

비비례하중을 재하한 3차원 강뼈대 구조물의 극한강도 실험

Ultimate Strength Testing of 3-D Steel Frame Subjected to Non-Proportional Loads

김 승 역* 강 경 원**
Kim, Seung Eock Kang, Kyung Won

ABSTRACT

The ultimate strength testing of a two-story, single-bay, and sway allowed space steel frame was performed. Considering a majority of large-scale frame tests in the past, only two-dimensional frames were experimentally studied. Therefore, three-dimensional experiment is needed to extend the knowledge of this field. The steel frame subjected to non-proportional vertical and horizontal load was tested. The load-displacement curve of the test frame is provided. The experiment results are useful for verification of the three-dimensional numerical analysis. The results obtained from 3D non-linear analysis using ABAQUS were compared with experimental data.

1. 서 론

Kanchanalai는 소성영역해석 결과를 검증하기 위하여 2차원 2경간 실물크기 구조물에 대한 실험을 수행하였다(1977). 모든 실험체는 면외 방향 좌굴을 방지하기 위하여 약축 방향에 대하여 구속하였다. Yarimci는 2차원 실물크기 구조물에 대하여 실험하였다(1966). 면외 방향 좌굴을 막기 위하여 두 개의 평행한 보조 구조물로 실험체의 양쪽 측면방향을 지지하였다. Avery와 Mahendran은 네 개의 2차원, 1경간, 1층 구조물에 대한 실험을 수행하였다(2000). 실험체는 횡지지되지 않고, 면외 방향으로 구속하였다. 그리고 Wakabayashi에 의해 수행된 일련의 실험은 2차원, 1경간 2층 구조물이다(1972). 면외 좌굴을 방지하기 위해 동일한 시편 두 개를 평행하게 설치했다. Harrison(1964)는 정삼각형 3차원 1층 구조물을 실험하였다. 수평하중(H)을 기둥의 상단에 재하 하였고, 수직하중(1.3H)을 보의 경간 중앙에 재하하였다. 기둥 상단에는 하중이 재하되지 않았으므로 좌굴보다는 단면의 항복이 거동을 지배하는 실험이다.

지난 30여년간 수행해온 강뼈대 구조물의 실험은 대부분 2차원 구조물에 국한되어 왔다. 이 2차원 구조물로는 실제 구조물의 거동을 정확히 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 실물크기의 3차원 강뼈대 구조물의 실험을 수행하였다. 특히 좌굴과 항복의 복합된 영향에 의하여 극한 상태에 도달하는 실험체를 대상으로 하였다.

2. 실험체 및 실험장비의 제원 및 구성

- * 정희원, 세종대학교 토목환경공학과 교수
** 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

2.1 실험체

2.1.1 제원 및 부재

X방향의 폭은 2.5m, Y방향의 폭은 3m, 1층 높이는 1.76m, 2층 높이는 2.2m 이다. 실험체의 형상은 그림 1과 같다. 실험체는 좌굴 및 항복의 혼합된 영향에 의해 파괴되도록 설계하였다. 단일 부재의 횡비틀림 좌굴에 의한 파괴는 실험체의 전체 거동을 연구하는데 적당하지 못하므로 그러한 형태의 파괴는 일어나지 않도록 설계시 세심한 주의를 기울였다. 1층과 2층 기둥 부재들의 세장비는 강축으로 각각 25, 32 그리고 약축으로 43, 55로 계획하였으며, 이는 실제 구조물의 세장비 범위에 해당한다.

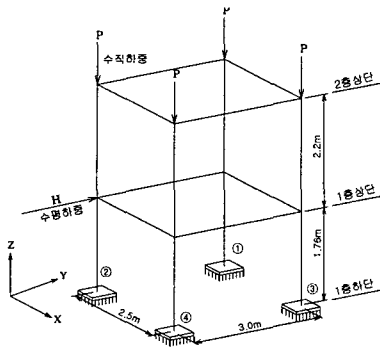


그림 1. 실험체의 규격 및 하중 조건

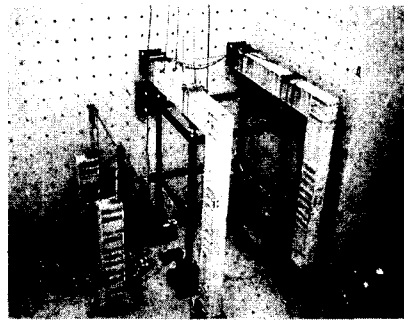


그림 2. 실험체 배치 전경

실험체의 부재는 열간-압연(hot-rolled) I-형 단면을 사용하였다. 부재단면의 공칭 치수는 H-150×150×7×10이며, 국내에서 일반적으로 사용되는 SS400 형강으로, 공칭 항복응력이 250MPa 이다. 이 단면은 국부 좌굴이 발생하지 않는 조밀단면이다.

