

강구조를 위한 직접비탄성설계법

Direct Inelastic Design for Steel Structures

엄태성¹⁾ · 박홍근²⁾

Eom, Tae Sung · Park, Hong Gun

요약 : 본 연구에서는 합선강성을 사용하여 비탄성 해석 및 설계를 수행하는 새로운 설계방법을 개발하였다. 개발한 설계법은 선형해석을 수행하므로 수치해석의 안정성과 용이성을 갖추고 있으며, 동시에 반복계산으로 구조물의 비탄성 거동을 해석하므로 각 부재의 비탄성 강도 및 연성 요구량을 정확히 예측할 수 있다. 본 연구에서는 제안된 설계법의 절차를 정립하였고, 이를 고려한 컴퓨터 해석/설계 프로그램을 개발하였다. 또한, 제안된 설계법을 사용한 설계예제를 제시하였으며, 기존의 탄성 및 소성설계법과의 비교를 통하여 그 우수성을 입증하였다. 기존의 비선형설계방법은 일반적으로 초기 설계를 수행하고 비선형해석을 이용하여 초기설계안을 검증하는데 비하여, 제안된 방법은 반복계산을 통하여 비탄성해석과 설계를 동시에 수행하므로 각 부재의 비탄성 강도 및 연성 요구량을 직접적으로 계산할 수 있다. 또한 설계자의 의도에 따라 부재 강도 및 연성능력의 제한, 강기둥-약보 등의 비선형 설계전략을 효과적으로 구현하므로, 경제적이고 안전한 설계가 가능하다.

ABSTRACT : A new inelastic design method performing iterative calculations using secant stiffness was developed. Since the proposed design method uses linear analysis, it is convenient and stable in numerical analysis. At the same time, the proposed design method can accurately estimate the inelastic strength and ductility demands of the members by performing iterative calculation. In the present study, the procedure of the proposed design method was established, and a computer program incorporating the proposed method was developed. Design examples using the proposed method were presented, and its advantages were highlighted by comparisons with existing design methods using elastic or plastic analysis. Unlike the existing inelastic design methods performing the preliminary design on the structure and checking its validity using nonlinear analysis, the proposed integrated analysis-design method can directly calculate the strength and ductility demands of each member. In addition, the proposed design method can address the inelastic design strategy intended by the engineer, such as strength and ductility limits of members and the design concept of strong-column and weak-beam. As a result, economical and safe design can be achieved.

핵심용어 : 비선형설계, 소성설계, 합선강성, 비선형해석, 강구조

KEYWORDS : Inelastic Design, Plastic Design, Secant Stiffness, Inelastic Analysis, Steel Structure

1. 서론

일반적으로 철골구조물은 극한하중 재하시 뛰어난 연성능력을 나타낸다. 이러한 연성능력을 고려하여 강구조물의 구조설계에서는 구조물의 극한재하능력을 고려하는 한계상태설계법 또는 극한강도설계법이 사용되고 있다. 그러나 현재 일반적으로 사용하는 해석방법은 탄성해석에 머무르고 있어서 각 부재의 비선형 거동에 의한 강도 및 변형능력을 정확히 설계에 반영할 수 없으며, 따라서 합리적인 비선형 해석 및 설계방법의 도입이 요구되고 있다.

강구조물의 뛰어난 연성능력을 고려하여 소성해석 및 설계

법에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 현재 일부 실무에서도 사용되고 있다. 그러나 현재의 소성설계법은 실용성 면에서 몇 가지의 문제점을 갖고 있다. 첫째, 소성설계법은 소성 파괴메커니즘이 형성되는 구조물에만 적용이 가능하다. 그러나 구조물은 여러 가지 하중조건 및 사용성 기준을 만족시켜야 하므로 극한의 하중상태에서도 완전한 소성메커니즘이 형성되지 않는 경우가 많으며, 또한 완전소성능력을 지니도록 설계된 구조물은 국부좌굴방지를 위한 콤팩트단면을 사용하여야 하므로 오히려 경제성이 떨어진다. 둘째, 많은 구조물의 재하능력은 변형능력에 의하여 지배를 받는다. 부재의 국부좌굴, 접합부의 파단 등에 의한 취성파괴를 방지하기 위해서는

1) 서울대학교 건축학과 박사과정
(Tel. 02-880-7053, Fax. 02-871-5518, E-mail : kakyori@hotmail.com)
2) 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수(parkhg@snu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

부재 또는 구조체의 변형을 제어하여야 한다. 그러나 소성해석에서는 완전소성 파괴메카니즘만을 고려할 뿐 비탄성거동에 의하여 각 부재에 요구되는 변형량을 산정할 수 없으므로 이를 제어하기 위한 설계가 불가능하다.

구조물의 비선형설계를 위하여 일반적인 단계별 비선형해석기법을 사용하는 비선형 해석프로그램을 설계에 사용할 수 있다. 그러나 비선형 해석은 기존의 설계된 구조물에 대한 안전성의 검증차원에서 사용되고 있으며, 구조물 또는 부재의 비탄성 강도 및 연성요구량을 직접적으로 결정할 수는 없다. 따라서, 합리적인 설계를 위해서는 재설계와 비선형해석을 이용한 검증 작업을 반복하여야 한다.

이러한 기술적 문제점으로 인하여 설계 실무에서는 소성 및 비탄성 해석/설계방법에 대한 중요성은 오히려 감소되어 제한적으로 사용되고 있으며, 대신 구조물의 비탄성거동을 고려할 수 없는 기술적 단점에도 불구하고 탄성해석 및 설계가 보편적으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 기존의 비선형 설계방법들의 문제점을 개선하기 위하여, 선행연구(박홍근, 엄태성 2003)에서 제안된 직접비탄성내진설계법을 확장하여, 각 부재의 비탄성 강도와 연성능력을 결정하는 직접설계법으로 사용할 수 있으며 다양한 비선형 변형능력을 갖는 강구조물에 적용할 수 있는 실용적인 비선형 설계방법을 개발하고자 한다.

2. 설계개념

본 연구에서 제안하는 설계방법의 기본 개념은 구조물의 비선형 거동으로부터 나타나는 구조물 및 부재의 강도와 변형요구량을 그에 관계된 활선강성(secant stiffness)에 대한 선형해석을 사용하여 구하는 것이다.

