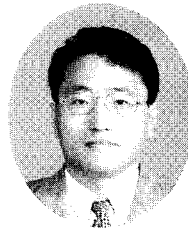
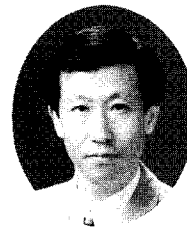


2000년 NEHRP 기준의 프리캐스트 콘크리트 구조에 관한 내진 설계 규정

- Design Codes of the Precast Concrete Structure as Seismic-Force Resisting Systems in 2000 NEHRP Recommended Provisions -



서수연*



문정호**



이리형***

1. 서 론

프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete, 이하 PC) 구조는 공장 생산된 부재를 현장에서 조립하는 시스템으로 유럽에서 시작되어, 국내를 비롯한, 일본, 미국 뉴질랜드 등 많은 나라에서 널리 적용되어 온 콘크리트 공법 중의 하나이다. 국내의 경우에는 1990년대 초반까지 아파트 건물에 널리 적용되어 왔으나, 최근에는 그 적용이 미미하여, 1990년대 초반에 지어진 많은 PC 공장들의 가동률이 현저히 저하되고 있는 상황이다.

이러한 문제점을 인식하여 1999년 9월 건설기술연구원과 삼성물산주식회사가 공동으로 "PC 공법 활성화를 위한 한·일 공동 세미나"를 개최하기도 하였지만, 아직까지 PC 구조를 활용한 건물의 설계는 미흡한 수준이다. 반면에 일본, 뉴질랜드, 그리고 미국에서는 현재까지 많은 건물에 이 공법이 적용되고 있으며, 이에 따라 PC 관련 기준들이 지속적으로 발전되어 강진 지역에서도 사용될 수 있는 안전한

공법으로 인정되고 있다. 건축 구조 관련 기술자의 한 사람으로서 PC 공장의 활성화와 기술의 발전이라는 측면에서 PC 구조를 이용한 공법이 널리 활용되기를 기대하며 본고를 준비하였다.

본고에서는 미국에서의 PC 구조 관련 기준의 변화 과정을 관찰하고 강진 지역에서 PC 구조 설계를 위한 기준상의 요구 사항 등에 대하여 조사하고자 하였다. 특히, 최근 개정안이 제안된 2000년 NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) 기준에서 다루고 있는 PC 구조의 지진 저항 시스템에 대한 내용과 그 변천 과정을 소개하고자 한다. 2000년 NEHRP 기준에서는 지진 저항 시스템과 함께 콘크리트 내의 정착, 슬래브의 다이어프램에 관한 내용이 새로이 개정되었으나, 본고에서는 지진 저항 시스템에 관한 내용만을 요약하고자 한다. 현재 제안된 2000년 NEHRP 기준은 인터넷 주소 www.bssonline.org로 접속할 경우, 무상으로 다운로드 받을 수 있다. 미국의 구조 관련 기준은 하나의 기준으로 통합되기 위해서 현재 준비 중인 단계이며, 통합 기준의 명칭은 IBC(International Building

Code)로 지정되어 있다. 이 기준에서 지진 관련으로는 NEHRP 기준이 기본으로 선정될 예정이기 때문에 향후, PC 구조의 내진 설계에 관한 미국의 설계 방향을 살펴본다는 측면에서도 NEHRP 기준의 이해는 중요할 것으로 판단된다.

2. PC 구조에 관한 내용의 변천 과정

2.1 NEHRP 기준의 중요성

NEHRP 기준은 민간 기관에서 제정한 기준이 아니라 미국의 정부기관인 FEMA (Federal Emergency Management Agency)에서 제정하는 기준으로서, 국가 공공 건물의 경우에는 이 기준에 따라 설계되는 것이 원칙이다. 1985년 최초로 이 기준이 제정된 후, 1989년 Loma Prieta 지진 결과 때문에, 부시 대통령이 1991년 정부 지원을 받는 모든 건물 설계에 이 기준을 적용하여 설계하도록 하였다. 그리고, 1993년 BOCA(Building Officials and Code Administrators International)에서 지진 규정을 제정할 때, 1991년 NEHRP 기준을 근거로 하였고, 1994년 SBCCI(the

* 정회원, 한양대학교 STRESS 연구조교수

** 정회원, 한남대학교 건축공학과 교수

*** 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

Southern Building Code Congress International)에서도 Standard Building Code에 NEHRP 기준을 포함시키게 되었다. 최근 들어서는 BOCA, SBCCI, 그리고 ICBO가 하나로 통합되면서 만들어지는 IBC(International Building Code) 2000 지진 규정의 기본으로서 NEHRP 기준이 선정되는 등, 지진에 관련한 대표적인 미국의 기준으로 구축되고 있다.

2.2 NEHRP 기준의 역사

2.2.1 1985년 NEHRP 기준

1985년 최초로 NEHRP 기준이 제정될 당시에는 ACI 318-83 부록 A의 내용을 근간으로 PC에 관한 기준이 만들어졌다. 이 당시의 기준은 일체식 구조와 같은 안전성과 사용성을 확보하고 있다는 것이 입증될 경우, PC 부재를 지진 저항에 대해 사용할 수 있는 것으로 되어 있었으나, 당시에는 그 성능을 입증할 만한 자료가 없었기 때문에 1985년 NEHRP 기준에서는 PC 구조 방식을 강진 지역에 사용하는 것이 사실상 제한되었다고 할 수 있다.