2.1.2 3차원

실제 구조물이 3차원임에도 불구하고 과거의 강뼈대 구조물 실험에서는 실험하기가 쉽고 간단하다는 이유로 2차원 구조물의 실험을 주로 수행해 왔다. 그러나 2차원 구조물로는 공간 비틀림 거동을 비롯한 3차원 구조물의 거동을 모사할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 3차원 실험체를 대상으로 하였다. 3차원 구조물의 사진을 그림 2에 나타내었다.

2.1.3 횡지지되지 않은 2층, 1경간 구조물

본 실험에서는 횡지지되지 않은 2층, 1경간 실험체를 사용하였다. 2층 실험체를 선정하게 된 이유는, 실험체의 2층 상단을 구속하여 수직 책의 위치를 이동하지 않고 축력을 재하할 수 있기 때문이다. 2층 상단을 구속하고 1층 상단에 수평하중을 가력하면, 횡지지되지 않은 구조물의 전형적인 P-Δ 효과를 파악할 수 있다. 한편 2층 1경간 구조물이나 더 복잡한 다층 다경간 구조물의 구조적인 원리는 동일하므로, 2층 1경간 구조물로 구조적 거동을 연구하는데 충분하다.

2.1.4 실험체의 경계조건

본 실험체는 보와 기둥의 연결부를 모두 용접하여 강접합하였다. 또한 30mm 두께의 바닥판(base plate)을 기둥하단에 연속적으로 필렛 용접하여 기둥 하단을 최대한 강접하였다. 기둥하단의 바닥판은 중심간격이 200mm인 4개의 M24 볼트로 베이스블록에 고정하였다. 기둥 하단의 연결상태를 그림 3에 나타내었다.

실험체의 하단은 변위와 회전이 일어나지 않도록 고정하였고, 1층 상단은 전혀 구속하지 않았으며, 2층 상

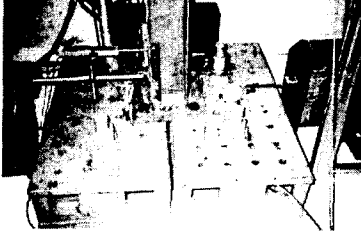


그림 3. 기둥하단부 연결 및 다이얼 게이지

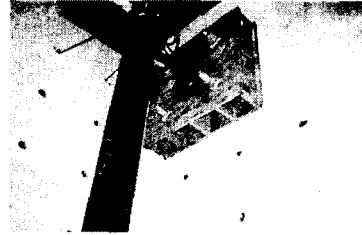


그림 4. 스크류-잭과 U-볼트

단은 수평변위를 구속하였다. 스크류 잭은 수평하중으로 인한 실험체의 수평이동을 방지하고 기둥 상단에 작용하는 수직하중을 편심 없이 재하시키기 위하여 설치하였다. 스크류 잭 설치도는 그림 4와 같다.

수직하중에 대하여 이상적인 롤러 지지(roller support) 조건을 만들기 위해 스크류 잭 앞면에 볼록한 모양의 작은판을 용접하여 부착하였다. 그리고 그림 4에서 보는 바와 같이 각각의 스크류 잭에 보 하단의 기둥을 감싸도록 U자 형의 볼트를 설치하였다.

2.2 실험 장비

2.2.1 일반사항

본 실험은 현대기술연구소 구조실험실에서 수행되었다. 실험은 2000kN을 지지할 수 있는 반력프레임(loading frame), 반력바닥(strong floor), 반력기둥(loading column) 안에서 수행되었다. 반력바닥과 반력벽의 두께는 각각 1.0m와 2.0m이다. 그림 5는 실험체의 3차원 투시도이다.