그림 2(a)는 건물의 비탄성 변형형상을, (b)는 비선형 해석을 이용하여 구한 횡방향의 하중-변위곡선과 한 부재의 소성힌지에서의 모멘트-회전변형의 관계를 나타낸다. 그림 (b)는 구조물과 각 부재의 비선형거동에 의하여 발생하는 최대

강도 및 변형으로 정의되는 성능점(performance point)을 나타내고 있는데, 그림 (c)에 나타난 바와 같이 이 성능점에 의하여 정의되는 활선강성을 사용하여 선형해석을 수행하더라도 비선형 해석과 동일한 성능점을 정의할 수 있다. 그 이유는 외력의 횡하중의 크기나 분포가 동일하다면, 거동 경로가 다르더라도 동일한 변형에 대하여 하나의 강도만이 존재하기 때문이다. 이러한 원리가 성립하기 위해서는 하중의 분포가 동일하고, 각 부재에서 제하(unloading)가 일어나지 않아야 한다. 이는 일반적으로 정적 비선형해석에서 사용되는 가정이다.

반대로 하중을 받는 구조물에 대하여 활선강성에 대한 선형해석을 사용하여 강도 및 최대변형을 나타내는 성능점을 결정할 수 있다. 각 부재에서 이 성능점을 통과하도록 비선형 거동을 정의한다면, 비선형해석에 의해서도 동일한 성능점에 도달하게 된다. 이는 비선형해석이 아닌 활선강성을 사용하는 선형해석을 사용하여 비선형해석의 효과를 나타낼 수 있음을 가리키고 있다.

원칙적으로 구조물의 설계시에는 임의의 활선강성을 사용할 수 있으나, 구조물의 구조성능을 확보하고 경제적으로 설계하기 위해서는 각 부재의 소성힌지에서 설계전략에 맞는 적절한 활선강성을 선택하여야 한다. 이를 위하여 활선강성과 성능점에 대한 한계를 설정할 필요가 있다.

성능점이 존재할 수 있는 유효영역은 다양한 변수에 의하여 영향을 받는다. 설계자의 의도에 따라서 또는 설계기준에 의하여 최대 및 최소 한계강도가 결정될 수 있고, 공장에서 생산되는 강재의 종류와 단면성능에 따라 탄성강성이 다르게 결정된다. 또한 부재 또는 접합부의 하중재하능력의 저하없이

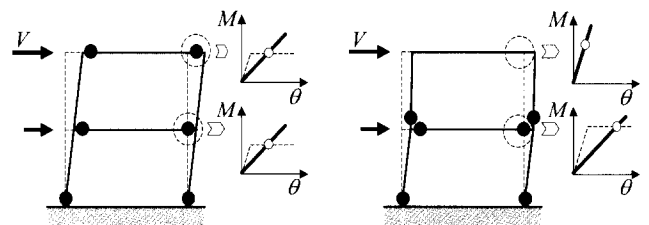
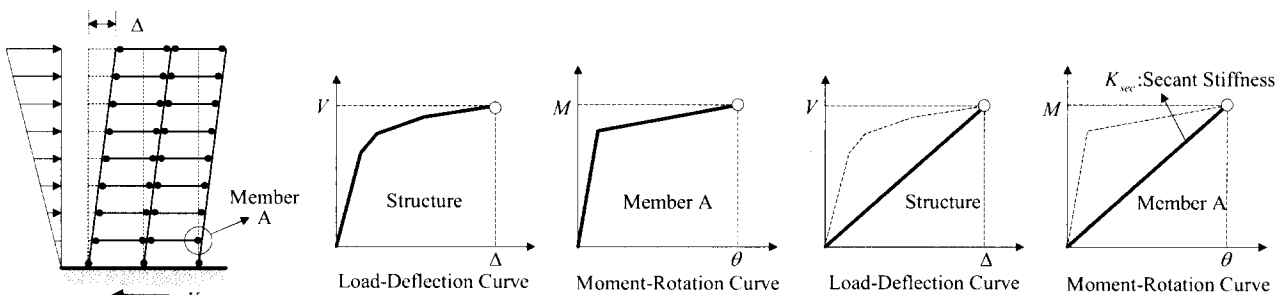


그림 2. Various design alternatives for an external load



(a) Deformed shape (b) Nonlinear analysis (c) Linear analysis using secant stiffness

그림 1. Traditional nonlinear analysis vs. equivalent linear analysis using secant stiffness

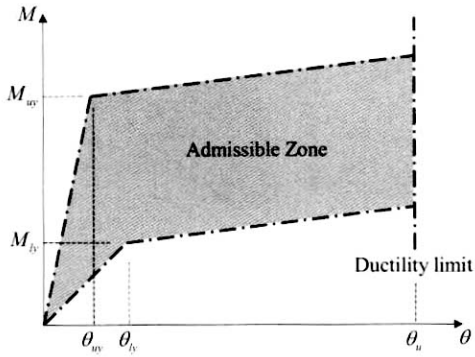


그림 3. Admissible zone of performance point

부재가 발휘할 수 있는 소성변형능력에 일정한 한계가 존재한다. 이러한 점들을 고려하면 성능점이 존재할 수 있는 유효영역을 그림 3에서 나타난 바와 같이 음영부분으로 나타낼 수 있다. 그림에서 M_{uy} , θ_{uy} = 최대한계휨강도와 이때의 항복변형각, M_{ly} , θ_{ly} = 최저한계휨강도와 이때의 항복변형각, θ_u = 부재의 최대변형능력이다. 최저한계강도 M_{ly} 는 부재가 지나야 할 최소한의 강도로 설계자가 설계전략에 따라 임의로 정하거나 다른 하중조건에 의하여 요구되는 강도를 사용한다.

구조물에 대한 초기 해석시에는 각 부재의 성능점이 이 유효영역에 존재하는지 알 수 없으므로, 임의의 할선강성을 가정하여 해석을 수행하며, 해석결과 성능점이 유효영역에 존재하지 않을 경우에는 할선강성을 수정하며, 구조물을 구성하는 모든 부재의 소성힌지 영역에서 성능점이 유효영역에 포함될 때까지 반복계산을 수행한다.

