원자력발전소 강구조물의 내진성능평가 방법론

Method of Seismic Capacity Analysis of Steel Structure in Nuclear Power Plant

이동원* · 임남형**

Lee, Dongwon*, and Lim, Namheoyng**

Abstract

A steel structure in a nuclear power plant is typically constructed next to major safety-related structures. Accordingly, the structural integrity of the steel structure must be achieved until the safety-related building is damaged by external forces. Consequently, the steel structure should have seismic capacity while maintaining the structural integrity of the surrounding safety-related structure. An optimized method for the seismic capacity against the beyond design earthquake was developed to reflect this capacity concept.

Key words : Seismic Capacity, Steel Structure, Nonlinear Energy Absorption

요 지

원자력발전소의 강구조물은 안전관련 구조물 옆에 위치하도록 설치되어 있다. 이에 강구조물은 외력에 의해 안전관련 건물이 파손되기 전까지 구조적 건전성을 확보해야 한다. 즉, 강구조물은 주변의 안전관련 구조물의 구조적 건전성을 유지하는 동안 내진성능이 확보됨을 확인해야 한다. 이러한 성능개념을 고려하기 위해서 설계초과지진에 대한 내진성능의 최적화된 방법론을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 내진성능, 강구조물, 비탄성에너지 흡수

1. 서 론

원자력발전소의 강구조 건물은 일반적으로 안전정지 기능과 관련 없는 비안전 발전설비들을 설치할 목적으로 건설되며, 지진과 같은 외력으로 파손될 경우 안전관련 구조물에 영향을 주지 않도록 설계된다. 구조물은 일반적으로 설계, 분석 또는 재료물성치 설정에 있어 상당한 보수성이 있다고 알려져 있다(EPRI 3002012994, 2018). 이러한 이유로 실제 해외 지진사례를 보면 설계 초과 지진이 발생하였음에도 불구하고 발전소는 전혀 피해를 입지 않았음을 확인할 수 있다. 원자력발전소의 강구조물의 경우 상대적으로 큰 비탄성능력을 보유함에도 불구하고, 발전소 안전 설비가 설치되어 있지 않아 과거에는 전문가 판단과 경험자료를 이용하여

보수적인 내진성능만을 계산하여도 충분하다고 알려져 있었다(EPRI 3002012994, 2018). 또한, 발전소 주변의 부지 지진은 발전소 안전을 위협만큼 큰 재현주기를 갖고 있지 않아서 보수적인 평가 결과를 활용하여도 발전소 안전성평가 결과에 영향을 주지 않는다고 전문가들은 공통된 견해를 갖고 있었으나, 최근 후쿠시마 사고 이후 각국의 원자력발전소들의 지진재해도를 재분석한 결과 설계 시 고려한 값보다 큰 지진이 발생할 확률이 도출될 가능성이 있어 원자력발전소의 안전성평가는 보수성을 가능한 제거한 사실적인 평가가 필요함을 인식하게 되었다. 따라서, 본 논문에서는 설계의 보수성들을 평가에 반영할 수 있는 방법을 정리하였으며, 강구조물 구조해석 모델을 활용하여 본 논문에서 제안한 내진성능평가 방법론의 검증 분석을 수행하였다.

*정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: mioso@cnu.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

**교신저자, 정회원, 충남대학교 토목공학과 정교수(Tel: +82-42-821-7749, Fax: +82-42-821-8867, E-mail: nhrim@cnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

2. 본 론

내진성능평가는 설계에 내재된 보수성인 하중 조합, 비탄성에너지흡수 능력, 설계식 그리고 재료 물성 등을 평가하여 수행한다. 내진성능은 발전소 안전성평가 목적에 따라 다음과 같이 두 가지 평가방법으로 나눌 수 있다 (EPRI 3002012994, 2018).

- 결정론적안전성평가: 설계식과 동일한 확률 수준인 84% 비초과 내력식을 이용하여 발전소가 어느 수준의 지진까지 견딜 수 있는지를 평가하는 방법론
- 확률론적안전성평가: 중앙내진성능식과 확률분포의 변동계수를 이용하여 발전소가 지진에 얼마나 위험한지를 평가하는 확률론적안전성평가방법론

2.1 내진성능평가식

내진성능은 Eq. (1)과 같이 설계식의 보수성을 구하는 강도계수와 응답의 사실적 고려를 위한 비탄성에너지흡수 계수로 구성된다.

$$F_C = F_S \cdot F_\mu \quad (1)$$

여기서, F_C 는 내진성능계수, F_S 는 강도계수, F_μ 는 비탄성 에너지흡수계수를 의미한다.