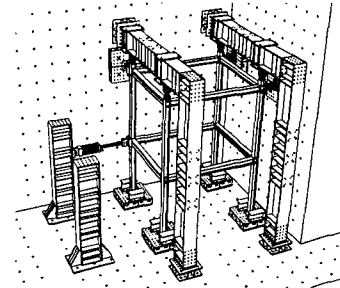


그림 5. 실험 배치도

2.2.2 반력프레임(Loading Frame)

반력바닥에서 반력프레임 상단까지 높이는 5.45m 이고, 반력벽에서 반력프레임 기둥 외측면까지는 4.4m 이다. 반력프레임 기둥의 하단은 베이스블록에 M24 볼트 16개로 고정하였으며, 베이스블록은 다시 반력바닥에 M50 볼트 4개로 고정하였다. 또한 반력프레임 보의 한쪽은 베이스블록에 16개의 M24 볼트로, 베이스블록은 다시 반력벽에 4개의 M50 볼트로 고정하였다. 반력프레임 보와 기둥의 연결부는 M24 볼트 16개를 사용하여 접합하였다. 반력프레임 단면의 높이 및 폭은 각각 0.4m와 0.6m 이고, 플랜지의 두께는 25mm, 웨브의 두께는 20mm 이다.

2.2.3 액츄에이터(Actuator)

250kN 용량의 액츄에이터 2개를 반력기둥의 플랜지에 설치하였다. 설치높이는 반력바닥으로부터 2.03m로서 실험체의 2층 바닥 부재의 중심높이에 하중을 가력할 수 있도록 하였다. 반력기둥 단면의 제원은 반력프레임의 제원과 동일하다. 반력기둥의 하단은 반력바닥에 6개의 M50 볼트로 고정하였다.

2.2.4 유압 잭(Hydraulic Jack)

1000kN 용량의 유압 잭을 반력프레임 보의 하부플랜지에 설치하였다. 실험체 4개의 기둥에 수직하중을 편심 없이 가할 수 있도록 4개의 유압 잭의 위치를 미세하게 조절하였다. 4개의 유압 잭을 한 개의 펌프에 연결하여 동시에 동일한 하중을 재하할 수 있도록 하였다. 로드 셀(load cell)은 실험체 기둥④ 상단에 설치하였다.

2.2.5 측정 장치

액츄에이터에서 측정된 수평변위에는 실험체 자체의 수평변위 뿐만 아니라 반력기둥의 수평변위까지 포함되어있다. 따라서 실험체만의 수평변위를 측정하기 위해서 LVDT(:linear variable differential transformer)를 실험체 기둥②와 ④에 각각 설치하였다. 그림 6은 액츄에이터와 LVDT의 설치도 이다. 실험이 진행되는 동안 2개의 LVDT, 2개의 액츄에이터 그리고 1개의 로드 셀로부터 나오는 전기적인 신호는 데이터 획득시스템에 취합되고, 그 결과는 제어실의 모니터를 통해 바로 확인할 수 있다.

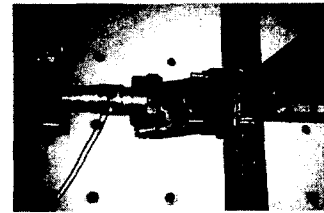


그림 6. 액츄에이터와 LVDT

2.2.6 실험장치 설치 순서

실험장치 설치 순서는 다음과 같다.

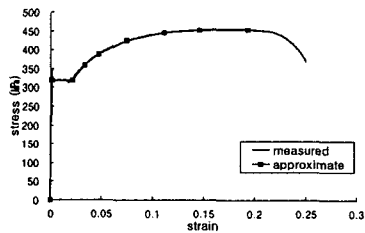
- (1) 베이스블록을 반력바닥과 반력벽에 각기 정해진 위치에 고정한다.
- (2) 3개의 스크류 잭을 반력벽에 위치한 베이스블록에 고정한다.
- (3) 실험체를 반력바닥에 위치한 베이스블록 위에 정위치시키고 바닥판을 베이스블록에 고정시킨다.
- (4) L-형의 반력프레임을 정위치시키고 반력바닥의 베이스블록과 반력벽의 베이스블록에 고정시킨다.
- (5) 유압 잭의 피스톤 중심이 각 기둥단면의 도심과 일치하도록 4개의 유압 잭을 설치한다.
- (6) 로드 셀을 기둥④의 상단에 설치한다.
- (7) 2개의 반력기둥을 반력바닥에 고정시킨다.
- (8) 2개의 액츄에이터를 반력기둥에 설치한다.
- (9) 200mm 스트로크를 갖는 LVDT 2개를 실험체 1층 상단 위치에 수평방향으로 설치한다. 50mm 스트로크를 갖는 다이얼 게이지 1개를 실험체 기둥②의 바닥판에 수평하게 설치한다.
- (10) 2개의 LVDT, 2개의 액츄에이터 그리고 1개의 로드 셀을 데이터 획득시스템에 연결시킨다.