각 부재의 성능점이 존재할 수 있는 유효영역에 대한 조건은 설계자의 설계개념에 따라서 임의로 설정될 수 있다. 예를 들어서 기둥의 취성과파괴를 방지하기 위하여 약보-강기둥의 설계개념을 도입하고자 한다면 기둥에 대하여 최저한계강도를 증가시키거나 소성힌지의 발생을 억제한다. 또한 연성접합상세가 현실적으로 가능하지 않다면 최대한계변형을 저감시킬 수 있다. 이와같이 설계자에 의하여 의도된 설계개념을 한계조건으로 이용한다면, 제안된 방법을 사용하여 설계개념을 만족하는 성능점의 결정이 가능하다.

3. 설계 절차

본 연구에서는 2장에서 소개된 설계개념을 사용하여 강구조물에 대한 직접비탄성설계(Direct Inelastic Design, DID)을 개발하였으며, 그 설계절차는 다음과 같다.

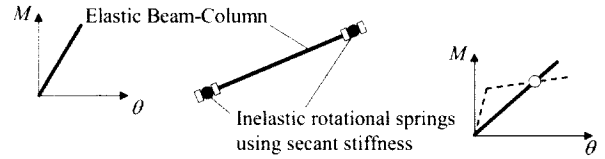


그림 4. Beam-column element with plastic hinge at two ends

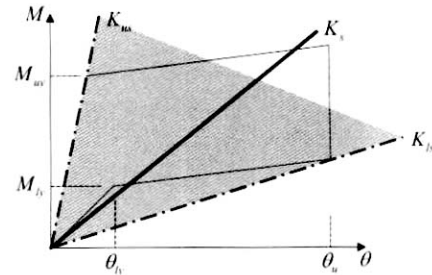


그림 5. Allowable range of secant stiffness at plastic hinge

- (1) 각 부재의 크기를 가정하고 최저한계 휨모멘트 M_{ly} 와 이때의 항복회전각 θ_{ly} 를 설정한다. 최저한계강도는 다른 하중조건에 대한 해석결과를 사용하거나, 설계자가 설계개념에 맞도록 제한할 수도 있다. 예를 들어 횡력에 대하여 설계하고자 하는 경우 중력하중에 대한 설계결과를 최저한계강도로 사용할 수 있다.
- (2) 사용하고자 하는 부재의 종류, 하중형태, 접합부의 상세 등을 고려하여, 기존의 설계기준이나 또는 실험 결과를 참고하여 각 부재의 소성힌지에서 발휘할 수 있는 최대한계회전각 θ_u 를 정의한다.(그림 3)
- (3) 각 부재의 단부에 소성힌지를 가정하여 Fig. 4 과 같이 소성부재모델을 구성한다. 필요한 경우에는 부재 중앙부에 한 개를 더 설치한다. 일반적인 범용탄성해석 프로그램을 사용하는 경우에는 소성힌지를 탄성거동을 하는 다른 영역과 구분하여 별도의 요소로 모델링할 수 있다. 구조해석시 이들 요소는 비탄성 거동을 나타낼 수 있도록 할선강성을 사용한다.(그림 4)
- (4) 각 소성힌지에서 할선강성을 가정한다. 그림 5에서 보는 바와 같이 할선강성의 크기는 다음 식을 만족시켜야 한다.

$$K_{ls} \leq K_s \leq K_{us} \quad (1)$$

여기서 K_s = 소성힌지에서의 할선휨강성, K_{us} , K_{ls} = 부재가 가질수 있는 최대와 최소의 할선휨강성 값으로 부재의 최대 및 최소 휨강도와 항복 및 한계 회전변형각 등에 따라서

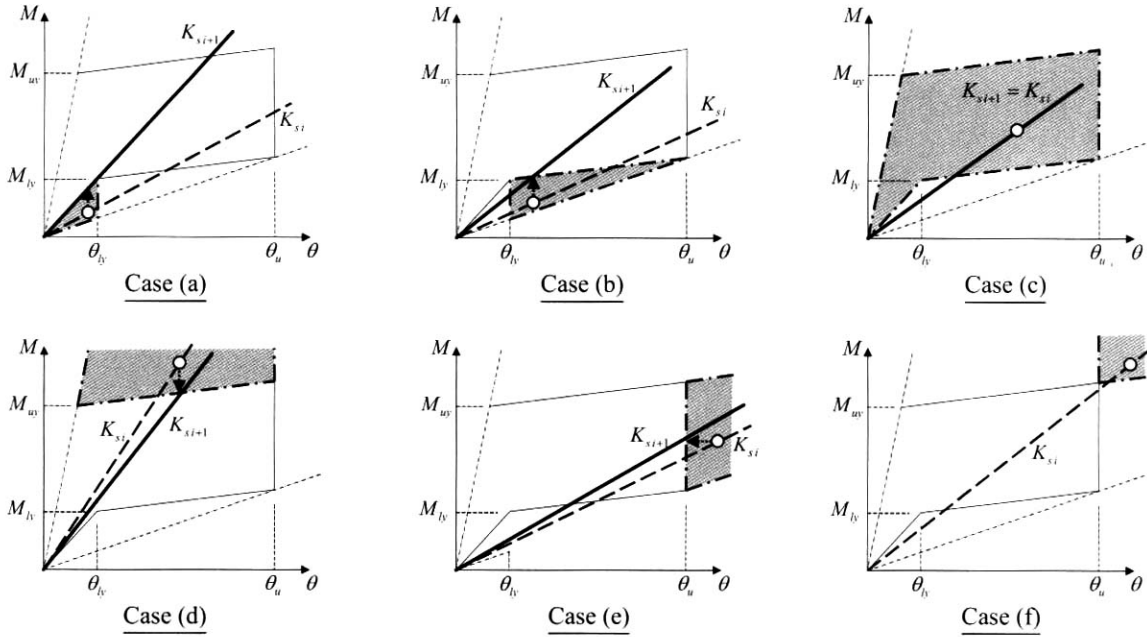


그림 6. Strategy for Updating secant stiffness at plastic hinge

결정된다.

재하므로, 유효영역에 성능점이 존재할 수 없으며, 해석을 종료한다.

- (5) 설계하중을 산정하고, 이에 대하여 할선강성을 사용하여 선형해석을 실시한다.
- (6) 선형해석결과 각 소성영역에서의 성능점이 유효영역을 벗어난 경우에는 할선강성을 수정한다. 설계자 임의의 방법으로 할선강성을 수정할 수 있으나, 본 연구에서는 그림 6와 같이 성능점의 위치에 따라 여섯 경우에 대하여 할선강성의 수정전략을 제안한다. 그림에서, $K_{s,i}$ = 현재 상태의 할선강성, $K_{s,i+1}$ = 다음 반복 계산을 위해 갱신할 할선강성을 나타낸다.

