Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.37, No.5, pp.241-250, October, 2025

Check for updates
ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2025.37.5.241

표준설계도서 철골조 주택의 토사재해 취약성 평가

정명후[1] · 이창환[2] · 박민재[3*]
[1]석사과정, 국립부경대학교, 건축·소방공학부, [2]부교수, 국립부경대학교, 건축공학과, [3]조교수, 국립부경대학교, 건축공학과

Vulnerability Assessment of Steel-Framed Buildings under Debris Flow Based on Korean Standard Design Documents

Jeong, Myeong Hoo[1], Lee, Chang-Hwan[2], Park, Min Jae[3*]
[1]Graduate student, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea
[2]Associate Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea
[3]Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

Abstract – This study evaluated the debris flow vulnerability of steel-framed rural houses based on standard design documents using finite element analysis. Due to limitations in existing assessment methods, failure criteria from FEMA and NDMI (2023) were applied, and strain-based vulnerability scores were calculated. Regression analysis was performed to derive vulnerability curves according to debris flow intensity. Comparison with actual damage cases confirmed the effectiveness of the proposed approach, which is expected to contribute to improved debris flow risk mitigation strategies.
Keywords – Korean Standard Design Documents, Debris flow, Finite element analysis, Vulnerability, Steel-framed

1. 서 론

한국농어촌공사는 농림축산식품부와 협력하여 농촌 주택 설계의 편의성을 높이고, 농촌 주거환경을 개선함과 동시에 도시민의 정착을 유도하여 농촌 활성화를 도모하기 위해 농촌주택 표준설계도서를 제작하였으며, 귀농귀촌종합센터를 통해 이를 제공하고 있다. 이러한 표준설계도서는 농촌에 정착하려는 이들이 보다 쉽게 주택을 계획하고 건축할 수 있도록 지원하며, 이를 통해 귀농 및 귀촌을 촉진하고 지역 사회의 활력을 증진하는 데 기여하고 있다. 이 도서는 건축구조기술사를 통해 설계되었고 국토교통부장관의 승인을 받아 건축법 제14조 1항 5호, 건축법 시행령 제11조 3항 3호 및 건축법 시행규칙 제12조에 따라 건축허가를 받은 것으로 여겨진다.

국토의 대부분이 산지로 구성된 우리나라는 하절기의 장마와 폭우 등으로 인해 산사태와 같은 토사재해의 발생 가능성이 높다. 농촌주택 표준설계도서는 중력하중에 대한 건축구조기술사의 검토를 통해 작성된 것이기 때문에, 횡하중으로 작용하는 토사재해에 대한 취약성을 함께 검토할 필요가 있다. 2011년 서울에 위치한 우면산에서 발생한 산사태 이후 해외뿐만 아니라 국내에서도 토사재해에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에서 발생한 토사재해를 대상으로, 토석류가 다양한 구조 시스템에 미치는 영향을 분석하고 구조물의 손상 패턴을 정량적으로 평가하여, 각 구조 유형별 물리적 취약도를 제시한 연구들이 수행되었다[1]-[3]. 또한, 강우로 인한 산사태 발생을 예측하기 위한 연구에서는 위험 수준에 기반한 강우 임계치를 개발하고, 이를 활용하여 산사태 발생 가능성을 평가하는 방법이 제안되었다[4]-[6]. 그리고 통계적 방법과 물리기반 접근법을 순차적으로 적용하여 지역 규모의 산사태 조기 경보 시스템을 개발하는 방법론을 제안하고[7], 국내에 발생한 토사재해에 의해 손상된 구조물의 취약성 평가를 진행하여 미래를 위한 데이터베이스를 구축

Note.-Discussion open until April 30, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 17, 2025; revised on August 7, 2025; approved on August 7, 2025.

*Corresponding author.
Tel. +82-51-629-6079 Fax. +82-51-629-7084
E-mail. mjp@pknu.ac.kr

했다[8]-[10]. 국외에서는 토사재해의 특성에 따른 취약성 평가를 진행하였고[11],[12], 토사재해로 인한 파괴를 분석해 다양한 토사재해 시나리오를 도출하였다[13],[14]. 그리고 기존의 방식보다 개선된 취약성 평가방법을 제안하였다[15].

수치해석에 관한 기존 연구들은 주로 구조물의 거동을 부재기반 해석(Member-based analysis)을 통해 평가되어 왔으나 토사재해에 의한 구조물의 거동은, 부재들을 통해 이루어진 골조의 전체가 저항하는 것이 아니라 골조의 일부 부재만이 하중에 직접적으로 저항하는 특성을 가진다. 또한, 부재의 변형이 짧은 시간 내에 급격히 발생하기 때문에, 구조물의 거동을 보다 정밀하게 분석하기 위해서는 부재기반 해석보다는 요소기반 해석(Element-based analysis)이 더 적절한 접근 방식으로 판단된다. 국립재난안전연구원(NDMI, 2023)은 이러한 점을 고려하여, 동일한 토사재해 위험 강도 조건에서도 주택 구조 형식에 따라 취약성이 달라질 수 있음을 반영하고, 토사재해로 인한 위험 강도와 구조물의 취약도 관계를 정의하기 위해 유한요소해석을 활용한 토사재해 취약성 평가 모델을 개발하였다[16]. NDMI의 선행 연구는 구조 시스템에 따른 토사재해 취약성 평가를 수행함으로써, 재난 예방을 위한 예산 편성의 우선순위를 제시하고자 한 점에서 의의가 있다. 이러한 연구를 바탕으로, 농촌주택 표준설계도서를 기반으로 한 철근콘크리트 저층 주택을 대상으로 토사재해 취약성 평가가 먼저 수행되었다[17].

