toughness)이며, 실험을 통해 결정하지 않고 여러 관련 문헌상에 나타나 있는 압축강도 값을 기준으로 $0.8 \sim 2.0 MPa\sqrt{m}$ 를 사용하였다(Elfgren, 1989).

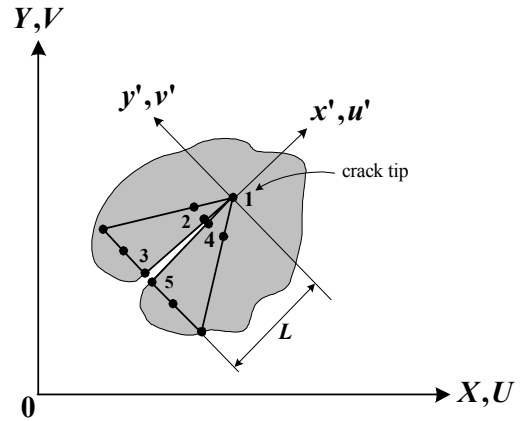


Fig. 4 Node isoparametric triangle singular elements

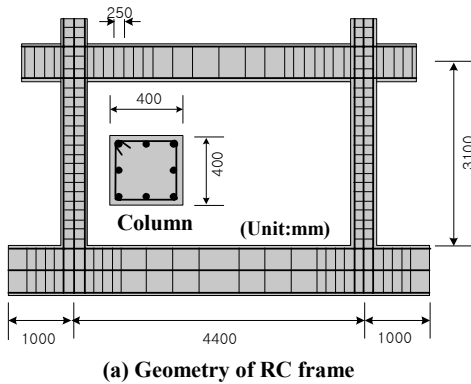
면내 균열 접근법의 재료특성의 변화와 달리 이산균열의 형성은 경계조건이 변하고 균열의 성장은 임계응력확대계수(critical stress intensity factor) K_{IC} 로 구성된 SIF(Stress Intensity Factor) 상관관계에 기초한다. 균열선단(crack tip)의 응력확대계수는 현재 균열속도에서 재료의 임계응력확대계수와 항상 비교된다. 본 연구에서는 이산균열모델 방법은 FRANC2DL 프로그램을 사용하였다. FRANC2DL은 FRANC(a FRACTure ANALYSIS Code, Senson and James 1998)를 보강한 프로그램으로 Cornell 대학의 Inggraffea 등에 의해 개발되었으며 이차원 파괴과정을 이상화하기 위해 설계된 프로그램에 기초한 대화식(interactive) 작업 프로그램이다. 전체적인 요소망 재설계과정은 새로운 균열의 형태를 나타내기 위해 요소망이 자동으로 수정되게 할 수 있다.

3. 동적응답 및 균열상태평가

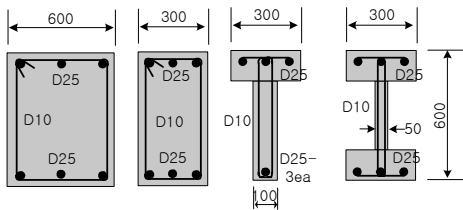
3.1 해석제원

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 일반적인 1층 철근콘크리트 라멘구조물의 제원을 사용하였다.

RC 라멘구조는 수평방향응답에 크게 영향을 받기 때문에 형상(폭, 높이) 변화를 반영하였고, 평면응력(plane stress) 상태로 해석하였다.



(a) Geometry of RC frame



(b) Shape of Beams

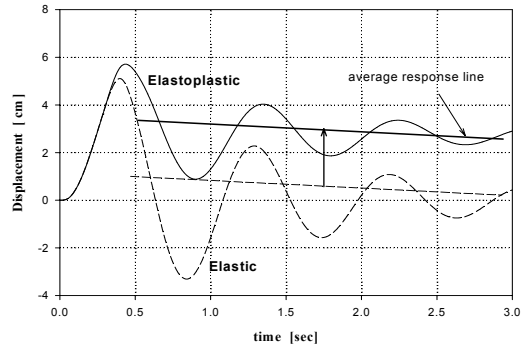
Fig. 5 해석모델

특히 보부재의 균열성장에 대해서는 복부폭 두께에 따라 균열각의 변화를 관찰하기 위해 단면형상변화를 Fig. 5(b)와 같이 복부폭에 따라 직사각형 2개, T형, I형 총 4가지로 구분하였다.