- (7) 모든 소성힌지에서 성능점이 유효영역에 포함될 때까지 할선강성을 수정하여 반복계산을 수행한다.
- (8) 모든 소성힌지에 대하여 해석결과 산출된 강도와 변형 요구량을 만족시키도록 부재의 크기를 정하고 접합부 상세설계를 실시한다.
- (9) 여러 가지 하중조건에 대하여 설계할 경우 하나의 하중에 대하여 설계한 후, 이 결과 산출되는 부재력을 최저한계강도로 정하고 연속적으로 다른 하중에 대하여 설계한다.

- Case (a): 탄성변형 상태에서 강도가 최저강도보다 작으므로, 할선강성을 최저한계강도에 해당하는 탄성강성으로 수정한다.
- Case (b): 변형이 유효영역에 포함되지만 강도가 최저한계강도보다 작으므로 할선강성을 증가시켜 최저한계강도보다 큰 강도를 유도한다.
- Case (c): 성능점의 강도와 변형 모두 유효존재영역에 포함되므로, 할선강성을 수정하지 않는다.
- Case (d): 변형이 유효영역에 포함되지만 강도가 최고한계강도보다 크므로 할선강성을 감소시킨다.
- Case (e): 비탄성 변형이 한계변형능력을 초과하여 발생하므로 할선강성을 증가시킨다.
- Case (f): 변형과 강도 모두 유효영역의 한계를 벗어나 존

4. 설계 방법의 적용

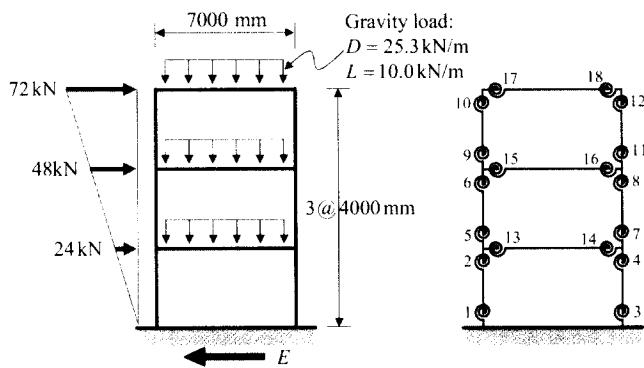
본 연구에서 제안된 직접비탄성설계(Direct Inelastic Design, DID)를 구현하기 위하여 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 제안된 해석방법의 검증을 위한 예제 건물은 3층 1경간 건물이고, 건물의 형상과 하중조건을 그림 7(a)에 나타내었다. 건물에는 각 층마다 고정하중 $D = 25.3 \text{ kN/m}$ 와 적재하중 $L = 10 \text{ kN/m}$ 가 균등하게 작용한다. 또한 횡하중 $E = 144 \text{ kN}$ 이 높이에 비례하는 분포로 각 층에 작용한다. 사용한 강재의 항복강도는 $F_y = 240 \text{ MPa}$ 이다.

예제 건물의 설계시 중력하중과 횡하중의 중첩을 고려한 하중조합 $1.2D + 0.5L + 1.5E$ 에 대하여 직접비탄성설계를

실시한다. 이때, 모든 보와 기둥의 접합부는 완전접합으로 되어 있다고 가정한다. 활선강성을 이용한 비탄성해석시 그림 7 (b)에 나타난 바와 같이 양단에 회전스프링을 갖는 보-기둥 요소로 부재를 모델링한다. 회전스프링은 발생가능한 소성힌지를 나타내는데, 부재 중간에서 소성힌지가 발생하지 않는다고 가정하면 예제건물은 모두 18개의 잠재적인 소성힌지를 갖는다.

제안된 방법을 이용한 예제 건물의 비탄성 해석을 위하여 다음의 가정 및 설계전략을 사용하였다.

- (1) 각 소성힌지에서 요구되는 최저한계휨강도는 표 1과 같이 정한다.
- (2) 강기둥-약보의 설계개념을 적용한다. 기둥의 경우 지면에 접지된 1층하부(그림 7의 1, 3 요소)에서만 소성힌지가 발생하고, 나머지 소성힌지에서는 회전스프링(2, 4~10 요소)의 강성을 무한한 값으로 하여 탄성거동을 하도록 한다. (표 3 참고)
- (3) 소성힌지에서는 완전탄소성(elastic-perfectly plastic) 거동을 가정하여 항복 이후 변형경화(strain hardening)가 일어나지 않는다.
- (4) 소성힌지를 모델링하기 위하여 추가한 회전스프링요소는 탄성변형이 발생하지 않고, 부재항복 이후에 소성변형만 발생하는 소성강체(rigid plastic element)로 가정한다.
- (5) 설계 편의상 부재의 휨재하능력은 소성강도 M_p 로 가정하였으며, 축력에 따른 휨재하능력의 변화는 고려하지 않는다.



(a) Configuration and load profile (b) Analysis model
그림 7. Design example of 3-story frame

표 1. Minimum strength limits of plastic hinges

Member	Minimum flexural strength (kN-mm)
Columns(1st story)	221000(H-250×255×14×14)
Beams	185000(H-294×200×8×12)

표 2. Ductility limits for performance level

Member	Performance Level	
	A	B
Columns(1st story)	$\theta_{pu} = 0.005^{1)}$	$\theta_{pu} = 0.01^{1)}$
Beams	$\theta_{pu} = 0.01^{1)}$	$\theta_{pu} = 0.02^{1)}$

1) Plastic rotation limit $\theta_{pu} = \theta_u - \theta_y$

- (6) 모든 보의 양단에 소성힌지가 발생할 경우 완전한 붕괴메커니즘이 형성되어 구조물의 변형이 무한히 발생하므로, 변형을 제어한 비탄성설계가 불가능하다. 따라서 최상층 보에서 발생할 수 있는 소성힌지 중 적어도 한개(17 요소)는 반드시 탄성상태에 머물도록 설계하여 완전한 소성메커니즘의 발생에 의한 붕괴를 방지한다. (표 3 참고)
- (7) 작용하중, 플랜지 및 웨브의 세장비 등에 따른 한계변형량은 FEMA- 273에 제시되어 있는데, 본 예제에서는 기존 설계법과의 명확한 비교를 위하여 두 가지 성능수준 A와 B에 대하여 표 2에 나타난 한계변형량을 적용한다. 표 2에 나타난 한계변형량은 순수한 소성변형량 θ_{pu} 만을 나타낸다.