본 연구에서는 이를 확장하여, 동일한 설계도서를 적용한 철골조 주택에 대해 추가적인 토사재해 취약성 평가를 수행하였다. 해당 주택을 실물 크기로 제작한 뒤 토사재해 충격 실험을 수행하는 것은 시간, 비용, 기술적 제약으로 인해 현실적으로 어려움이 있다. 이에 따라 유한요소해석 프로그램을 활용하여 구조물을 모델링하고, 토사재해 하중을 적용하여 해석을 진행하였다. 또한, 국내외에서 제시된 관련 매뉴얼을 참고하여 취약성 평가를 실시하였으며, 해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 실제 토사재해 피해사례와 비교하였다.

2. 대상 주택 선정

본 연구에서 선정한 철골조 주택은 Fig. 1의 1층 주택과 2층 주택이다. Table 1, Fig. 2의 구조 도면과 Fig. 3의 접합상세를 참고하여 모델링을 진행하였다.

(a) One-story building

(b) Two-story building

Fig. 1. Aerial view of steel framed buildings

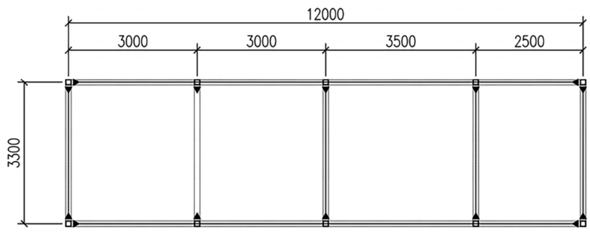
Table 1. Specifications of structural members

Model	Member	Section	Material
One-story building	SC1	□-130×130×9	SS275
	SG1	C-200×90×8×13.5	SS275
Two-story building	1-SC1	H-250×250×9×14	SHN275
	2-SG1	H-350×175×7×11	SHN275
	2-SB1	H-300×150×6.5×9	SHN275
	2-SB2	H-350×175×7×11	SHN275
	2-SCG1	H-350×175×7×11	SHN275
	R-SG1	H-300×150×6.5×9	SHN275

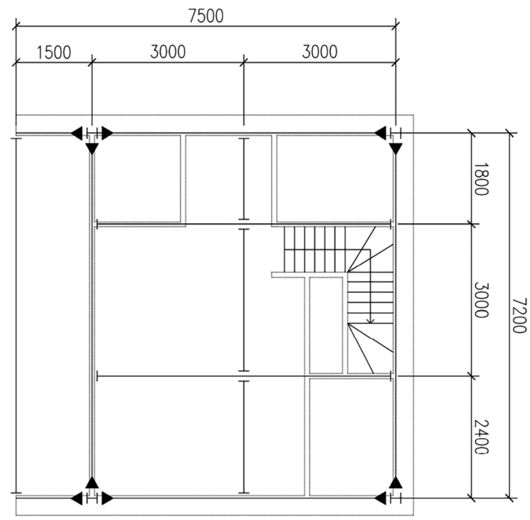
3. 유한요소해석

3.1 해석 개요

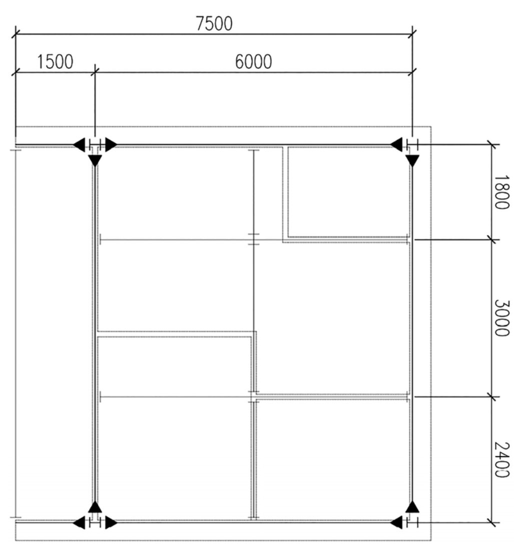
본 연구에서는 ABAQUS/CAE 2024 프로그램을 사용하여 유한요소해석을 진행하였다. 해당 주택의 구조 일반사항과 구조 도면을 참고하여 모델링하였다. 구조물과 지면의 접합은 고정단으로 설정하였다. 토사재해



(a) 1st floor plan of one-story



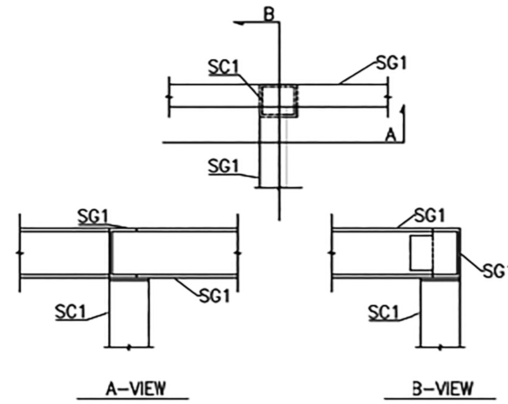
(b) 1st floor plan of two-story building