2.1.1 강도계수

강도계수 F_S 는 평가지진과 탄성성능과의 비로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_S = \frac{C - D_{NS}}{D_S + \Delta C_S} \quad (2)$$

여기서, C 는 지진파손모드와 관련된 탄성성능, D_S 는 평가 지진(Reference Earthquake, RE)에 의한 탄성 요구력, D_{NS} 은 비지진 요구력, ΔC_S 은 지진하중에 의한 성능감소분을 의미한다(Fig. 1 참조).

Fig. 1. Elastic Strength Factor (FS)

과거에는 원자력발전소 강구조물의 내진성능(C)을 구하기 위해 설계에 내재된 보수성을 고려하지 않고 설계 결과의 안전율을 그대로 활용하였다. 그러나 최근 국내외 지진 발생 가능성이 높아져 보다 사실적인 내진성능평가가 필요하게 되었다. 이를 위해 성능의 보수성과 관련된 계수는 설계식 작성시 고려한 아래 요소들의 자료를 활용하여 정리할 수 있다.

- 모델링: 발전소 운전환경의 불확실성을 고려한 설계 모델의 보수적인 가정
- 재료물성: 시방서의 시험값보다 낮은 재료 물성
- 단면계수: 부재 단면의 보수성
- 성능증가계수: ASD와 LRFD 차이에 의한 성능계수

2.2 내진성능(C)

참고문헌 NBS-SP 577 (1980)에는 여러 시험자료를 이용하여 설계식 및 하중조합 방법을 제시하였다. 또한, 대수정 규분포의 특성에 따라 개별 확률분포들의 조합은 각각의 변수들의 곱인 Eq. (3)과 같이 표현하고 있으며, 이는 내진성능평가 기본식과 동일한 표현 방식이다.

$$C = F_n \cdot (F_m F_p F_S) \quad (3)$$

여기서, F_n 은 공칭저항력 계수, F_m 은 모델 정확도 계수, F_p 는 재료물성 계수, F_S 는 단면형상 계수를 의미한다.

2.2.1 중앙 강도 계수

중앙강도계수는 설계식, 재료물성, 모델링 및 설계시방서 허용응력의 차이에 따른 보수성의 평균값들과 변동계수로 구분하여 나타낼 수 있다.

$$C_m = F_n \cdot (F_{mm} F_{pn} F_{sn}) \quad (4)$$

$$V_C = \sqrt{V_{mm}^2 + V_{pn}^2 + V_{sn}^2} \quad (5)$$

2.2.1.1 중앙 설계식 계수

본 논문에서 제시한 강도식은 방대한 자료로 인해 제한된 자료를 활용하여 설계식 도출시 활용한 동일한 방법으로 식 정리를 하였다(AISC, 1978). 강재의 통계적 저항력은 Ravindra and Galambos (1978)을 참고하였다. 강구조물의 재료 단면계수는 그 보수성을 고려하기가 어렵다고 판단하여 별도의 보수성 계수는 제안하지 않았지만, 내재되어 있는 보수성을 최소한으로 고려하여 변동계수를 Eq. (6)과 같이 제시하였다.

$$F_{sm} = 1.0, V_{F_s} = 0.05 \quad (6)$$

2.2.1.2 중앙 재료물성 계수

설계시 고려한 재료물성과 실제 시공전 재료 시험값의 차이는 실제 내진성능의 보수성으로 고려될 수 있다. 이를 위해 Table 1 (Galambos and Ravindra, 1978; AISI, 1978; Fisher et al., 1978)에 제시된 특성을 참고하여 통계적인 재료물성치의 시험값을 요약하였다.

2.2.1.3 중앙 모델링 계수

모델 보수성은 설계시 시공과 동일하게 모사하기 어렵기 때문에 고려되나, AISI (1978), Yura et al. (1978) 및 Bjorhovde et al. (1978)에 참고하여 인장부재 및 연결부는 변동성이 없다고 가정하고 Table 2와 같이 참고하여 모델 보수성 계수를 정리하였다.

2.2.1.4 중앙 내진성능 계수

앞서 정리한 강구조 요소의 중앙내진성능계수 및 변동계수를 Table 3에 부재요소별로 요약하였다.