3. 재료 시험

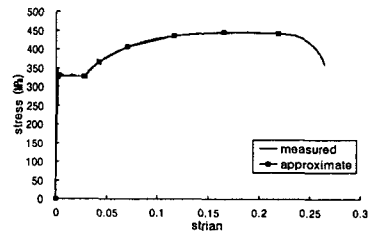
실험부재 시편의 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 한국공업규격 KS B 0801에 따라 수행되었다. 실험체의 보와 기둥의 공칭 치수는 H-150×150×7×10로 동일하나, 실제 측정된 보 부재와 기둥 부재의 치수는 표 1에서 보는 바와 같이 상이하였다. 보와 기둥부재의 플랜지와 웨브에서 각각 시편을 채취하였다. 4개 시편의 인장시험에 의한 응력-변형률 곡선은 그림 7 및 8과 같다. 응력-변형률 곡선은 구조용강의 전형적인 모양인 짧은 탄성영역, 긴 항복영역 및 매우 긴 변형경화영역을 나타낸다. 변형경화는 변형률 0.02와 0.03 사이에서 시작되었으며, 응력감소는 변형률 0.2에서 0.25 사이에서 발생하였다. 시편들의 항복응력은 310~350 MPa로 공칭항복응력 250MPa보다 큰 값을 나타내었다. 시편들의 극한응력은 대략 450MPa로 공칭극한응력 400~510MPa의 범위 안에 있음을 알 수 있었다. 측정된 응력-변형률곡선 및 대략적인 다중-선형 곡선을 그림 7과 8에 표현하였다. 다중-선형곡선에서 각 점들의 응력과 변형률 값을 표 2에 수록하였다.

표 1. H-150×150×7×10의 재원 및 단면특성

구분	H (mm)	B (mm)	t _r (mm)	t _w (mm)	r ₁ (mm)	A _w (mm ²)	I _x (10 ⁶ mm ⁴)	I _y (10 ⁶ mm ⁴)	
공칭치	150	150	10	7	11	4014	16.4	5.63	
측정치 (평균치)	기둥	152.3	149.9	10.2	6.75	-	4053	17.2	5.74
	보	149.1	150	9.2	6.5	-	3713	15.1	5.19

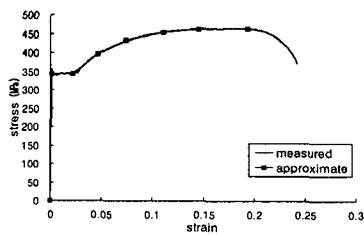


(a) 플랜지

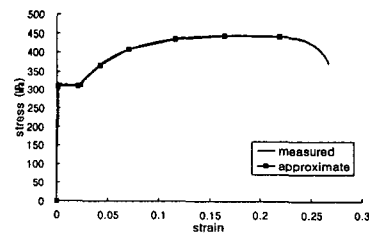


(b) 웨브

그림 7. 기둥 시편의 응력-변형률곡선



(a) 플랜지



(b) 웨브

그림 8. 보 시편의 응력-변형률곡선

표 2. 인장시편의 다중-선형 응력-변형률 데이터

기둥	플랜지	응력 (MPa)	0	320	320	360	388	426	446	453	455
		변형률	0	0.00147	0.0219	0.0338	0.0471	0.0745	0.1112	0.1455	0.1932
기둥	복부	응력 (MPa)	0	311	311	367	408	436	445	442	-
		변형률	0	0.00145	0.0206	0.0423	0.0706	0.1164	0.1649	0.2186	-
보	플랜지	응력 (MPa)	0	344	344	397	434	455	463	464	-
		변형률	0	0.00155	0.0219	0.0471	0.0745	0.1112	0.1455	0.1932	-
	복부	응력 (MPa)	0	327	327	366	406	435	445	443	-
		변형률	0	0.00168	0.0206	0.0423	0.0706	0.1164	0.1649	0.2186	-