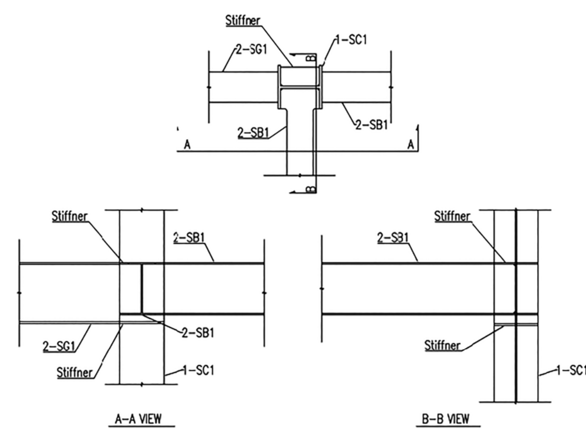
(c) 2nd floor plan of two-story building

Fig. 2. Structural floor plans

하중은 실제 사례 기반이 아닌, 특정 지역에서의 토사재해 발생을 가정하여 생성된 데이터를 활용하였으며, 토사재해가 종료되는 시점까지 해석을 수행하였다. 이 하중은 유한요소해석 프로그램 내에서 구조물에 압력 형태로 작용하도록 적용되었다.



(a) Connection details of one-story building



(b) Connection details of two-story building

Fig. 3. Connection details

3.2 선정 도서 모델링

해당 철골조 주택의 구조 도면을 기반으로 철골 프레임만 모델링하였다. 구조물의 전체적인 거동을 평가하고 해석 효율을 높이기 위해 Shell 요소를 사용하는 방법도 가능하지만, 본 연구에서는 구조 거동을 보다 정밀하게 분석하기 위해, 기둥과 보의 응력 집중 및 접합부의 국부 거동을 정밀하게 표현할 수 있는 8절점 3차원 연속체 요소(C3D8R)로 모델링하였다[18]-[20]. 각 요소의 크기는 전체 모델 크기와 해석의 효율성을 고려하여 100 mm–200 mm 범위로 설정하였다.

설계 도서에 적용된 강종은 SS275와 SHN275이다. SHN강(내진구조용 열간 압연형강)은 반복하중에 대한 인성과 연성이 우수하여, 일반적으로 가장 많이 사용되는 SS강(일반 구조용 압연강재)보다 구조적 성능이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는 보수적인 평가를 위해, 두 강재 모두에 대해 Table 2에서 SS

Table 2. Specimen combinations by grade and diameter

(a) Elastic properties

Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
210,000	0.3

(b) Plastic properties

Yield stress (MPa)	Plastic strain
275	0
410	0.18

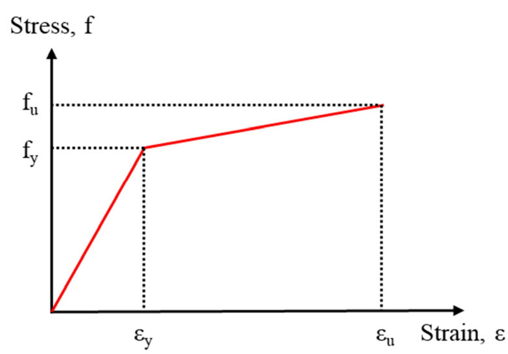


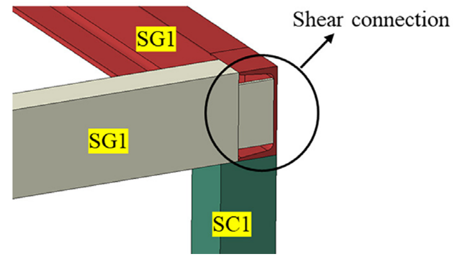
Fig. 4. Bilinear work-hardening model

강의 기계적 특성을 동일하게 적용하였다. 또한 구조부재의 해석의 효율성을 높이기 위해 재료 모델은 Fig. 4의 탄성-선형 경화 모델[21],[22]을 채택하였다.

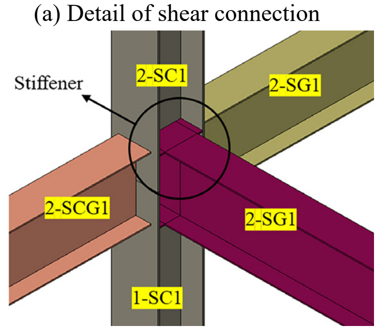
철골 프레임 접합부의 모델링은 구조 도면을 기반으로 수행하였다. 1층 주택의 보 부재는 C형강으로 구성되어 있으며, 도면에서 제시된 전단접합을 포함하여 Fig. 5(a)와 같이 접합부를 모델링하였다. 이를 통해 부재 간 하중 전달 거동을 보다 정확하게 모사하였다. 또한, 접합부에서 발생할 수 있는 국부적인 응력 집중을 완화하기 위해, Fig. 5(b)와 같이 스티프너를 모델링하여 접합부를 구성하였다. 이러한 상세 사항을 모두 고려하여 Fig. 5(c)와 같이 철골 프레임을 모델링하였다.

부재 간 접합 조건은 해당 프로그램의 Constraint-Tie 기능을 활용하여 정의하였다. 이를 통해 보와 기둥, 전단 플레이트, 스티프너 간의 접합이 이루어지도록 설정하였으며, 실제 구조에서 접합부가 갖는 강성을 반영하도록 하였다.