Table 3에 제시된 강도식은 파손확률이 50%인 중앙값을 의미하며, 변동계수는 대수정규분포의 분포값을 나타낸다. Table 3의 강도식은 발전소의 확률론적 안전성분석에 활용

Table 1. Material Property for Steel Element

Property	Mean, F_{pm}	Factor	V_{F_p}
Static Yield Stress, Flanges	1.05 F_y	1.05	0.10
Static Yield Stress, Webs	1.10 F	1.10	0.11
Moduli of Elasticity	E or G	1.00	0.06
Static Yield Stress in Shear	$1.11 F_y / \sqrt{3}$	1.11	0.10
Poisson's Ratio	0.3	1.00	0.03
Tensile Strength of Steel	1.10 F_u	1.10	0.11
Tensile Strength of Weld, σ_u / F_{EXX}	1.0 F_{EXX}	1.05	0.04
Shear Stress of Weld, τ_u / σ_u	0.84 σ_u	0.84	0.10
Fillet Welds	1.05 x 0.84 σ_u	0.88	0.11

Table 2. Modeling Statistics

Type Element	Model	F_{mm}	V_{mm}
Tension Members	$A_n F_y$, $A_n F_u$	1.00	0
Connectors (Welds, HSS Bolts)	-	1.00	0
Fillet welds	-	1.00	0

되며, 결정론적 분석을 위해서는 강도계수를 84% 비초과식으로 변환하여 활용하여야 하며 이는 설계식의 강도저감 계수 개념과 동일하게 Eq. (7)로 변환하여 적용 가능하다.

$$\Phi_{CDFM} = e^{-\beta_{EQN} \cdot U} \quad (7)$$

2.3 성능증가계수

ASCE/SEI 43-05 (2005)에 따르면 설계시방서에 따라 허용응력은 차이가 있으므로, 허용응력설계법과 한계상태 설계법의 차이를 고려하여 허용 강도를 추가적으로 Table 4와 같이 고려할 수 있다.

2.4 인장 내진성능 식

Tables 3 and 4를 정리하면 84% 비초과 확률수준의 인장강도는 Eqs. (8), (9)과 같이 정리 가능하다.

Yield:

$$T_{a84\%} = \Phi \cdot K_C \cdot F_{EQ} \sigma_y A_s, \quad \phi = e^{-0.112} \approx 0.90 \quad (8)$$

Ultimate:

$$T_{u84\%} = \Phi \cdot K_C \cdot F_{EQ} \sigma_u A_s, \quad \phi = e^{-0.112} \approx 0.90 \quad (9)$$

2.5 압축 내진성능 식

AISI (1978)의 평균 허용응력은 강재 시험 결과에 근거를 두고 중심 축하중을 받는 기둥의 극한강도를 결정하는 공식을 유도하였다. 관련 보고서에는 현재 설계에도 적용되고 있는 Eqs. (10), (11)의 안전율(F.S)과 시험값들로 계산된 중앙값 및 분포계수를 제시하고 있다.

Table 3. Factor of Median Capacity Equation

Type Element	$F_{EQ} = F_{mm} F_{pm} F_{sm}$	V_m
Tension Member, Yield	1.05	0.112
Tension Member, ultimate	1.10	0.112
Columns	1.2	0.130
Fillet welds	0.88	0.121

Table 4. Conversion Between ASD and Strength-Based (LRFD) Capacity (ASCE/SEI 43-05, 2005)

Component		ASD FS	$K_C = C_{LRFD} / C_{ASD}$
Bending and Shear		1.5~1.67	1.4
Axial Compression		1.67~1.92	1.5
Axial Tension	Yield	1.67	1.5
	Ultimate	2	1.5

$$1) \frac{KL}{r} \leq C_c \text{ 일 경우}$$

$$F_a = \frac{[1 - \frac{1}{2} * (\frac{KL/r}{C_c})^2] \cdot F_y}{F.S} \quad (10)$$

여기서, $F.S = \frac{5}{3} + \frac{3}{8}(\frac{KL/r}{C_c}) - \frac{1}{8}(\frac{KL/r}{C_c})^3$ 이며, 이때 F_a 는 허용응력, F_y 는 정적응력, K 는 유효 비지지길이 계수, C_c 는 제한된 세장비, E 는 탄성계수를 의미한다.

$$2) \frac{KL}{r} \geq C_c \text{ 일 경우}$$

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \quad (11)$$

$$F_{am} = F_{am} \cdot K_C \cdot F_{EQ} \quad (12)$$

여기서, F_{am} 은 평균 기동 성능, F_{am} 은 공칭 기동 성능, F_{EQ} (Table 3 참고)는 중앙성능식계수, K_C 는 성능증가 계수를 의미한다.