4.1 설계예제 1

설계실무에서는 형강을 사용하는 경우 부재 단면이 한정되어 있고, 부재 양단의 소성힌지에서의 소성휨강도가 동일하며, 활선강성도 단면의 크기에 따라 결정되어야 한다. 그러나 본 예제에서는 직접비탄성설계법의 장점을 나타내기 위하여 이러한 설계상의 제한을 무시하고, 각 소성힌지별로 앞서 소개한 설계전략에 따라 설정된 유효영역에서 성능점을 자유롭게 결정할 수 있는 것으로 가정하였다. 위의 설계실무상의 제한조건을 반영하는 예제는 설계예제 2에 소개되어 있다.

예제건물에 대하여 각 소성힌지에서의 활선강성을 임의로 가정하여 해석을 수행하였다. 이때 기둥과 보의 탄성강성은 각각 $I = 2.04 \times 10^8, 2.37 \times 10^8 \text{ mm}^4$ 으로 일정한 것으로 가정하였다. 성능수준 B에 대하여 각 소성힌지에서 임의로 가정한 활선강성의 크기는 표 3에 나타나 있는데, 보 부재의 경우 중력하중과 횡하중의 중첩을 고려하여 내력이 더해지는 방향과 상쇄되는 방향의 회전스프링의 강성을 달리하였다. 중력하중과 횡하중이 같은 방향의 휨모멘트를 유발하는 보의 소성힌지(14, 16, 18)에서는 최저활선강성 K_b 의 2배를, 서로 다른 방향의 부재력을 유발하는 소성힌지(13, 15)에서는 5배를 각각 사용하였다. 기둥의 소성힌지(1, 3)는 최저활선강성의 2배를 사용한다.

선형해석으로부터 구한 각 소성힌지 성능점의 비탄성 강도와 변형량을 표 3과 그림 8에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 활선강성을 가정한 후 한번의 선형해석을 통하여 비탄성 강도와 변형량을 예측하였다. 해석결과 성능점이 모두 유효영역에 존재하므로 표 3의 결과는 하나의 비탄성 설계안이 될 수 있다.

표 3. Direct inelastic design using secant stiffness; Single step (Design example 1)

Plastic hinges		Assumed Secant stiffness of rotational spring (kN-mm)	Performance Points	
			Moment (kN-mm)	Plastic rotation(rad)
column	1	4.41×10^7 ¹⁾	3.18×10^5	7.22×10^{-3}
	3	4.41×10^7 ¹⁾	3.30×10^5	7.48×10^{-3}
	13	4.63×10^7 ²⁾	2.22×10^5	4.81×10^{-3}
beam	14	1.85×10^7 ¹⁾	3.19×10^5	1.72×10^{-2}
	15	4.63×10^7 ²⁾	1.87×10^5	4.05×10^{-3}
	16	1.85×10^7 ¹⁾	2.97×10^5	1.61×10^{-2}
	17	1.85×10^7 ¹⁾	2.17×10^5	1.17×10^{-2}
	18	1.85×10^7 ¹⁾	2.17×10^5	1.17×10^{-2}

1) $K_s = 2.0 \times (M_{ly} / \theta_{pu})$, 2) $K_s = 5.0 \times (M_{ly} / \theta_{pu})$

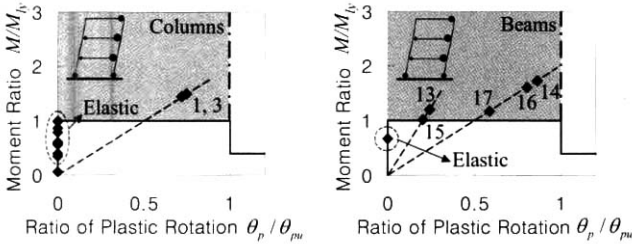


그림 8. Performance points at plastic hinges; Single step (Design example 1)

그러나 경제적인 설계를 위해서는 부재의 구조성능을 가능한 최대로 발휘하도록 설계하여야 한다. 즉, 모든 부재의 성능점이 최저한계강도와 최대변형능력을 나타내는 유효영역의 경계에 존재하도록 설계하는 것이 바람직하다. 이를 위하여 3장에 제시된 활선강성 수정방법을 적용한 반복계산으로 건물을 설계하였다. 최초의 활선강성은 K_{ls} 로 가정하여 반복해석을 수행하였고, 이때 적용되는 가정 및 설계전략은 앞선 방법과 동일하다. 표 4는 각 소성힌지 성능점의 요구강도와 변형량을 나타내고 있으며, 그림 9는 변형형상과 무차원화시킨 유효영역에서의 성능점 위치를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 소성힌지의 성능점이 유효영역의 경계에 존재하며, 이는 설계자에 의하여 의도된 설계조건을 충족시키는 최적설계가 이루어졌음을 가리킨다. 이와 같이 반복계산을 수행할 경우 부재의 소성변형능력을 최대한 활용할 수 있는 최적설계가 가능하다.

4.2 설계예제 II

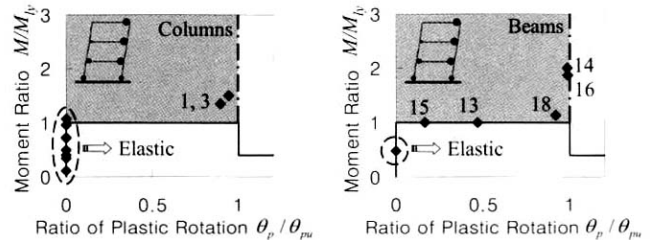
설계예제 I에서는 활선강성을 이용한 선형해석에 의하여 유효영역내에서 성능점이 자유롭게 결정되었다. 그러나 다음과 같은 현실적인 제약으로 인하여 앞선 해석결과를 그대로 설계에 반영하는 것은 불가능하다.

- (1) 공장에서 생산되는 형강은 제한된 종류와 크기로 생산되므로, 유효영역 전체가 성능점이 될 수 없으며 그림 10과 같이 유효영역에서 단면성능이 불연속적으로 존재한다.