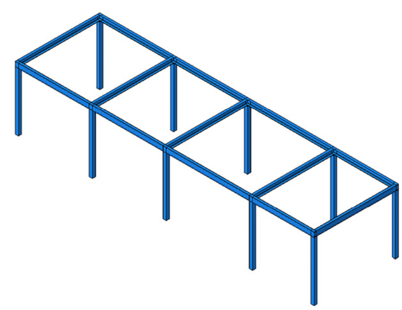
해당 설계 도서에 따르면, 본 구조물의 슬래브는 철근콘크리트로 구성된 구조 요소이다. 그러나 본 연구는 철골 프레임의 거동 분석에 중점을 두었기 때문에 초기 모델에서는 슬래브 요소를 제외하였다. 그러나 슬래브는 토사재해로 인한 측방 압력에 대해 구조적 거동을



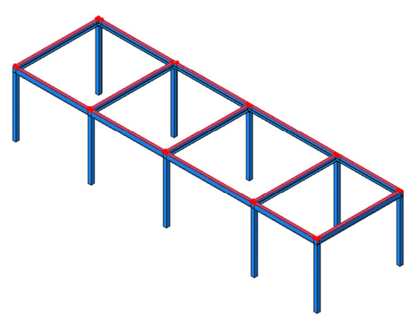
(a) Detail of shear connection



(b) Detail of stiffener



(c) Steel-framed building



(d) Constraint-rigid body

Fig. 5. FEA modeling of steel-framed building

보완할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 슬래브의 구조적 영향을 추가로 분석하기 위해, 변형이 가장 크게 발생할 것으로 예상되는 1층 철골조 주택에 슬래브를 포함한 모델을 추가로 구성하였다. 최종적으로는 슬래브를 고려하지 않은 1층 주택, 슬래브를 포함한 1층 주택, 그리고 2층 주택 모델을 포함하여 총 3가지 모델에 대해 비교 분석을 수행하였다. 슬래브는 직접적으로 모델링하지 않았고, Fig. 5(d)에 나타난 프로그램의

Constraint-rigid body 기능을 활용하여 슬래브와 접합되는 철골 프레임의 윗면을 일체화시켜 간접적으로 슬래브를 표현하였다.

3.3 토사재해 하중 입력

토사재해는 토사의 유실로 인해 발생하며, 구조물에는 압력 형태의 충격이 가해진다. 이 하중은 시간에 따라 변화하는 동적 특성을 가지므로, 비선형해석이 요구된다. 또한, 유체적 성질을 지닌 토사가 구조물에 충격할 경우, 구조물의 높이에 따라 하중의 크기가 달라지는 것으로 해석된다. 이러한 토사재해 하중의 특성을 반영하기 위해, 본 연구에서는 해석 프로그램에 토사재해 하중을 Pressure load를 통해 적용하였다. Pressure load는 Amplitude, Magnitude 및 Distribution의 세 가지 요소로 정의된다.

Amplitude는 토사재해 발생 시나리오에 기반해 정의되며, 이 토사재해 시나리오는 국립재난안전연구원에서 토사재해 취약성 평가를 목적으로 개발한 시뮬레이션 데이터 중 하나이다[16]. 해당 데이터는 부산 황령산 일대에서 토사재해가 발생한 상황을 가정하여, 국립재난안전연구원, 부경대학교, 울산대학교가 공동으로 제작한 다섯 가지 시나리오 중 하나다. 해당 시나리오는 Fig. 6로 충격압이 비교적 높은 수준에서 일정하게 유지되며, 작용 시간이 가장 긴 특성을 나타냈다. 이러한 특성을 고려하여, 보수적인 해석을 위한 대표 시나리오로 본 연구에 적용하였다.

$$\text{Magnitude} = \frac{A_g}{A_n} \tag{1}$$

Magnitude는 구조물에 작용하는 하중의 크기를 정의하는 요소다. 건물이 받는 하중은 일반적으로 골조가 저항하도록 설계되기 때문에, 본 연구에서는 철골조만을 모델링하였다. 그리고 실제 토사재해는 구조물 전면에 고르게 영향을 미치지만, 철골조만 고려한 본 해석에서는 골조 외 영역에 작용할 하중이 골조에 집중되는 것으로 가정하였다. 이에 따라, 식 (1)을 통해 토사재해가 작용하는 전체 면적 A_g 대비 골조 면적 A_n의 비율을 산정하고, 이를 하중 보정에 적용하였다. 그리고 Fig. 7에서 볼 수 있듯, 구조물이 경사면의 끝점으로부터 멀어질수록, 구조물에 작용하는 토사재해 하중은 점차 감소하는 경향을 보인다. 따라서 이에 대한 보정을 위해 Magnitude에 거리 기반의 보정계수(λ)를 곱하여 적용하였다.

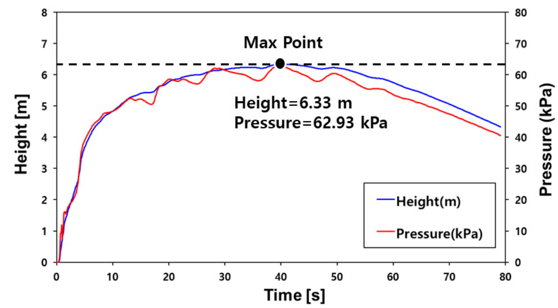


Fig. 6. Debris flow scenario

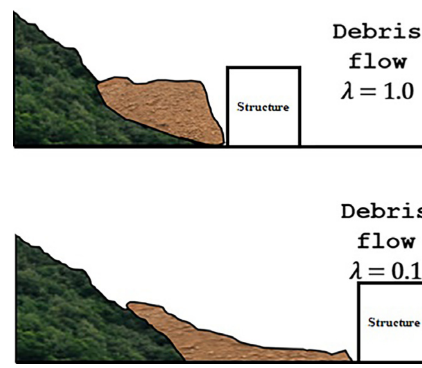


Fig. 7. Variation of debris flow impact pressure (λ)

