

Fragility Method를 적용한 성능기반형설계기법의 개발

Development of Performance Based Design Method based on Application of Fragility Method

김장호* 이 정** 박정호** 김윤호** 이경민**
 Kim, Jang Ho Li, Jing Park, Jeong Ho Kim, Yun Ho Lee, Kyong Min

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop Performance Based Design Method based on application of Fragility Method. Fragility Method has been used in predicting failure of structure due to seismic action. However, development of Fragility Curve based on material or construction for PBD is developed, This paper suggests that Fragility Method can be modified for PBD and can assess the performance of concrete material or construction.

1. 서 론

콘크리트 구조물을 설계하기 위한 설계기준은 1902년 영국에서 처음으로 개발하여 사용한 이후 세계 각국에서 나라별 또는 지역별로 개발하여 사용하고 있다. 그러나 종래의 설계법은 다음과 같은 간과할 수 없는 문제가 있다. (1) 허용응력설계법(WSD)의 경우 설계계산이 매우 간편한 반면, 부재의 강도를 알기 어렵고, 파괴에 대한 두 재료의 안전도를 일정하게 하기가 곤란하며, 성질이 다른 하중들의 영향을 설계에 반영할 수 없다는 단점이 있다. (2) 극한강도설계법(USD)의 경우 서로 다른 재료의 특성을 설계에 합리적으로 반영하기 어렵고, 사용성(처짐, 균열 등)의 확보를 별도로 검토해야 한다.

(3) 한계상태설계법(LSD)의 경우 하중 작용이나 재료 강도등에 관한 통계 자료가 충분히 있어야 한다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에 이르러 성능기반형 설계기준 개발에 관심을 갖기 시작하였으며, 특히 유럽 각국을 중심으로 연구되어 왔다. 그 결과로 노르웨이 등 일부 국가에서는 국가 차원의 설계기준으로 이 개념을 도입하고 있다. 성능기반형설계법(PBD)은 WSD, USD, LSD 등 기존 설계법의 단점을 보완한 내용을 포괄적으로 포함하여 최적화된 설계를 하는 것에 목적을 두고 있다. 그림 1은 성능기반형설계법(PBD)의 개념을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 콘크리트 재료 및 시공에 대한 기대성능을 선정 한 후 이 성능에 영향을 미치는 주요 인자들을 Fragility Method로 분석하는 방법을 사용한 성능기반형설계법

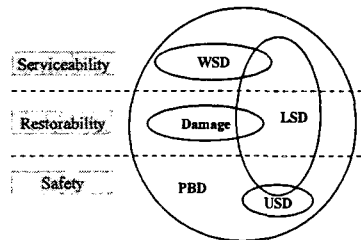


그림 1 Concept of Performance-Based Design Philosophy

* 정희원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수 (E-mail : jjhkim@sejong.ac.kr)

** 정희원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

(PBD)을 제시한다.

2. 성능기반형설계법(PBD)의 개념

구조물 설계 시 고려하는 하중 조건들은 사하중, 활하중, 풍하중 등 여러 가지가 있다. 그러나 각 국가에서 이러한 하중 조건들을 조합하여 설계에 반영할 경우 지역, 위치, 환경(계절, 온도 등) 등 상황별 특성들을 고려하지 못하고 설계에 반영하는 경우가 일반적이었다. 성능기반형설계법(PBD)은 각 국가의 지역별 상황들을 고려하여 모든 하중 조건들을 조합하고, 각 지역별 하중 조합에서 경제적이고, 체계적인 최적화의 하중 조합을 유도하는데 주안점을 두어야 한다. 즉, 콘크리트, 시멘트, 골재, 철근 등 각 국가의 지역별 특성에 따라 차이점이 있는 재료들의 특성들을 비교·분석하여 재료의 특성에 등급을 두어 체계화하고, 그 재료 특성에 맞는 설계방안을 고려하여 설계를 하는데 주안점을 두어야 한다. 또한, 거푸집 콘크리트 타설 절차, 철근배근 등과 같은 시공요인들의 국가별, 지역별 차이점에 대해 비교·분석하여 경제적이고 체계적인 최적화 요인을 선택하여 설계에 고려하는 것이 성능기반형설계법(PBD)의 개념이다. 그림 2는 성능기반형설계법(PBD)의 설계개념을 재료 및 시공과 관련하여 한 예제로써 나타낸 것이다.