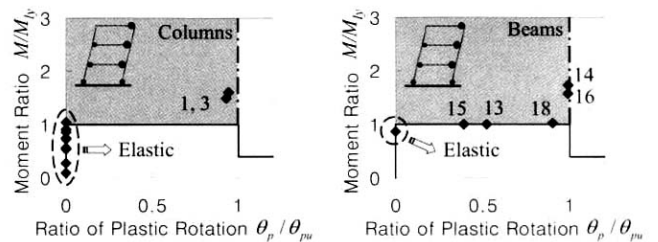
표 4. Direct inelastic design using secant stiffness; Iterative procedure (Multiple steps) (Design example 1)

Plastic hinges		Performance Level A		Performance Level B	
		Moment (kN-mm)	Plastic rotation(rad) ¹⁾	Moment (kN-mm)	Plastic rotation(rad) ¹⁾
column	1	2.98×10^5	4.47×10^{-3}	3.30×10^5	9.29×10^{-3}
	3	3.32×10^5	4.71×10^{-3}	3.55×10^5	9.43×10^{-3}
	13	1.85×10^5	4.68×10^{-3}	1.85×10^5	1.05×10^{-3}
beam	14	3.71×10^5	9.85×10^{-3}	3.20×10^5	1.98×10^{-2}
	15	1.85×10^5	1.64×10^{-3}	1.85×10^5	7.83×10^{-3}
	16	3.45×10^5	9.88×10^{-3}	2.91×10^5	1.98×10^{-2}
	17	2.11×10^5	9.17×10^{-3}	1.89×10^5	1.80×10^{-2}
	18	2.11×10^5	9.17×10^{-3}	1.89×10^5	1.80×10^{-2}

1) Plastic rotation $\theta_{pu} = \theta_u - \theta_y$



(a) Performance level A (drift = 1.34%)



(b) Performance level B (drift = 2.00%)

그림 9. Performance points at plastic hinges; Iterative procedure(Design example 1)

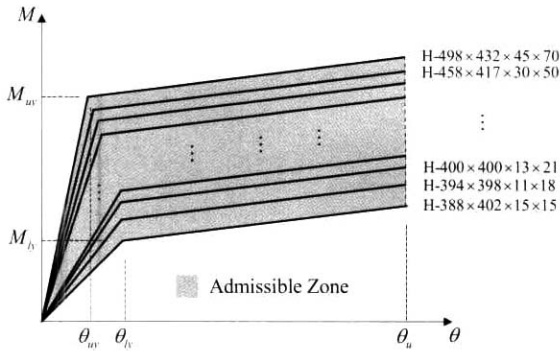


그림 10. Discrete section properties of steel members

- (2) 단면의 크기에 따라서 단면적과 단면2차모멘트 등 단면성능이 달라지므로 부재의 탄성강성이 변화한다.
- (3) 한 부재의 양단부에 발생한 소성힌지의 휨재하능력은 동일하여야 한다.

3장에 소개된 반복해석방법에 위의 세 조건을 반영하여 그림 7의 예제건물을 설계하였다. 형강은 현재 우리나라에서 생산되는 단면의 크기를 사용하였다. 해석을 위한 기본 가정과 설계전략은 앞선 예제와 동일하다. 표 5와 그림 11은 해석결과 나타난 소성힌지 성능점의 비탄성 강도 및 변형 요구량을 나타내고, 표 5은 비탄성 해석을 통하여 구한 각 부재의 크기를 나타낸다. 그림 9와 비교하면 그림 11의 설계결과는 각 소성힌지의 변형능력을 최대로 발휘하지 못하는데, 이는 기성 강재 단면크기가 불연속적이고 각 부재는 하나의 단면을 갖고 있으므로 양단의 소성힌지가 같은 크기의 휨재하능력을 갖기 때문이다.

할선강성을 이용한 선형해석방법의 검증을 위하여, 앞서 제안된 방법으로 설계한 강구조물에 대하여 DRAIN-2DX를 이용하여 비선형해석을 실시하였다. 그림 12는 비선형해석결과를 보여주는데, 선형해석과 비선형해석에 의한 경로는 다르지만 최종적으로 같은 성능점에 도달한다. 또한, 그림에서 두 가지 해석에 의하여 구한 각 소성힌지에서의 비탄성변형량이 정확히 일치하는 것을 알 수 있다.

4.3 기존 설계법과의 비교

그림 7의 구조물에 대하여 탄성 및 소성 설계를 실시한 결과를 표 7에 나타내었다. 소성설계시 그림 13과 같은 붕괴메커니즘을 고려하였으며, 모든 보의 휨재하능력이 동일하다고 가정하였다. 표 7에 나타난 바와 같이 탄성설계의 경우 비탄성설계(표 6) 및 소성설계(표 7) 결과와 비교하여 더 많은 강재량이 요구되는데, 이는 탄성설계시 비탄성 거동에 의한 힘의 재분배를 고려하지 못하기 때문이다.

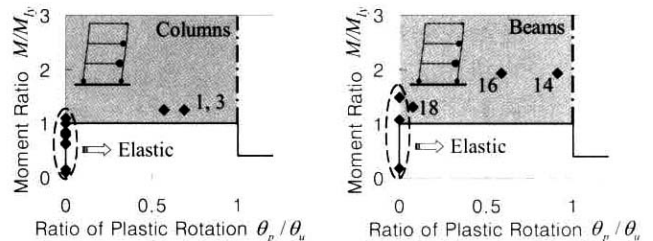
표 5. Direct inelastic design using secant stiffness: iterative procedure for discrete section sizes (Design example II)

Plastic hinges		Performance Level A		Performance Level B	
		Moment (kN-mm)	Plastic rotation (rad) ¹⁾	Moment (kN-mm)	Plastic rotation (rad) ¹⁾
column	1	2.76×10^5	2.86×10^{-3}	3.26×10^5	5.91×10^{-3}
	3	2.76×10^5	3.44×10^{-3}	3.26×10^5	6.02×10^{-3}
beam	13	-	-	-	-
	14	3.58×10^5	9.11×10^{-3}	3.58×10^5	1.36×10^{-3}
	15	-	-	-	-
	16	3.58×10^5	5.87×10^{-3}	2.86×10^5	1.67×10^{-2}
	18	2.42×10^5	0.78×10^{-3}	1.86×10^5	1.57×10^{-2}

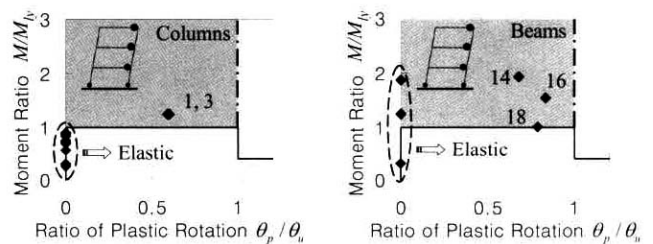
1) Plastic rotation $\theta_{pu} = \theta_u - \theta_y$.