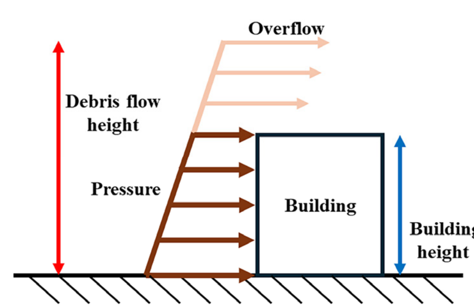


Fig. 8. Distribution of debris flow

Distribution은 토사재해 하중의 높이 방향 분포를 정의하는 항목으로, Fig. 8과 같이 토사재해 하중은 고도에 따라 감소하는 특성이 있다. 이를 반영하기 위해 식 (2)를 통해 특정 높이에서의 하중을 계산하였다. 식 (2)에서 y는 구조물 전체 높이, σ_y는 높이에서의 하중이며, h와 $\sigma_{pressure}$는 Amplitude에서 토사재해의 최대 높이와 해당 시점의 하중을 의미한다. 그리고 구조물 높이를 초과하는 토사재해는 구조체에 횡력으로 작용하지 않

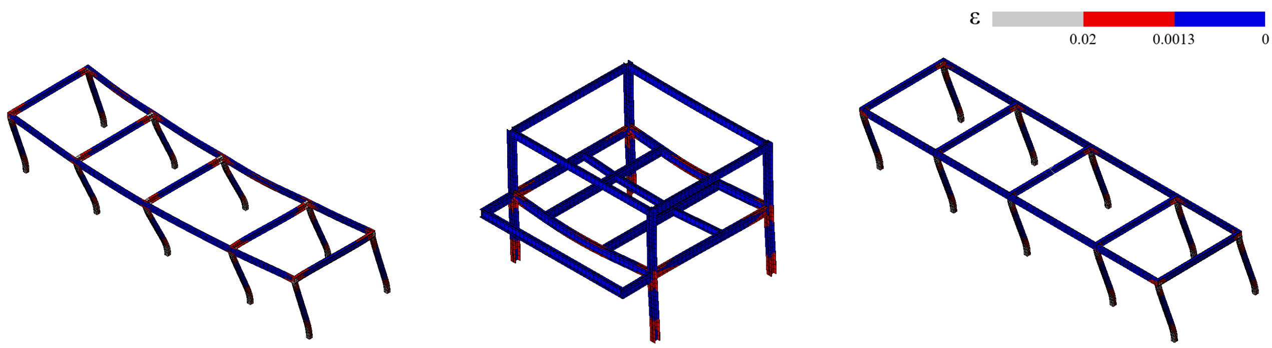


Fig. 9. Analysis result of 100% debris flow

Table 3. FEMA based failure criteria for steel-framed building (low-storeis)

Structural damage	Failure mode			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
	Minor cracks in some connection	Cracks in connection	Permanent deformation of structural members	8 % of the wall area is damaged

는 것으로 판단하여, 본 해석에서는 고려 대상에서 제외하였다.

$$\sigma_y = (1 - \frac{y}{h}) \times \sigma_{pressure} \quad (2)$$

4. 결과 및 분석

Fig. 9은 철골조 주택 모델 3개에 대한 유한요소해석 결과로 변형 양상 및 요소들의 변형률 분포를 나타낸다. 슬래브가 없는 1층 모델과 슬래브가 있는 1층 모델의 비교하였을 때, 보의 변형에 일부 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 1층 모델과 2층 모델을 비교하였을 때, 토사재해 작용 면적이 더 큰 1층 모델의 변형이 큰 것으로 나타났다.

4.1 평가기준

본 연구에서 제시한 철골조 주택의 취약성 평가 기준은 미국연방재난관리청(FEMA) 매뉴얼[23]과 국립재난안전연구원의 관련 보고서[16]를 참고하였고, Table 3에 정리된다. 해당 매뉴얼과 보고서에서는 철골조의 파괴 기준을 소파(Slight), 중파(Moderate), 광파(Extensive) 그리고 완파(Complete)의 네 단계로 분류하고 있다. 그러나 유한요소해석 결과를 이러한 기준에 직접 적용하여 취약성 점수를 산정하는 것은 각 파괴 단계의 경계가 명확하지 않아 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 요소 단위의 변형률을 활용하여 객관적으로 취약성 점수를 산정하였다.

$$\varepsilon_{mu} \geq 15\varepsilon_y \quad (3)$$

철골 구조부재의 영구 변형은 외력이 작용하여 부재가 항복변형률에 도달한 이후부터 발생한다. 항복변형률에 도달한 부재는 소성 구간에서 에너지를 소산하며 외력에 저항하고, 이후 변형 경화 구간(strain hardening region)을 거쳐 극한변형률에 도달하면 파괴된다. 본 연구에서는 이러한 재료의 변형률 변화에 따른 손상 정도를 기반으로 구조물의 취약성을 평가하였다. 항복 변형률, 변형률 경화, 극한 변형률의 세 구간에 대한 기준을 설정하고자 하였으나, 변형률 경화에 대한 문헌이 부족하여, 변형률 경화와 극한변형률의 두 구간을 하나의 통합된 기준으로 간주하였다. 이 기준은 식 (3)의 Eurocode 3 Part 1-1[24]에서 제시하는 강재의 최소극한변형률이며, 최종적으로 항복변형률과 최소극한변형률 두 구간으로 취약성 평가 기준을 정립하였다. 각 기준에 해당하는 변형률은 Fig. 10에서 나타낸다.