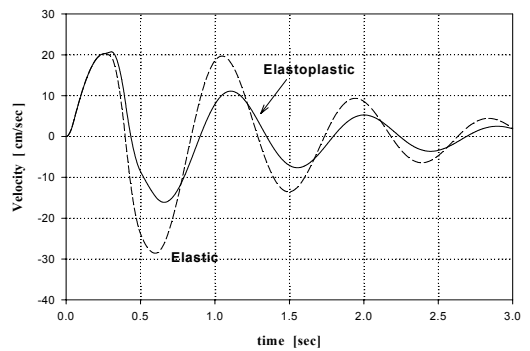
3.2 탄소성상태의 동적 응답

실제 폭발에 의해 계측된 지반가속도 자료 (Fig. 1(b), Tedesco, 1998)를 이용하여 탄소성해석을 수행하였다. 이때 RC 라멘에 소성힌지가 발생하였다고 가정하면 동적구조계는 단자유도계 응답을 할 것이다. 이때 구조물의 질량은 Fig. 6의 직사각형 보 제원으로부터 $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$, 질량 $m = 0.5 \text{ tonf} \cdot \text{sec}^2/\text{m}$ ($= 0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 5.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ tonf}/\text{m}^3 / 9.81 \text{ m}/\text{sec}^2$), 기둥의 합성강성 $k = 10.26 \text{ tonf}/\text{cm}$, 그리고 감쇠비 ζ 는 0.05를 사용하였다.

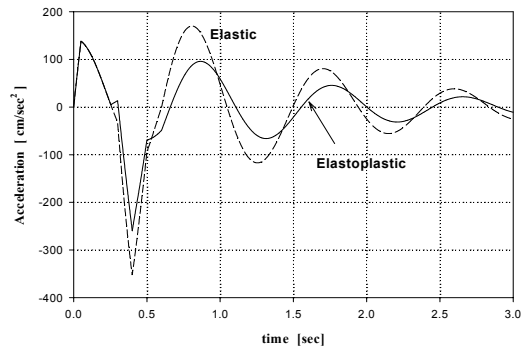
Fig. 6의 결과에서 특이할 만한 사실은, 이론적으로 탄성상태에 있는 경우 구조물 응답변위 진폭은 중앙기준으로 좌우 대칭 감소변위 형상으로 나타났지만, 탄



(a) Response Displacement



(b) Response Velocity



(c) Response Acceleration

Fig. 6. Response of Elastoplastic System

소성상태의 의한 응답변위는 편측 감소형태로 나타난 것이다.

즉, 단성상태 보다 소성상태에 가까운 노후화된 구조물에 횡방향의 극한진동이 작용하면 한쪽방향으로 평균응답변위(average response displacement)가 지배되게 나타나며, 이러한 응답은 극한진동으로 인해 뼈대 구조물의 좌우 흔들림(swaying action) 거동에서 좌우 횡강성 차이로 균열의 특성이 대칭 특성보다 비대칭 특성으로 나타남을 의미한다.

3.3 평상시와의 균열비교

평상시와 횡진동시의 균열형태와 위치를 구별하기 위해 같은 모델에 대하여 하중을 각각 평상시에 유발될 수 있는 연직하중인 자중과 상재하중을 등분포하중으로 작용시켰으며, 극한 진동시에는 보부재에 수평하중으로 작용시켜 비교하였다. Fig. 7의 결과를 보면, 구조물의 균열형태와 위치는 작용하중에 의해 발생하는 전단력과 휨모멘트에 의해 크게 지배됨을 알 수 있다. 이때 초기 균열은 설정하지 않았다.