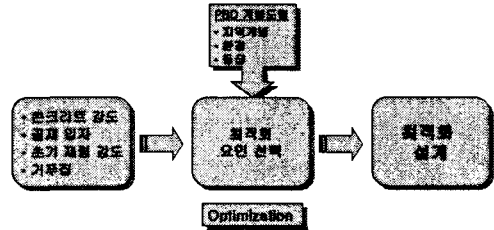


그림 2 성능기반형설계법(PBD)의 설계개념의 예

3. Fragility Method의 개념

Fragility Method 이론은 M. Shinozuka(1998) 등이 개발한 지진 하중에서의 구조물 손상평가 방법으로써 California에서 발생한 지진으로 인해 파괴된 교량을 조사·평가하여 구조물의 안전성을 평가하였다. 구조물의 안전성을 해석할 때 여러 손상 단계에 따른 구조요소의 취약성을 평가할 필요가 있는데 이 때, 외력의 규모, 구조물의 특성 등 예측의 불확실성이 내재하는 경우 그 취약성을 평가하는 방법이다. 즉, 구조물에 외력이 가해졌을 때 그 외력으로 인한 구조물의 손상상태나 구조물의 특성에 의한 손상상태 등을 확률분포로 나타낸 것이다. 따라서 불확실성의 과학적인 적용을 이끌어 내야하는 성능기반형설계법(PBD)에 적용하기에 알맞은 방법으로 판단된다.

3.1 Fragility Method의 적용방법과 Formula

Fragility Curve는 2변수 대수정규분포 함수의 형태로 나타낼 수 있으며 중앙값과 대수 표준 편차는 Maximum Likelihood를 이용하여 구할 수 있다. 외력인자가 지진일 경우, Peak Ground Acceleration과 Peak Ground Velocity, Spectral Intensity 등을 대상으로 구하며 구조물의 특성에 따라 손상상태가 달라질 것을 예상하여 Fragility Method를 도출해낼 수 있다.

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{1-x_i} \quad (1)$$

매개 변수를 구하는 Likelihood Function은 (1)식과 같다. 여기서, F()는 특정상태의 손상에 대한 Fragility Method를 나타내며, a_i 는 i번째 대상구조물에 대한 구조요소의 특성 값(Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity 등)이며 $x_i=1$ 과 0은 구조요소의 특성 값이 a_i 이하일 때 구조물의 손상여부를 표시하고 N은 대상 구조물 전체의 수이다. 이 때, Lognormal Distribution, Normal Distribution 등 상황에 적합한 방법을 선택하여 사용할 수 있다. Lognormal Distribution을 가정하면, F()는 (2)식과 같다.

$$F(a) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{a}{c}\right)}{\zeta}\right) \quad (2)$$

이 때, $\Phi()$ 는 표준화 정규분포함수이다. 매개 변수 c, ζ 는 L 을 최대로 하기위해 $\ln L$ 을 최대로 하는 (3)식을 이용하여 구한 c_e, ζ_e 를 사용한다.

$$\frac{d \ln L}{dc} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (3)$$

4. 성능기반형 설계 기준의 기본 개념

구조물 설계의 기본 개념은 소요 강도가 요구 강도보다 크거나 같아야만 한다는 것이다. 이와 같이, 성능기반형 설계 기준 역시 소요 값이 요구 값의 이상이 되어야 한다. 즉,

$$\sum \text{소요(필요) 값} \geq \sum \text{요구 값}$$

이다. 이 때, 소요 값은 앞서 설명했듯이, Fragility 개념을 활용하여 구하고, 요구 값은 사회성, 경제성, 기술력, 지역 환경 등과 같은 여러 가지 조건들을 고려하여 thras-hold value로 선정한다. 예를 들면, 사회성을 고려하여 선정할 parameter가 α_1 , 경제성을 고려한 parameter가 α_2 , 기술력에 대한 parameter는 α_3 , 지역 환경 parameter가 α_4 , 구조물 특성의 parameter가 α_5 로 선정 되었다면, 이러한 parameter들을 모두 고려하여 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\sum \text{소요(필요) Technique} \geq \sum \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \dots$$

그림 5는 재료특성과 시공특성에 대한 성능기반형설계법(PBD)을 Fragility Method에 도입한 흐름도이다.

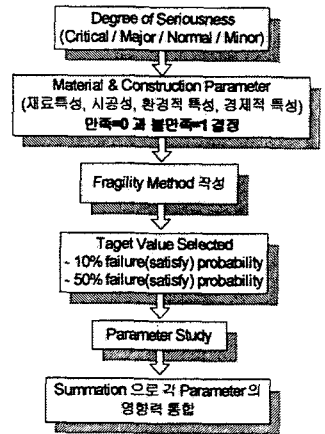


그림 3

성능평가형설계법(PBD)을 Fragility Method에 도입한 흐름도

5. 결과 및 분석

5.1 주요 Parameter 선정

각 구조별로 환경에 적합한 성능 순위를 정할 필요가 있다. Parameter 선정 시, 부재, 환경, 경제성, 사회성 등을 고려해야 한다. 선정된 Parameter는 실험, 해석, 경험 등에 의해 구축된 자료를 활용하여 검토할 수 있다. 본 연구에서는 재료에 대한 Parameter 선정을 위해 타 연구자들이 수행한 콘크리트 블리딩 실험으로부터 얻어진 실험결과와 data들을 이용하였다. 표 1은 Parameter 선정 시 이용된 배합사항을 나타내었으며 그림 5는 Parameter 선정 시 이용된 w/c별 단위수량 변화에 따른 슬럼프를 나타낸 것이다.