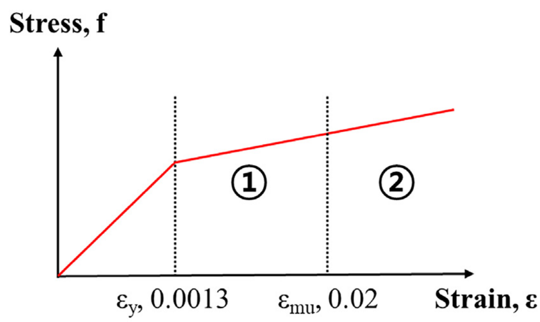


Fig. 10. Strain-based scoring zone

Table 4. Area of the deformed element

Structure type	Strain rate		Failure mode
	① (between εy and εu)	② (over εu)	
(a) One-story building without slab	20.3 %	19.5 %	Complete
(b) Two-story building without slab	1.2 %	-	Slight
(c) One-stroy building with slab	17.9 %	16.9 %	Complete

4.2 해석 결과

토사재해가 적용된 벽체의 면적 대비 변형이 발생한 요소 면적의 비율은 Table 4에 제시하였다. 슬래브가 없는 1층 주택은 완파에 해당하는 파괴 수준을 나타냈으며, 슬래브가 없는 2층 주택은 변형이 발생한 요소가 매우 적어 소파 수준의 손상으로 평가되었다. 슬래브가 있는 1층 주택은 슬래브가 없는 1층 주택보다 변형 요소 면적이 다소 감소하였으나, 여전히 완파에 해당하는 파괴 수준으로 나타났다. 1층 주택은 작용면 전체가 토사재해의 영향을 받았으나, 2층 주택은 토사재해 하중 데이터에서 제시된 최대 작용 높이를 초과하는 벽체가 영향을 받지 않아, 결과적으로 1층 주택의 변형 요소 면적이 더 크게 나타났다. 또한 1층 주택의 슬래브 유무를 비교한 결과, 슬래브가 있는 모델에서 변형 요소 면적 비율이 다소 낮았지만 차이는 크지 않았다. 이는 보와 기둥이 모멘트 접합으로 구성되어 있어, 슬래브가 없어도 횡력에 어느 정도 저항할 수 있었던 것으로 판단된다.

4.3 취약성 평가

FEMA에서는 철골조 주택의 파괴기준을 건물 부재의 손상 비율을 통해 제시하며, 해당 구조시스템은 구조물의 층고에 따라 완파의 기준이 달라진다. FEMA 기준에 따르면, 본 연구에서 선정한 주택에 해당하는 완파 기준은 벽체 면적의 8 % 이상 손상이다. 그러나 횡력으로 작용하는 토사재해를 고려한 해석 모델과 실제 토사재해가 구조물에 미치는 영향 간의 차이를 고려하여, FEMA 기준보다 보수적인 기준으로 벽체 면적의 5 % 이상 손상 시 완파로 간주하였다. 그리고 변형이 발생한 요소에 대해 점수를 적용하여 점수를 합산한 후 벽체 면적의 5 %로 나누어 취약성 점수를 산출하였다. 식 (3)은 취약성 점수 산출식이다.

$$\text{Vulnerablity Score} = \frac{100 \times A_u + 50 \times A_y}{0.05 \times A_w} \tag{4}$$

A_w는 토사재해가 작용한 벽체의 면적이며, A_u와 A_y는 각각 최소 인장 변형률을 초과한 요소의 면적과 항복 변형률을 초과한 요소의 면적이다. 보수적인 평가를 위해, 최소 인장 변형률을 초과한 요소는 더 이상 하중에 저항할 수 없는 것으로 판단하고 A_u에 100점을 부여하였다. 반면, 영구 변형이 발생하지 않는 탄성 구간은 0점으로 간주하였으며, 이 두 구간 사이에 해당하는 소성 영역의 변형률을 가진 요소에는 계산 효율성을 고려하여 A_y에 50점을 부여하였다. 이를 바탕으로 전체 구조물의 취약성 점수를 산정하였다.

철골조 주택의 취약성 점수의 경향성을 파악하기 위해 토사재해 하중 보정계수(λ)를 다르게 적용하여 추가적으로 해석을 진행하였다. 해석 시간을 고려하여 특정 토사재해 하중에서 해석을 진행하였고 해석 결과를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 철골조 주택의 취약성 경향을 파악하였다. 회귀분석의 신뢰성을 확보하기 위해 토사재해 취약성 곡선 제안 연구[6]를 참고하였고 해당 연구에서 식 (5)의 형태가 가장 높은 신뢰성을 보였다. 따라서 본 연구에서는 식 (5)를 적용하여 회귀분석을 진행하였고, 식 (6), 식 (7)과 식 (8)은 각각 슬래브가 없는 1층 주택, 2층 주택 그리고 슬래브가 있는 1층 주택의 회귀분석 방정식이다.

$$y = a(1 - \exp(-b \times x^{c})) \tag{5}$$

$$y = 101.05(1 - \exp(-35.14 \times x^{4.62})) \tag{6}$$

$$y = 522.71(1 - \exp(-0.01 \times x^{4.41})) \tag{7}$$

$$y = 99.22(1 - \exp(-75.77 \times x^{7.88})) \tag{8}$$

Fig. 11은 회귀분석을 통해 도출된 각 모델들의 취약성 곡선을 나타낸다. 1층 주택과 2층 주택의 취약성 곡선을 통해 주택의 구조적 형태에 따라 취약성이 다양해질 수 있음을 알 수 있다. 슬래브의 영향을 고려한 1층 주택과 고려하지 않은 1층 주택의 곡선을 비교하였을 때, 슬래브의 영향은 분명히 있으나 다소 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 철골조의 구조부재들이 모멘트 접합을 이루고 있고, 횡방향으로 배치된 보가 토사재해로 인한 횡방향 하중에 효과적으로 저항하기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 그리고 1층 주택과 2층 주택의 취약성 곡선을 비교한 결과, 2층 주택은 상대적으로 안정적인 경향을 나타내었다. 이는 2층 주택이 1층 주택에 비해 스팬이 짧아 토사재해가 작용하는 면적이 상대적으로 작기 때문이며, 그 결과로 2층 주택에 작용하는 하중이 감소하여 보다 완만하고 안정적인 취약성 곡선을 나타내었다.