4. 구조실험

4.1 실험체의 형상결함 측정

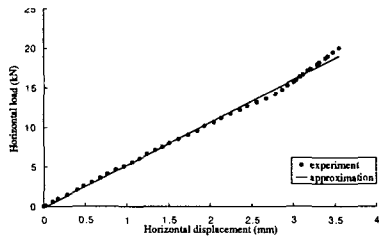
기둥의 수직도에 대한 불완전성을 광과거리 측정기를 이용하여 측정하였다. 직선도에 대한 불완전성은 횡 지지되지 않은 구조물의 거동에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 측정하지 않았다. 사용된 실험체가 조밀단면으로서 국부 좌굴에 영향을 받지 않기 때문에 국부 형상결함은 무시하였다. 실험체의 수직도에 대한 불완전성 측정결과는 표 3에 요약하였다. (+) 형상결함은 좌표축의 양의 방향으로 오프셋(offset)된 것을 가리킨다. X와 Y좌표축은 그림 1에 나타내었다.

표 3. 수직도에 대한 형상결함 측정

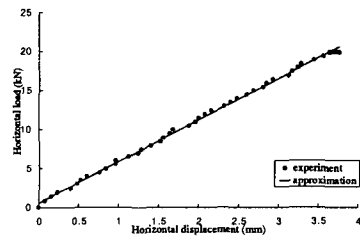
위치	형상결함 (mm)							
	기둥①		기둥②		기둥③		기둥④	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
2층 상단	-1.6	-6.8	2.91	-3.5	13.5	-10.7	-3.84	-7.21
1층 상단	2.8	-3.1	-0.3	-2.4	11.89	-8.43	-3.39	-4.95
1층 하단	0	0	0	0	0	0	0	0

4.2 예비 실험

실험체 기둥의 하단 바닥판을 베이스블록에 가능한 강접하는 것으로 계획하였으나, 볼트에 의한 연결로는 완전 강접합이 불가능하였다. 따라서 볼트 연결의 유연도를 파악할 수 있는 예비 실험을 수행하였다. 예비실험은 가능한 단순한 경계조건을 만들기 위해서 실험체 2층 상단을 구속하지 않았다. 두 개의 액츄에이터로 실험체 기둥②, ④에 동시에 동일한 수평하중을 가하였다. 수평하중은 20kN까지 증가시켰는데, 이는 실험체가 탄성 구간 안에 여유있게 포함될 수 있는 하중의 크기 이다. 수평변위는 기둥②, ④의 1층 상단 높이에 서 LVDT로 측정하였다. 측정된 하중-변위 관계는 그림 9에 나타내었다. 이 예비 실험의 결과는 기둥 하단 연결부의 유연도를 평가하는데 활용하였다.



(a) 기둥②



(b) 기둥④

그림 9. 예비 실험의 수평 하중-변위곡선

4.3 본 실험

수직하중을 4개의 기둥 상단에 680kN까지 선형재하하였다. 수평하중은 실험체 기둥②의 1층 상단에 가하되 실험체가 하중을 더 이상 지지할 수 없을 때까지 천천히 증가하였다. 이때 수직하중은 실험이 끝날 때까지 유지하였다. 수평하중은 컴퓨터 제어 시스템에 의하여 자동적으로 증가시켰다. 변위제어방법을 통하여 실험체가 극한강도에 도달한 후 하강하는 하중-변위곡선을 얻었다. 실험시간은 약 30분 정도가 소요되었다. 실험체의 수평변위를 측정하기 위하여 실험체 기둥②의 1층 상단 높이에 LVDT를 설치하였다. 하중-변위곡선은 그림 10에 나타내었다. 실험체의 하중저항능력은 표 4에 나타내었다. 이 하중저항능력은 실험체가 견딜 수 있는 최대하중을 가리킨다. 본 실험의 실험체는 항복에 의한 강도 감소와 더불어 $P-\Delta$ 모멘트로 인한 불안정성에 의해 파괴되었다.