3.4 강도저감 분석

보부재와 기둥부재의 길이비(H/B)에 따라 횡하중이 작용할 때 구조물의 강도는 다르게 나타난다. 해석

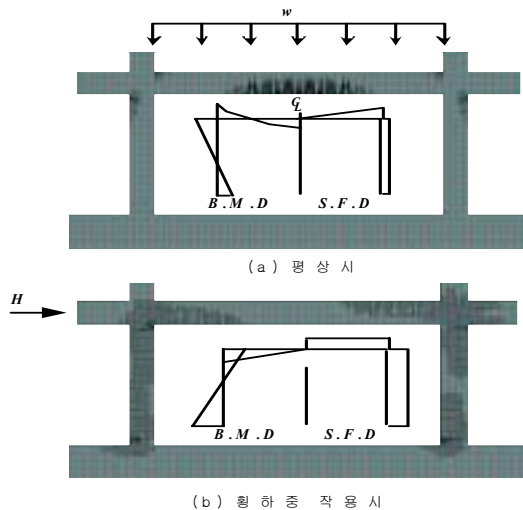
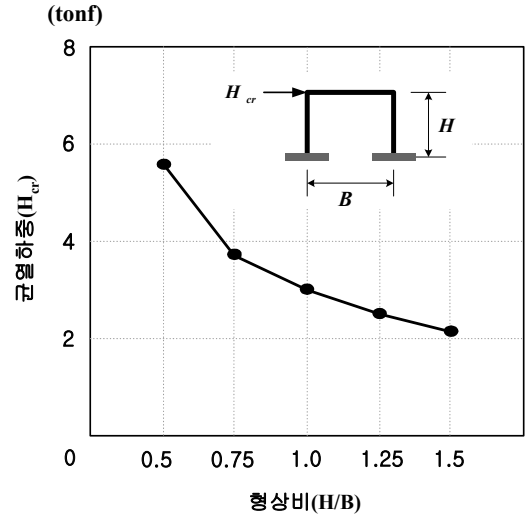
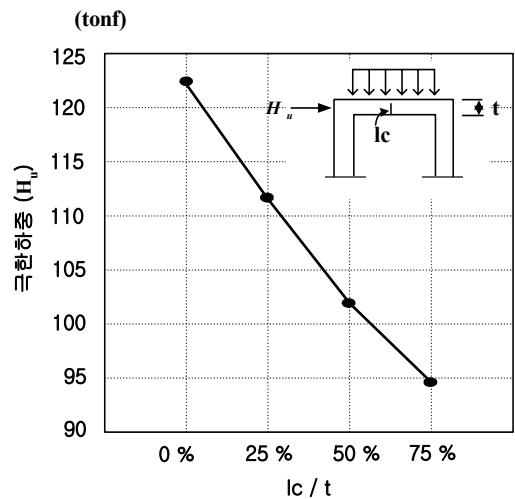


Fig. 7 평상시와 횡하중시의 균열형태 비교

모델에서 기둥부재와 보부재의 길이비를 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5로 변화시켜 횡하중을 작용시켰을 때, RC 라멘에 발생하는 균열하중 H_{cr} 을 Fig. 8(a)에 도시화 했다. 그리고 수직하중에 의한 수직균열이 부재 두께 비에 따라 25%, 50%, 75% 손상으로 구분하여 극한하중 H_u 를 Fig. 8(b)에 도시화하였다.



(a) 형상비에 따른 균열하중



(b) 초기 균열 성장길이에 따른 극한하중

Fig. 8 구조물 형상비와 초기손상에 따른 강도평가

Fig. 8의 결과를 보면, 보-기둥의 형상비(H/B)가 클수록 균열 발생하중은 낮은 하중단계에서 나타났으며, 초기 손상균열의 길이가 클수록 횡하중에 의한 극한강도는 현저히 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 구조물이 가늘고 높을수록 또 손상균열 정도가 클수록 횡하중에 의한 피해가 쉽게 발생됨을 나타낸다.

3.5 단면력 조합에 의한 균열성장 예측

구조물의 기존균열에 미치는 영향을 알아보기 위해 기존 부재에 수직하중에 의해 유발될 수 있는 휨균열과 전단균열을 보 중앙과 단부에 미리 유발시킨 다음 순수 휨과 순수전단 상태의 하중만을 재하시켜 그 영향을 관찰하였다. 이때 사용한 해석방법은 면내균열모델 방법 ATENA 2D를 사용하였다.