회귀분석을 통해 도출된 취약성 곡선과 토사재해의 피해를 받은 철골조 주택에 대한 실제 사례를 비교하였다. 이는 본 연구에서 제안한 취약성 평가 방법의 신뢰성을 검증하기 위한 목적으로 수행되었다. 그 결과, 일부 오차는 존재하지만 대부분의 실제 사례가 곡선 인근

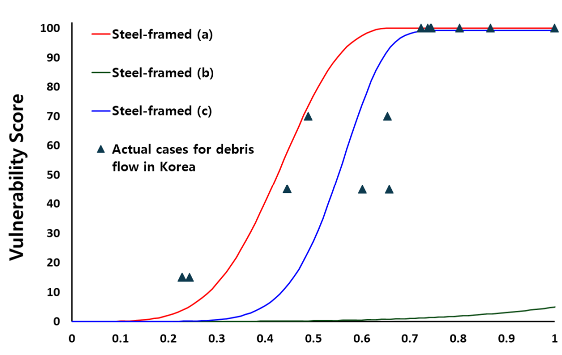


Fig. 11. Vulnerability curve of steel-framed and actual cases

에 분포하는 것으로 확인되었다. 이러한 오차는 실제 토사재해의 발생 위치와 토석류의 성질이 다르고 주택의 형태가 다양하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 취약성 평가 방식이 실제 구조물의 피해 특성을 적절히 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 유한요소해석을 통해 농촌주택 표준설계도서 기반의 철골조 주택을 대상으로 토사재해에 대한 구조적 취약성을 정량적으로 평가하였다. 토사재해 시나리오는 부산 황령산 일대에서 토사재해가 발생한 상황을 가정한 데이터 중 가장 위험한 조건을 선정하여 적용하였다. 취약성 평가는 강재의 재료적 특성을 반영하여 요소의 변형률에 따라 취약성 점수를 산정하는 방식으로 수행하였다. 이후 토사재해 하중의 크기를 달리하여 다양한 해석 조건에서 취약성 점수를 도출하고, 회귀분석을 통해 취약성 곡선을 산정하였다. 선행연구를 기반으로, 본 연구는 철골조 주택을 대상으로 한 유한요소해석을 통해 보다 정량적이고 구체적인 취약성 데이터를 도출하였다. 향후에는 다양한 형태의 철골조 주택에 대한 취약성 평가가 추가로 수행될 필요가 있으며, 이를 통해 수집된 데이터는 재난 예방 및 대응 전략 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 이에 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 1층 주택은 슬래브의 유무와 상관 없이 100 % 하중에서 완파되었고, 2층 주택은 1층 주택보다 안정적인 소파에 해당하는 수준을 나타냈다. 이는 구조물의 형태에 따라 파괴 양상이 달라질 수 있음을 보여주며, 도출된 각 모델들의 취약성 곡선도 이러한 특성이 잘 반영되어 나타났다.

(2) 1층 주택에서 슬래브 유무에 따른 영향을 분석한 결과, 구조 부재 간의 모멘트 접합과 횡방향으로 설계된 보가 토사재해에 대해 구조물의 안정성에 충분히 기여하고 있어, 슬래브 유무에 따른 차이는 존재하지만 그 영향은 미미한 것으로 나타났다.

(3) 변형률 기반의 취약성 점수 산정을 위해 강재의 재료적 특성을 반영하였으며, 변형률을 소성 구

간과 경화 구간으로 구분하여 취약성 점수를 산정하였다.

(4) 회귀분석을 통해 취약성 곡선을 도출하고, 이를 실제 토사재해 피해사례와 비교함으로써 본 연구에서 제안한 철골조 주택의 취약성 평가 방식의 신뢰성을 입증하였다.

감사의 글

이 성과는 2024년도 국립재난안전연구원의 지원(과제번호: NDMI-PR-2024-07-24)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2024-00416604, RS-2025-00558843)을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌(References)

[1] Kang, H.-S., and Kim, Y.-T. (2016) The Physical Vulnerability of Different Types of Building Structure to Debris Flow Events, *Natural Hazards*, Springer, Vol.80, pp.1475-1493.

[2] Lee, J.-S., Song, C.-H., Pradhan, A.M.S., Ha, Y.-S., and Kim, Y.-T. (2024) Development of Structural Type-based Physical Vulnerability Curves to Debris Flow Using Numerical Analysis and Regression Model, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Elsevier, Vol.106, 104431.

[3] Kang, H.-S., and Kim, Y.-T. (2014) Physical Vulnerability Function of Buildings Impacted by Debris Flow, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.14, No.5, pp.133-143 (in Korean).

[4] Lee, J.S., Kang, H.S., Suk, J.W., and Kim, Y.T. (2019) Development of Hazard Level-based Rainfall Threshold for Prediction of Rainfall-induced Landslide Occurrence in Korea, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.19, No.5, pp.225-236 (in Korean).