타 연구자들이 수행한 실험으로부터 얻어진 결과 data인 표 1과 그림4를 이용하여 Fragility Curve를 도출하였다. Fragility Curve를 2변수 대수정규분포함수의 형태로 나타냈고, 중간 값과 대수 표준 편차는 Maximum likelihood 방법에 의해 구하였으며, Fragility Curve가 교차하지 않도록 대수 표준 편차를 같은 수로 추정하였다.

표 1 Parameter 선정에 이용된 배합사항

w/c (%)	단위수량 (kg/m ³)	잔골재율 (%)
40	155	37
	165	38
	175	39
	185	41
50	155	38
	165	39
	175	41
	185	43
60	155	41
	165	42
	175	43
	185	45

5.2 Fragility 개념의 활용

위에서 설정한 Parameter들을 체계적으로 정리 및 사용하기 위하여 Fragility 개념을 활용하였다. Fragility는 통계분포를 포함한 개념으로써 요구조건인 만족, 불만족을 0 또는 1로 각각 나누어 결정할 수 있으며 이러한 통계 개념을 이용하여 성능과 안전성을 검토 하였다. Fragility 개념을 도입한 성능기반형설계법(PBD)은 구조물이 안전 할 경우 0을 부여하고 불안전 할 경우 1을 부여하므로 구조물의 안

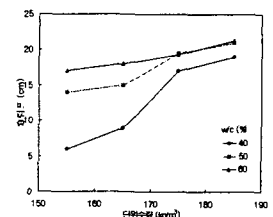


그림 4 단위수량 변화에 따른 슬럼프

전 계수 값 또는 thras-hold value는 0과 1 사이의 값이 선정된다. 이러한 경우 구조물의 특성상 병원이나 교량 같은 주요 구조물은 0에 가까운 값이 thras-hold value로 선정되어야 하며 방파제나 도로와 같이 일반 토목 구조물은 1에 가까운 값을 선정한다. 본 연구에서는 단면이 큰 무근의 부재에서는 슬럼프를 2~5cm, 철근 콘크리트 벽이나 기둥에서는 15cm 정도가 적당하다는 이론 하에 분석하였으며 그림 5에 그 결과를 나타내었다.

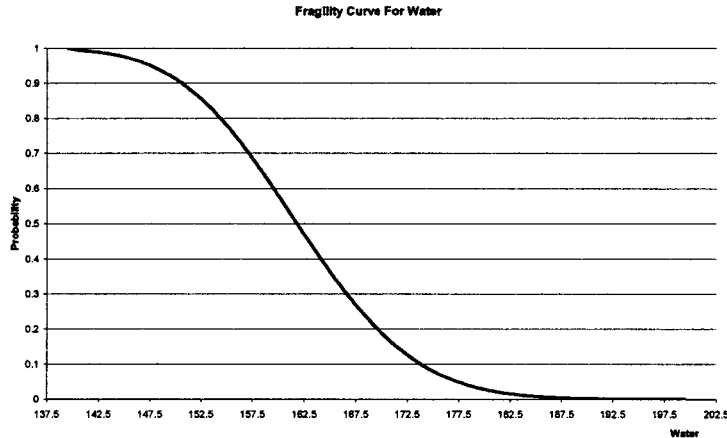


그림 5 Fragility Curve

6. 결 론

이 예제를 통해 주로 지진하중에 대한 구조물 안전성 평가로 사용되던 Fragility Method를 성능기반형설계법 (PBD)을 위한 콘크리트 재료 및 시공 성능평가에 적용 가능함을 보여주었다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 지원하는 Hybrid FRP Rod 자가모니터링 시스템의 해석 및 설계기술개발 과제이며 이 연구를 가능케한 건설교통부에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상훈, 김두기, 서형렬, 김종인 (2003) "내진보강 된 콘크리트 교량의 손상도 곡선", 대한토목학회 2003년도 정기학술대회 논문집, pp.787-790.
2. 변근주, 송하원, 홍성걸, 김장호, (2005) "성능 평가형 콘크리트의 제조 및 시공 기법", 한국콘크리트학회
3. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K., Ueda, T. (2002) "Statistical Analysis of Fragility Curves", Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA.
4. Dutta, A. & Mander, J.B. (2002) "Rapid and Detailed Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges", Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA.
5. Kreyszig, E., Ohio State University at Columbus, "Advance Engineering Mathematics" Fourth edition, Ohio, USA., pp.879-884, pp.929-931.
6. Schaum, Murray R. Spiegel, "Mathematical Handbook of Formulas and Tables", pp.189, pp.259.
7. The Standard Specification for Materials and Construction of Concrete Structures in JAPAN-LEVEL3 Document.