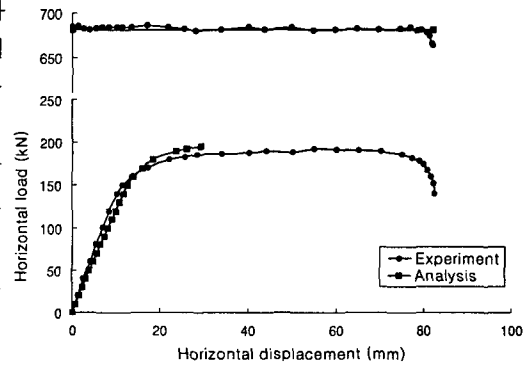


그림 10. 실험체의 수평하중-변위곡선 비교

표 4. 하중저항능력 비교

하중	실험(1)	해석(2)	AISC-LRFD 설계(3)	(2)/(1)	(3)/(1)
P	612.0	612.0	443.5	1.0000	0.7247
H	169.2	175.5	122.6	1.0372	0.7247

5. 수치해석

가장 널리 사용되고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 실험체에 대한 3차원 비선형해석을 수행하였다. 스프링 상수는 예비실험결과를 활용 해석하여 67,322kN/m로 결정하였다. 응력-변형률 선도는 다중-선형곡선으로 이상화하여 사용하였다(표 2, 그림 7와 8). 측정된 탄성계수와 항복응력을 해석에 사용하였다(표 5). 프아송비는 0.3을 사용하였다.

수직도에 대한 불안정성을 모델링하였다. 형상결함의 크기는 실험에서 측정된 데이터를 사용하였다(표 3). 최대 잔류응력은 항복응력의 50%를 사용하였다.

실험체의 해석으로부터 얻은 수평하중-변위곡선과 실험곡선을 그림 10에 비교하였다. 표 4에서 보는바와 같이 극한하중은 비선형해석결과와 실험데이터가 거의 일치하며 약 3.7%의 오차를 보인다. 이 차이는 실험

오차(즉, 경계조건, 편심하중, 물성치의 변화 및 잔류응력) 및 해석적 근사(즉, 공칭 잔류응력, 기하학적 결합 분포 및 단순화한 응력-변형률곡선)에 기인하는 것으로 판단된다.

표 5. 항복응력과 탄성계수

부재	구분	항복응력 (MPa)	탄성계수 (MPa)
기둥	플랜지	320	217,771
	웨브	311	214,504
보	플랜지	344	221,313
	웨브	327	194,814

6. 결 론

3차원 강뼈대 구조물의 극한강도 실험을 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시편의 인장시험 결과인 응력-변형률 곡선은 구조용강의 전형적인 모양인 짧은 탄성 영역, 긴 항복영역 및 매우 긴 변형경화영역을 가졌다.
- (2) 예비실험을 통하여 기둥 하단의 볼트 연결의 유연도를 평가하였다.
- (3) 실험체에 수직하중을 선행재하한 후, 실험체 기둥에 수평하중을 재하하여 실험체의 수평하중-변위곡선을 도출하였다. 이 실험결과들은 3차원 수치해석 방법의 검증에 위한 유용한 자료로 사용될 수 있다.
- (4) 하중저항능력은 비선형해석결과와 실험데이터가 거의 일치하며, 표 4에서 보는바와 같이 약 3.7%의 오차가 발생하였다.
- (5) 실험 및 해석에서 얻어진 수평변위는 상호간에 약간의 차이를 보인다. 이 차이는 실험오차 및 해석적 근사에 기인하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(2000-N-NL-01-C-162) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kanchanalai, T. (1977). The design and behavior of beam-columns in unbraced steel frames. AISI Project No. 189, Report No. 2, Civil Engineering/Structures Research Lab., University of Texas at Austin, 300 pp.
2. Yarimci, E. (1966). Incremental inelastic analysis of framed structures and some experimental verification. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Lehigh University, Bethlehem, PA.
3. Avery, P., and Mahendran, M. (2000). Large-scale testing of steel frame structures comprising non-compact sections. Eng. Struct., 22, 920-936.
4. Wakabayashi, M., and Matsui, C. (1972). Elastic-plastic behaviors of full size steel frame. Trans. Arch. Inst. Jpn., 198, 7-17.
5. Harrison, H. B. (1964). The Application of the principles of plastic analysis to three dimensional steel structures. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of Sydney.