[5] Pradhan, A.M.S., Kang, H.-S., Lee, J.-S. and Kim, Y.-T. (2019) An Ensemble Landslide Hazard Model Incorporating Rainfall Threshold for Mt. Umyeon, South Korea, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer, Vol.78, pp.131-146.

[6] Lee, J.-S., Pradhan, A.M.S., Song, C.-H., and Kim, Y.-T. (2024) Lithological Terrain-based Rainfall Thresholds for Possible Initiation of Shallow Landslides in South Korea, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,* Springer, Vol.38, No.1, pp.175-191.

[7] Park, J.-Y., Lee, S.-R., Lee, D.-H., Kim, Y.-T., and Lee, J.-S. (2019) A Regional-scale Landslide Early Warning Methodology Applying Statistical and Physically Based Approaches in Sequence, *Engineering Geology,* Elsevier, Vol.260, pp.1-14.

[8] Jun, K.-J., Kim, G.-H., and Yune, C.-Y. (2013) Analysis of Debris Flow Type in Gangwon Province by Database Construction, *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol.33, No.1, pp.171-179 (in Korean).

[9] Choi. S.H., Ham. H.J., and Lee. S. (2020) Assessment of Building Vulnerability Curve Subjected to Debris-flow, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.20, No.5, pp.11-20 (in Korean).

[10] Choi, S.H., Ham, H.J., and Lee, S. (2021) Vulnerability Curve Assessment of Low/Mid-Rise Buildings Subjected to Debris-Flow Hazards, *Journal of the Architectural Institute of Korea,* AIK, Vol.37, No.11, pp.281-290.

[11] Chen, Q., Chen, L., Gui, L., Yin, K., Shrestha, D.P., Du, J., and Cao, X. (2020) Assessment of the Physical Vulnerability of Buildings Affected by Slow-moving Landslides, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, EGU, Vol.20, No.9, pp.2547-2565.

[12] Papathoma-Köhle, M., Keiler, M., Totschnig, R., and Glade, T. (2012) Improvement of Vulnerability Curves Using Data from Extreme Events: Debris Flow Event in South Tyrol, *Natural Hazards*, Springer, Vol.64, pp.2083-2105.

[13] Huang, Y., and Zhang, B. (2022) Challenges and Perspectives in Designing Engineering Structures against Debris-flow Disaster, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis, Vol.26, No.10, pp.4476-4497.

[14] Luo, H.Y., Fan, R.L., Wang, H.J., and Zhang, L.M. (2020) Physics of Building Vulnerability to Debris Flows, Floods and Earth Flows, *Engineering Geology*, Elsevier, Vol.271, 105611.

[15] Luo, H.Y., Zhang, L.M., Zhang, L.L., He, J., and Yin, K.S. (2023) Vulnerability of Buildings to Landslides: The State of the Art and Future Needs, *Earth-Science Reviews*, Elsevier, Vol.238, 104329.

[16] National Disaster Management Research Institute. (2023) *Development of Slope Disaster Vulnerability Assessment Model(I)*, 11-1741056-000618-01, NDMI (in Korean).
[17] Lee, D.-H., Lee, C.-H., and Park, M.J. (2025) Vulnerability Assessment of Low-Rise RC Buildings Based on the Korean Standard Design Documents under Debris Flow, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.41, No.5, pp.241–249 (in Korean).
[18] Lee, S.D., Kim, P.J., and Kim, K.S. (2004) The Strength of Square Steel Tubular Column to H-beam Connections - Focused on the Connections with Outside-type Diaphragm -, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.1, pp.11–20. (in Korean).
[19] Lee, S.S., Park, K.S., Hong, S.Y., and Bae, K.W. (2015) Behavior of C-shaped Beam to Square Hollow Section Column Connection in Modular Frame, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.5, pp.471–481 (in Korean).
[20] Shin, K.-J., Lim, B.-H., Lee, S.-H., and Choi, S.-M. (2011) FEA of Beam-Column Connection with Bolted Web, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.3, pp.305–316 (in Korean).
[21] Lee, E.T. (2002) State of the Art of the Cyclic Plasticity Models of Structural Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.14, No.6, pp.735–746 (in Korean).
[22] Baek, K.Y. (2007) Numerical Analysis Method of Overlay Model for Material Nonlinearity Considering Strain Hardening, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.3, pp,291–301 (in Korean).
[23] Federal Emergency Management Agency. (2022) *Hazus Earthquake Model Technical Manual – Hazus 5.1*, FEMA, US.
[24] European Committee for Standardization. (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures –Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, EN 1993-1-1, CEN, Belgium.

요 약 : 본 연구는 농촌주택 표준설계도서를 기반으로 한 철골조 주택의 토사재해 취약성을 유한요소해석을 통해 평가하였다. 국내에서는 토사재해에 대한 취약성 평가 연구가 지속적으로 진행되어왔으나, 기존 평가 방식에는 한계가 존재하였다. 이에 본 연구에서는 유한요소해석을 도입하였으며, 평가를 위해 FEMA 및 NDMI (2023)에서 제시한 파괴 기준을 적용하였다. 토사재해를 시뮬레이션하여 구조 부재의 요소 변형률 데이터를 도출하고, 이에 따라 점수를 부여하여 취약성 점수를 산정하였다. 산정된 점수를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 토사재해 하중 크기에 따른 경향을 취약성 곡선으로 도출하였고, 이를 실제 피해사례와 비교한 결과 본 연구에서 제안한 취약성 평가 방식이 효과적인 방법임이 입증되었다. 제안된 방법은 향후 토사재해 위험 저감 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 농촌주택 표준설계도서, 철골조, 토사재해, 취약성 평가, 유한요소해석