표 6. Design results: member sizes (Design example II)

Member	Performance level A	Performance level B
Column	1st	H-294x302x12x12
	2nd	H-294x302x12x12
	3rd	H-294x302x12x12
Beam	1st	H-450x200x9x14
	2nd	H-450x200x9x14
	3rd	H-396x199x7x11
Total weight	3488.2 kg	3369.2 kg



(a) Performance level A (drift = 1.03%)



(b) Performance level B (drift = 1.54%)

그림 11. Performance points at plastic hinges: iterative procedure for actual discrete section sizes (Design example II)

그림 14는 표 6에 제시된 DID에 의한 설계와 표 7에 제시된 기존의 탄성 및 소성 설계에 대하여 DRAIN-2DX로 비선형해석을 수행한 결과를 보여준다. 비선형해석은 변위제어방

법을 사용하여 최상층 변위가 300mm($\Delta/h = 2.50\%$)일때까지 수행하였다. 그림 14 (a)는 탄성설계에 대한 해석결과를 보여주는데, 부재가 과설계되어 설계하중보다 30% 이상 큰 강도를 갖는다. 반면 (b)와 (c)의 소성 및 비탄성 설계에 대한 해석결과는 설계하중과 거의 같은 하중재하능력을 갖는다.

그림 14는 기존의 탄성 및 소성설계의 한계를 명확히 보여준다. 일반적으로 탄성설계시 비선형 거동에 의한 하중의 재분배를 고려하지 못하므로 과설계된다. 이러한 결과는 일반적인 하중에 대해서는 안전측의 설계이지만, 구조물의 설계강도와 관계없이 비선형거동을 일으키는 지진하중에 대해서는 안전측이 아니다. 탄성설계시에는 구조물의 비선형거동을 예측하지 못하므로 그림 14(a)에 나타난 바와 같이 비탄성 거동시 약층현상이 일어나거나 특정 부재에 소성변형이 집중되므로 구조물이 조기에 파괴하여 충분한 변형능력을 발휘할 수 없다. 소성설계의 경우 완전한 붕괴메커니즘을 고려하여 하중을 재분배하므로 경제적인 설계가 가능하지만, 일반적으로 구조물이 복잡해지면 완전소성메커니즘을 가정하여 소성해석을 수행하기 어렵고, 소성해석을 하더라도 각 부재의 비탄성 변형요구량을 산정할 수 없으므로 비탄성변형을 제어한 설계가 불가능하다. 따라서, 구조물의 완전소성메커니즘이 형성되어 설계강도를 발휘하기 이전에 국부적으로 소성변형이 과도하게 집중되어 연성파괴가 발생할 수 있다. 이는 그림 14(b)에 잘 나타나 있는데, 성능수준 A와 B의 한계연성이 요구되는 경우 각각 설계강도의 70%와 90%밖에 발휘하지 못한 상황에서 보 부재에서 연성파괴가 발생하였다.

반면, 직접비탄성설계방법은 소성힌지의 발생위치를 정확히 예측하고 각 부재의 비탄성 강도 및 변형 요구량을 구할 수 있다. (표 5, 그림 11) 또한 각 소성힌지에서의 변형을 제어하므로 약층현상이나 국부파괴를 막고 완전한 붕괴메커니즘이 형성되지 않도록 적절한 강성 및 강도의 분배가 가능하다. (표 3) 또한 설계자의 내진설계전략에 따라 성능점의 유효영역을 조정하여 비탄성설계를 수행하므로 다양한 성능수준에 대한 설계가 가능하다.

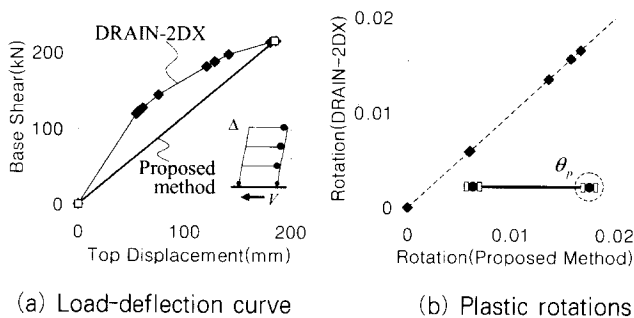


그림 12. Verification of the Direct Inelastic Design (Performance level B)

표 7. Results of traditional elastic and plastic design method

Member		Elastic design	Plastic design
Column	1st	H-300×300×10×15	H-300×300×10×15
	2nd	H-294×302×12×12	H-294×302×12×12
	3rd	H-294×302×12×12	H-294×302×12×12
Beam	1st	H-390×300×10×16	H-396×199×7×11
	2nd	H-500×200×10×16	H-396×199×7×11
	3rd	H-396×199×7×11	H-396×199×7×11
Total weight		3876.4 kg	3292.6 kg