Fig. 9에서와 같이 기존균열은 순수휨(M)작용과 순수전단(V)작용에 의해 주인장응력방향의 직각방향으로 새로이 진전되었으며, 기존균열에 의한 응력집중과 작용 부재력의 인장응력으로 인해 균열의 시작도 기존균열의 선단에서 이루어짐을 알 수 있었다. 이것은 구조물에 발생한 초기 균열 성장은 횡력 작용에 의

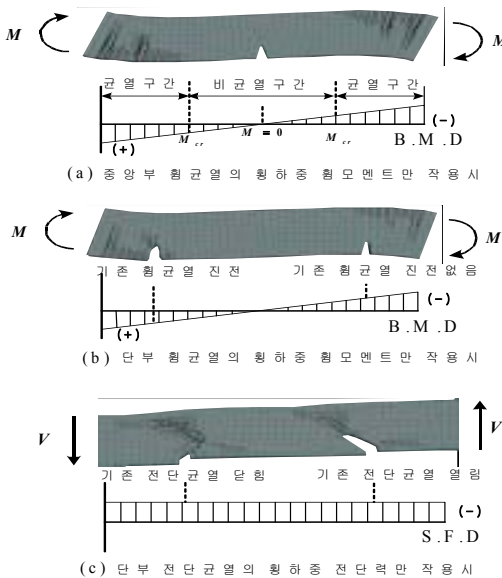


Fig. 9 휨과 전단 손상이 있는 부재의 균열 거동

한 발생 부재력의 기본 조합(M+V)에 의해 균열각의 방향 예측이 가능함을 의미한다.

3.6 SIF에 의한 균열각 예측

3.6.1 휨균열의 횡하중에 의한 변화

평상시 하중이 작용할 때 상대적으로 부모멘트 측보다 정모멘트 구간의 균열이 쉽게 육안 노출되기 때문에, 초기 균열을 Fig. 6의 RC 라멘의 보(b 단면) 중앙 하단에서 중립축까지 발생하였다고 가정하였다. FRANC2D/L 프로그램은 횡변위 효과에 의한 전단력 작용과 균열선단의 응력 집중으로 인해 수직방향의 초기균열의 진행경로가 Fig. 10(b)와 같이 진행하여 균열선단 주위의 요소재생성 과정이 필요하게 된다. 이러한 이산균열모델의 요소 재생성과정을 Fig. 10(c), (d)와 같이 나타내었다.

이때 균열선단(crack tip)에서, 식(6)에 의해 계산된 K_I , K_{II} 와 실험적 상수 K_{IC} 식(7)의 $(\sigma_\theta)_{max}$ 파괴기준에 의해 작성된 Fig. 11의 SIF(stress intensity factor)의 상관도를 통해 균열각 전진여부와 방향각을 예측할 수 있다. 즉, 균열선단의 K_I , K_{II} 에 의한 값이 상관도 아래에 있으면 균열은 감소되지만 상관도 위에 있으면 균열은 가속된다.