Eq. (12)를 다시 정리하면 다음과 같이 중앙식과 CDFM 내력식을 Eq. (13) ~ Eq. (15)와 같이 정리할 수 있다.

$$\text{Median: } C_m = 1.20 F_{am} \quad (13)$$

$$\text{Variable: } V_{C_m} = 0.13 \quad (14)$$

$$84\%: C_{84\%} = \Phi \cdot 1.20 \sigma_{C_m}, \Phi = e^{-0.13} \approx 0.88 \quad (15)$$

2.6 비탄성에너지흡수계수

비탄성에너지흡수계수는 설계시 고려하는 응답수정계수의 역수 즉, $R (=1/F_\mu)$ 의 다른 표현이며, 지진운동에 의한 탄성역역의 최대 수평하중, V_e 와 수평설계하중 V_d 로 계산할 수 있다. 따라서 응답수정계수 R 은 Eq. (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{V_d}{V_e} \quad (16)$$

구조물은 지진과 같은 외력을 받게 되면서 부재들이 항복하게 되고, 구조물의 진동수 및 응답감쇠의 변화로 인해 탄성범위 보다 상당히 높은 외력에 견디게 된다. 이를 비탄성에너지흡수 이론을 바탕으로 일반산업시설물들은 매우 경제적으로 설계를 하게 되나, 원자력발전소는 안전이라는 특수목적 달성을 위해 상대적으로 보수적으로 설계하며 그 내진성능평가 식도 보수적으로 계산되게 된다. 또한, 비탄성에너지 흡수계수 즉, 응답수정계수는 상세 설계된 내진 구조시스템이 붕괴되지 않고 탄성범위를 벗어난 변형을 견딜 수 있음을 고려하는 것이다. 응답수정계수는

Table 5. Inelastic Energy Absorption Factors, F_μ , for Limit State A

Element Type		F_μ (1/R)	Median, $F_{\mu,m}$
Steel Special Concentric		4	5.92
Steel Ordinary Concentric		2.5	3.46
Eccentric	Short Link Beam	6	9.2
	Long Link Beam	5	7.56
Chevron Bracing		2.5	3.46

설계시방서 ASCE7/SEI (2005), ASCE/SEI 43-05 (2005)의 구조물 형식에 따라 8~1.25의 다양한 값을 제시하고 있으며, 내진성능평가(EPRI 3002012994, 2018) 방법론은 최소값인 1.25 또는 응답수정계수 약식 계산식을 제공하고 있다. 특히, ASCE/SEI 43-05 (2005)는 Limit State A~D로 구분하고 있으며, 제한된 영구적 변형만을 허용하는 Limit State C와 큰 영구 변형과 일부의 파괴를 허용 Limit State A로 크게 구분할 수 있다. Table 5는 ASCE/SEI 43-05 (2005)의 Limit State A일 때 반응수정계수를 보여준다. 여기서 내진성능평가 결과를 확률론적 평가에 활용하기 위해서는 확률분포값으로 나타내어야 하며, EPRI 3002012994 (2018)의 중앙 비탄성에너지흡수계산식인 Eq. (17)을 활용가능하다.

$$F_{\mu m} = 1 + (F_{\mu, CDFM} - 1) * e^{1.65 * 0.3} \quad (17)$$

Table 5의 응답수정계수는 2.5~6으로 분포하며, ASCE/SEI 43-05 (2005)의 Limit State C의 값과 비교할 때 1.67배~2배 이상의 차이가 있다.

3. 내진성능평가

특수중심가새골조 모델을 내진성능평가식을 활용한 결과가 실제 구조물 해석 상업코드 및 기존 분석 방법론과 비교 검증을 수행하였다.