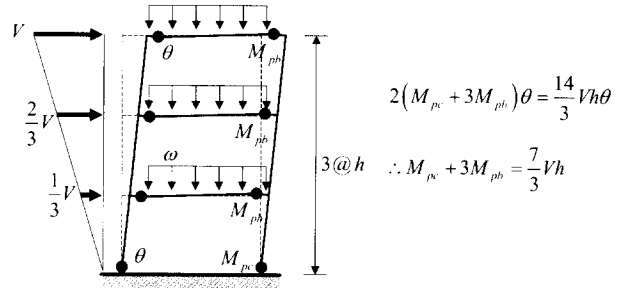
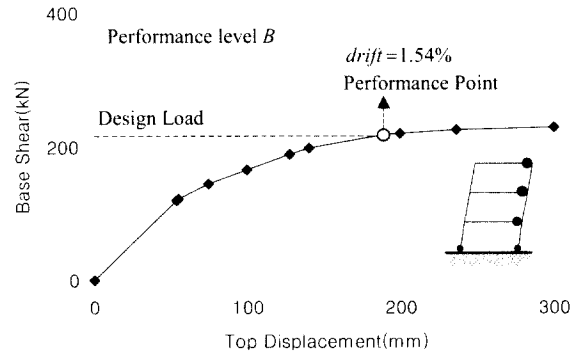
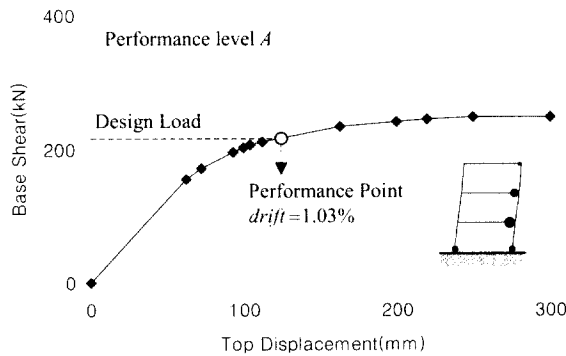
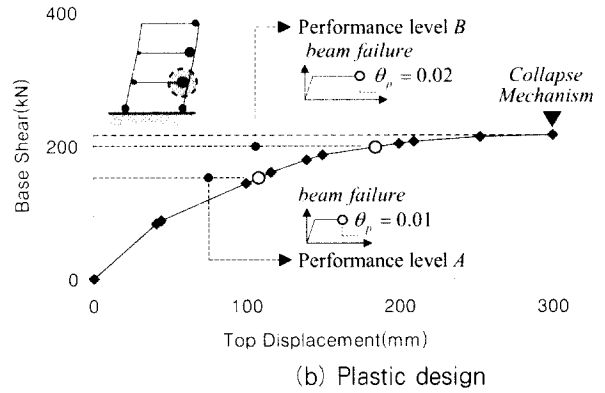
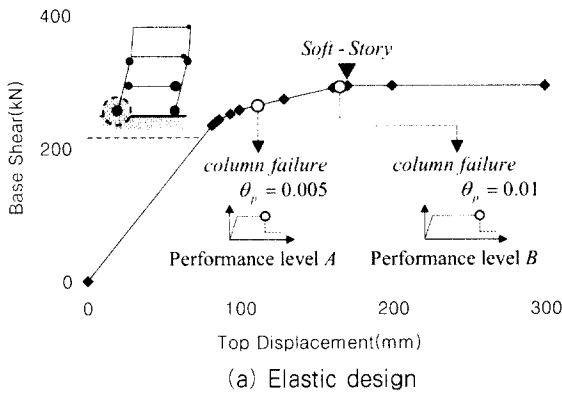


그림 13. Collapse mechanism for plastic analysis

5. 결론

본 연구에서는 할선강성을 사용한 선형해석을 통하여 구조물의 비탄성설계를 수행할 수 있는 직접비탄성설계법을 제안하였다. 제안된 방법은 선형해석을 사용함으로써 해석이 편리하고 할선강성을 이용함으로써 하중 및 변형 요구량에 대한 비탄성 거동특성을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 직접비탄성설계법의 절차를 정립하고, 이를 적용한 설계예제를 소개하고 설계결과를 기존의 탄성 및 소성 설계결과와 비교하였다. 그 결과, 제안된 설계법을 이용할 경우 소성힌지 발생이후 하중의 재분배를 고려하므로 경제적인 설계가 가능하였고, 각 소성힌지에서 요구되는 비탄성변형량을 제어하므로 안전한 설계가 가능하였다. 본 연구에서 제안된 직접비탄성설계법의 특징은 다음과 같다.

- (1) 직접비탄성설계법은 주어진 하중조건에 대하여 직접적으로 비탄성 강도 및 연성 요구량을 산정한다.
- (2) 직접비탄성설계법은 소성설계에서 가정하는 완전 붕괴 메커니즘을 필요로 하지 않는다. 따라서, 초고층 건물이나 중저진지역의 건물 등과 같이 한계변형이 요구되는 구조물의 설계에 적용할 수 있다.
- (3) 강기동-약보, 한계연성 등과 같이 설계자가 의도하는 설계전략을 반영한 설계가 가능하므로, 경제적이고 안전한 건물의 설계가 가능하다.
- (4) 부재 수준에서 연성능력을 고려하므로, 소성힌지의 발



(c) Direct inelastic design

그림 14. Nonlinear analyses for elastic, inelastic, and plastic design results

생위치와 변형량을 조절함으로써 경제적이고 효율적인 비탄성설계가 가능하다.

(5) 활선강성을 사용한 선형해석을 수행하므로 수치해석의 안정성이 뛰어나고 편리하다.

본 연구는 강구조물에 대한 활선강성을 이용한 직접비탄성 설계법의 개발을 위한 기초연구로서, 그룹부재에 대한 설계, 불연속적인 형강 단면, 축력에 따른 휨재하능력의 변화, 불완전접합 등 설계실무의 제한조건을 고려하는 설계방법은 후속 연구에 제시하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(KEERC)와 건교부(초고층연구단, 과제번호: 03산학연C103A1040001-03A0204-00110)의 재정적 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

대한건축학회 (2000), 건축물 하중기준 및 해설
박홍근, 엄태성 (2003), 활선강성을 이용한 직접내진설계,

지진공학회 학술발표회 논문집, Vol. 7, No. 2
ATC (1996), *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California
Building Seismic Safety Council (1997), NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA-273, Federal Emergency Management Council, Washington, D.C.
Akenori Shibata and Meta A. Sozen (1976), Substitute-Structure Method for Seismic Design Method in R/C, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 102, No. ST1, January
Rakesh Allahabadi and Graham H. Powell (1988), DRAIN-2DX User Guide, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-88/06, March
V. Prakash, G. H. Powell, and S. Campbell (1993), DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide-Version 1.10, University of California, Report No. UCB/SEMM-93/17, November,
G. H. Powell (1993), DRAIN-2DX Element

Description and User Guide for Element
Type01, Type02, Type04, Type06, Type09, and
Type15-Version 1.10, University of California,

Report No. UCB/SEMM-93/17, December

(접수일자 : 2003. 11. 26 / 심사일 2003. 12. 29 /
심사완료일 2004. 4. 1)