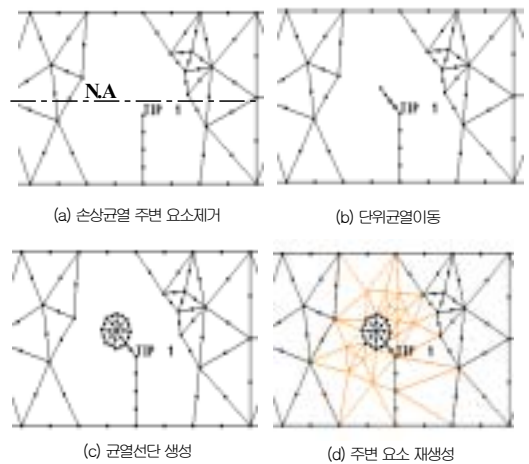


Fig. 10 균열선단의 요소 재생성

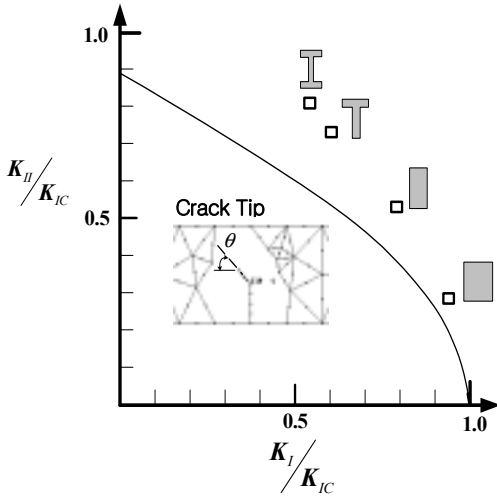


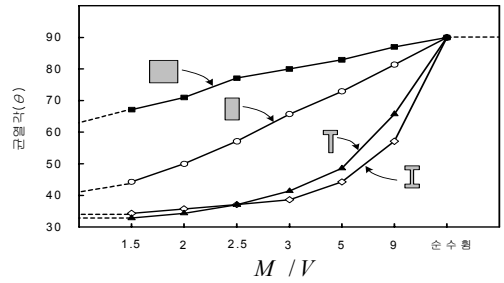
Fig. 11 SIF 상관도에 의한 균열각 평가

또한 식(7)의 혼합모드 상관식에 의해 균열각이 평가된다. 현재 선단균열은 파괴모드 I (opening mode)과 파괴모드 II (sliding mode)가 혼합되어 경사진각으로 균열이 성장하고 있음을 알 수 있다.

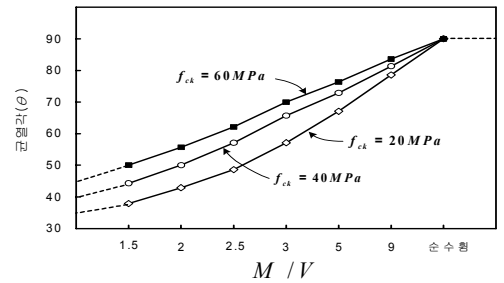
면내균열모델방법인 Fig. 9와 비교하여 특이할만한 점은 횡하중에 의한 전단력 발생으로 초기 균열선단의 각의 경로가 Fig.9(c)와 일치하는 경향이 나타난 것이다. 이를 통해 두가지 해석방법 모두, 균열이 평상시 작용하중에 의한 것과 다른 경로의 균열로 발생했다면 그 균열 진행각의 변화를 통해 극한진동 등의 횡하중 작용여부를 판단할 수 있었다.

RC 라멘에 작용하는 횡하중 H에 의해 발생하는 단면 휨모멘트 M와 단면 전단력 V의 성분으로 균열각을 부재의 단면과 콘크리트의 강도를 변화시켜 비교하여 보았다. Fig. 12(a)과 같이 단면을 정사각형단면, 직사각형단면, I형 단면, T형 단면으로 구분하였고 콘크리트 강도의 변화를 20 MPa, 40 MPa, 60 MPa로 변화시켜 모멘트-전단력비(M/V)에 따른 발생균열각의 변화를 비교하였다.

Fig. 12의 결과에서 보듯이 단면의 형상이 휨지배 단면이고 모멘트의 영향이 클수록 균열은 수직에 가까웠으며(40 MPa 기준), 고강도 일수록 균열각이 커짐을 알 수 있었다(T형 단면기준).



(a) 단면형상에 따른 균열각 비교



(b) 콘크리트 강도에 따른 균열각 비교

Fig. 12 M / V 에 따른 균열각의 변화

3.6.2 전단균열의 횡하중에 의한 변화

RC 라멘의 보 단부에서 유효깊이 d 만큼 떨어진 지점이 전단위험단면이므로 이곳에 45° 경사전단 균열을 중립축까지 발생하였다고 가정하여 B/H에 따라 휨균열 평가와 동일하게 횡하중을 작용시켰다. 이때 구조물의 폭 B를 주인자로 선택한 이유는 전단지간이 클수록 횡방향역에 의한 전단력이 크게 발생하기 때문이다.