3.1 평가 지진하중

평가지진은 설계시 고려한 지진과 달리 해당부지에서 발생 가능한 지진을 고려하게 되며, 일반적으로 설계지진에 포괄된다. 설계지진과 평가지진의 차이 또한 내진성능평가에서 고려되는 주요 변수이나 본 논문에서는 다루지 않았다. 견고한 암반위에 건설된 원자력발전소의 내진성능평가에 활용되는 NUREG/CR-0098 (1978) 일반적인 평가지진을 내진성능평가식 검증의 입력으로 활용하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 각각의 입력지진은 설계 시방서 ASCE/SEI 7-05 (2005), ASCE/SEI 43-05 (2005) 또는 내진성능평가방법론 EPRI 3002012994 (2018)에서 제시하는 응답수정계수를 고

Fig. 2. Comparison of Response Spectrum

Fig. 3. Example of Steel Structure Model

려한 각각의 응답스펙트럼을 보여주고 있다.

3.2 평가 모델

본 예제 건물은 상업용 구조해석 프로그램인 MIDAS Gen (2021)을 활용하여 3-D 보-기둥요소 및 트러스요소를 모델 하였으며(Fig. 3 참고), 높이가 24 m로 견고한 암반부지에 위치해 있다고 가정하였다. 평가를 위한 응답스펙트럼은 앞서 설명한 NUREG/CR-0098 (1978) 평가 지진을 응답수정 계수를 고려하지 않고 적용하였다. 구조물의 부재평가의 사하 중, 활하중과 원자력발전소의 일반적인 지진하중 조합 방법인 각 방향별 100:40:40의 비로 적용하여 조합중 가장 큰 값을 선택하였다.

3.3 내진성능평가 결과 검증

내진성능평가는 파손 가능한 모든 부재를 AISC ASD (1989)에 따라 평가하여 가장 취약한 부분을 선정하게 되는데, 본 논문에서는 황하중의 주요 지지부재로 알려진 기둥과 가새에 집중하여 내진성능평가를 수행하였다. 압축부재의 경우 Table 6에서 볼 수 있듯이 응답수정계수를 고려할 경우 내진성능은 199% 증가하며, 중앙내진성능식만 고려할 경우 58% 그리고 두 계수를 모두 고려할 경우 373%의 차이를 확인할 수 있다. 평가 결과는 Table 6과 Figs. 4 and

Table 6. Compression Member of Seismic Capacity Analysis Results

Combination of Seismic Capacity with Inelastic Energy Absorption	Seismic Capacity (g)	Differences (%)
R1 ASCE7 ¹⁾	1.00	318
R2 ASCE43-05 LS-A ²⁾	0.71	199
R3 ASCE43-05 LS-C ³⁾	0.43	80
R4 EPRI ⁴⁾	0.29	22
W/O R ⁵⁾	0.24	0
R2 ASCE43-05 LS-A + Med ⁶⁾	1.13	373
W/O R+ Med ⁷⁾	0.38	58

Note 1) Using R based on ASCE7

2) Using R based on ASCE43-05 LS-A

3) Using R based on ASCE43-05 LS-C

4) Using R based on EPRI

5) Without using R

6) Using R based on ASCE43-05 LS-A and median strength capacity

7) Using median strength capacity without using R

Fig. 4. Comparison of Seismic Capacity with R from ASCE 43-05 and W/O Median Equation

Fig. 5. Comparison of Seismic Capacity with R from ASCE 43-05 and W/Median Equation

5에서 각각 제시하고 있다.

인장부재의 경우 설계식과 응답수정계수를 고려하지 않은

Table 7. Tension Member of Seismic Capacity Analysis Results

Combination of Seismic Capacity	Seismic Capacity (g)	Differences (%)
R1 ASCE7 ¹⁾	1.07	415
R2 ASCE43-05 LS-A ²⁾	0.71	239
R3 ASCE43-05 LS-C ³⁾	0.39	89
R4 EPRI ⁴⁾	0.26	23
W/O R ⁵⁾	0.21	0
W/O R + Median ⁶⁾	0.33	57
R2 ASCE43-05 LS-A + Median ⁷⁾	1.09	423

Note 1) Using R based on ASCE7
 2) Using R based on ASCE43-05 LS-A
 3) Using R based on ASCE43-05 LS-C
 4) Using R based on EPRI
 5) Without using R
 6) Using median strength capacity without using R
 7) Using R based on ASCE43-05 LS-A and median strength capacity

Fig. 6. Comparison of Seismic Capacity with R from ASCE 43-05 and W/O Median Equation

Fig. 7. Comparison of Seismic Capacity with R from ASCE 43-05 and W/Median Equation

경우와 비교하면 응답수정계수를 고려할 경우 내진성능은 239% 증가, 중앙내진성능식만 고려할 경우 57% 증가 그리고 모두를 고려할 경우 423%의 내진성능 증가를 확인할 수 있다. 평가 결과는 Table 7과 Figs. 6, 7에서 각각 제시하고 있다.