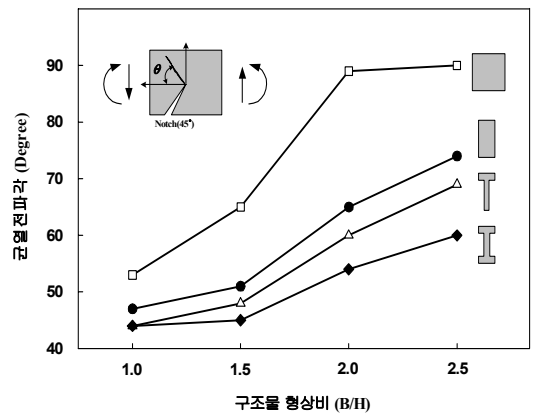


Fig. 13 형상비에 따른 선행균열(45°)의 전파각

Fig. 13의 결과를 보면, 형상비에 따라 초기 전단 균열각은 복부 폭이 작은 I형 단면에서 그리고 B/H가 1.5 보다 작을 때 각 변화가 낮게 나타났다.

4. 결 론

극한 진동 상태에 의해서 피해가 발생하기 쉬운 횡하중 작용상태로 가정하여, RC 라멘 구조물에 비선형 진동해석과 균열성장예측의 손상평가를 해석에 의해서만 수행하여 다음과 같은 결론을 정리하였다.

- 1) 극한 진동에 의해 횡변위가 발생하기 쉬운 RC 라멘 구조물은 탄성상태에서는 대칭변위응답을 보였지만, 탄소성상태에 있는 구조물은 편측 변위응답으로 발생하였다. 이를 통해 발파 등의 극한진동이 발생하였을 경우 구조물에 나타나는 균열은 구조물의 상태에 따라 비대칭적으로 나타날 수 있다고 판단된다.
- 2) 평상시 하중조건과 횡하중하중 조건에서 발생균열은 발생 부재력의 조합에 따라 발생하였다. 그리고 초기 휨과 전단 손상을 두어 단면형태, 압축강도, 형상비로 해석한 결과, 균열각의 변화가 발생하는 것을 통해 구조물에 극한 진동의 피해 유무를 판단할 수 있었다.
- 3) 균열각 평가에서 주로 M/V 효과만을 분석하였으나, 향후 축력과 상호작용을 반영한 해석이 필요하며, 실험적 자료와 검증이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2001년도 전남대학교 학술연구비의 지원을 받은 “발파진동으로 인한 콘크리트 구조물의 균열전파 특성 연구” 결과의 일부분으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 변근주, 송하원, 최욱, 우승민, “콘크리트 구조물의 균열 평가 기법과 보수·보강”, 콘크리트학회지, 제12권, 제6호, 2000.
2. 김우, 정계평, 이명곤, “발파진동으로 인한 콘크리트 구조물의 균열전파특성”, 한국구조물진단학회 가을학술발표논문집, 제9권, 제6호, 2002.
3. Charles, H. D., "Blast Vibration Monitoring and Control", PRENTICE HALL, 2000.
4. Tedesco, J. W., "Structural Dynamics theory and applications", ADDISON-WESLEY, 1998, pp.517-522.
5. Paulay, T. "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", John Wiley and Sons, inc.
6. Cervenka, V. (1985), "Constitutive Model for Cracked Reinforced Concrete," ACI Journal, 82(6), pp. 877-882.
7. Cervenka, V. (2000), ATENA Program Documentation, Cervenka Consulting.
8. Senson, D. and James, M. (1998) "FRANC2D/L: A Crack Propagation Simulator for Plane Layered Structures", Kansas State University, Manhattan, Kansas.
9. Ingraffea, A. R. and Manu, C. (1980) "Stress Intensity Factor Computation in Three Dimension with Quarter Point Element", International Journal for the Numerical Methods in Engineering, Vol. 153, pp.1427-1445
10. Elfgren, L. (1989) "Fracture Mechanics of Concrete Structures from Theory to applications-chap. 15 Dams", Chapman and Hall, London, pp. 417

(접수일자 : 2003년 7월 22일)