ASCE/SEI 43-05 (2005)의 응답수정계수와 중앙내진성능 계산식을 활용할 경우 ASCE/SEI 7-05 (2005)에서 제시하는 응답수정계수와 AISC ASD (1989) 설계식을 고려한 계산 값보다 압축부재 평가 결과는 17%, 인장부재 평가 결과는 2% 더 큰 값으로써 설계와 시공의 보수성을 고려하면 합리적인 결과라 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 강구조물의 파손 직전까지의 내력을 평가하는 식을 제안하고 관련식의 검증을 수행하였다.

- 1) 원자력발전소 강구조물의 사실적인 안전성분석을 위해 제안한 평가식을 활용하여 계산한 결과가 압축부재 57%, 인장부재 58%정도 차이를 확인할 수 있었다. 이는 일반적으로 알려진 원자력발전소 내진성능이 설계대비 1.5배~2배정도 보유하고 있음을 감안할 때 합리적인 결과라 판단된다.
- 2) 비탄성에너지흡수 능력은 ASCE/SEI 43-05 (2005)의 일부 파괴를 허용하는 Limit State A를 목표 값으로 정하여 검증 분석을 수행하였다. 결과적으로 반응수정계수 고려 여부에 따라 압축부재 199%, 인장부재는 239% 추가적인 내진성능 확보가 가능한 것으로 분석되며 이 결과는 산업구조물 설계시방서 ASCE/SEI 7-05 (2005)을 적용한 결과보다 약 1.5배~2배 정도 작은 값으로 보수적인 결과를 도출함을 확인할 수 있다.
- 3) 내진성능평가식 및 응답수정계수를 모두 활용한 결과를 비교한 결과 설계시방서 ASCE/SEI 7-05 (2005)와 AISC ASD(1989)를 적용한 결과보다 약 2%~15% 큰 것을 확인할 수 있었으며, 설계시 고려되는 보수성들을 감안할 때 합리적인 결과 도출이 가능함을 확인할 수 있다.

References

- AISC ASD. (1989). *Manual of steel construction allowable stress design, american institute of steel construction*. 9th Edition.
- AISC. (1978). *Specification for the design, fabrication and erection of structural steel for buildings*.
- AISI. (1978). *Proposed criteria for load and resistance factor design of steel building structures*. AISI Bulletin No. 27.
- ASCE/SEI 43-05. (2005). *Seismic design criteria for structures, systems and components in nuclear facilities*. American Society of Civil Engineers.
- ASCE/SEI 7-05. (2005). *Minimum design loads for buildings*

- and other structures. American Society of Civil Engineers.
- Bjorhovde, R., Galambos, T.V., and Ravindra, M.K. (1978). LRFD criteria for steel beam columns. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 104, No. 9, pp. 1371-1387.
- EPRI 3002012994. (2018). *Seismic fragility and seismic margin guidance for seismic probabilistic risk assessments*. EPRI, Palo Alto, CA.
- Fisher, J.W., Galambos, T.V., Kulak, G.L., and Ravindra, M.K. (1978). Load and resistance design criteria for connectors. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 104, No. 9, pp. 1427-1441.
- Galambos, T.V., and Ravindra, M.K. (1978). Properties of steel for use in LRFD. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 104, No. 9, pp. 1459-1468.
- MIDAS Gen. (2021). User's Manual – Version 896. R2 MIDAS IT Co. Ltd.
- NBS SP 577. (1980). "Development of a probability based load criterion for American National Standard A58." Bruce Ellingwood.
- NUREG/CR-0098. (1978). *Development of criteria for seismic review of selected nuclear power plants*. Washington, D.C. U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Ravindra, M.K., and Galambos, T.V. (1978). Load and resistance factor design for steel. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 104, Issue, pp. 1337-1353.
- Yura, J.A., Galambos, T.V., and Ravindra, M.K. (1978). The bending resistance of steel beams. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 104, No. 9, pp. 1355-1370.

Received	March 1, 2021
Revised	March 2, 2021
Accepted	March 8, 2021