2.2.3 1988년 NEHRP 기준

1988년에는 2가지 측면에서 PC 구조에 관한 내용이 개정되었으며, 그 내용은 다음과 같다.

1) 골조의 휨 부재에 있어서, 휨 보강 근으로서 포스트-텐션된 텐던의 사용이 가능하며 사용을 위해서는 다음 조건을 만족시켜야 한다.

- ① 보에서의 평균 프리스트레스가 350 psi(2.41 Mpa)를 초과하지 않는 경우
- ② 프리스트레싱 텐던에 작용하는 힘이 조인트 면에서의 정방향과 부방향 모멘트 강도 1/4을 초과하지 않는 경우
- ③ 텐던에 주어진 강도의 40 ~ 85%에 해당하는 하중에서 최소 50 싸이클

에 대해 텐던의 정착부가 저항할 수 있는 것으로 입증될 때

상기 ①에서, 평균 프리스트레스의 한계를 설정한 이유는 콘크리트의 조기 탈락이 기둥 면에 발생하지 않도록 하는 데 있었으며, ②에서와 같이 프리스트레싱 보강근의 기여도에 대한 한계를 설정한 이유는 포스트텐션이 적용된 골조의 R값이 일체식 골조와 같도록 하기 위한 것이다. 그리고, ③과 같은 한계치를 둔 이유는 실험 결과와 해석 결과로부터 프리스트레싱이 소성인 지역 에너지 소산에 최소한의 효과가 있음을 보장하고 주어진 지반 운동에서 프리스트레싱된 골조의 최대 처짐이 일체식 골조에 비하여 현저하게 크지 않게 하기 위한 것이었다.

2) ACI 318-83 부록 A 조건을 만족할 수 있는 PC 구조 시스템임을 증명할 수 있는 다음과 같은 자료를 규정하고, 이 조건이 만족되지 않을 경우에는 PC 구조를 지진 저항 시스템으로서 강진 지역에 적용될 수 없도록 하였다.

- ① 기능적이고 신뢰도가 높은 접합부와 부재에 대한 상세의 선정
- ② 접합부의 비탄성 하중-변형 관계에 대한 실험적 규명
- ③ 이들 접합부 상태와 작용하는 지반 운동을 적용한 건물의 응답 해석

2.2.4 1991년 NEHRP 기준

1989년 프리캐스트 지진 저항 시스템에 대한 기준을 개발하기 위해, NSF(National Science Foundation)와 PCI(Precast Concrete Institute)는 PRESSS(PREcast Seismic Structural Systems) 프로그램을 착수하였지만 그 결과는 1991년 기준에 반영되지 않았다. 다만, 1988년 UBC(Uniform Building Code)를 근거로 볼트와 스티드 앵커에 대한 기준을 포함함으로써 PC 구조의 실제 시공을 위한 자료가 어느 정도 구축되게 되었다.

2.2.5 1994년 및 1997년 NEHRP 기준
1993년까지 진행된 PRESSS의 연구 내용에 대한 평가를 통하여, 골조 구조와 벽식 구조에 대해 일체식 철근 콘크리트 구조에 대응하는 PC 시스템의 설계기준 개발이 적절하다는 판단이 내려졌고, 1994년 기준에서 그 내용이 반영되었다. 그러나, 이는 사실상 습식 접합(Wet joint)을 적용하는 경우에만 국한되었고, 건식 접합(Dry joint)을 이용하는 연성적인 연결재(Interconnected Element)로 구성된 시스템에 대해서는 적용할 수 없는 것으로 결정되었다. 그 이유는 당시, 연성적인 접합에 대해서는 적절한 자료가 불충분하였기 때문이었다. 다만, 사용자의 판단과 향후 연구를 위해서 시험 설계에서 적용할 수 있도록 그 기준은 부록에 수록되었다.

일체식에 대응하는 성능에 대해서는 Stanton의 연구 결과(1991)를 근거로 강한 접합, 연성 접합 또는 확장형 접합과 같은 두 가지의 방법이 제안되었다. 이는 ① 강한 접합을 이용한 PC 골조와 ② 연성 접합으로 연결된 PC 골조 및 벽식 시스템을 구축하기 위한 것이었다. 일체식에 준하는 강도와 강성을 보유한 PC 구조에 대해서는 RC 시스템에 적용하는 반응수정 계수 R과 처짐증대계수 C_d 를 그대로 적용할 수 있었던 것이다.

1994년 기준이 결정되는 동안 Northridge 지진이 발생하였고, 이에 의해 프리캐스트 콘크리트 중력 저항 골조로 설계된 몇 개의 주차장 건물이 부분 붕괴되었다. 이에 의해 슬래브 다이어프램에 관련된 일부 내용들이 기준에 반영되지 못하였다. 1997년 기준에서는 1994년 NEHRP 규준에서 제안한 내용인 대응 설계(Emulation Design)에 관련된 내용을 적용하기 위한 조건으로 강진 지역에 적용되는 PC 중력 저항 골조에 대해 다음과 같은 4가지의 제한을 두게 되었다.

- 1) 수평 다이어프램을 위한 슬래브에 대한 형상비(길이와 폭의 비)는 3 또는 2

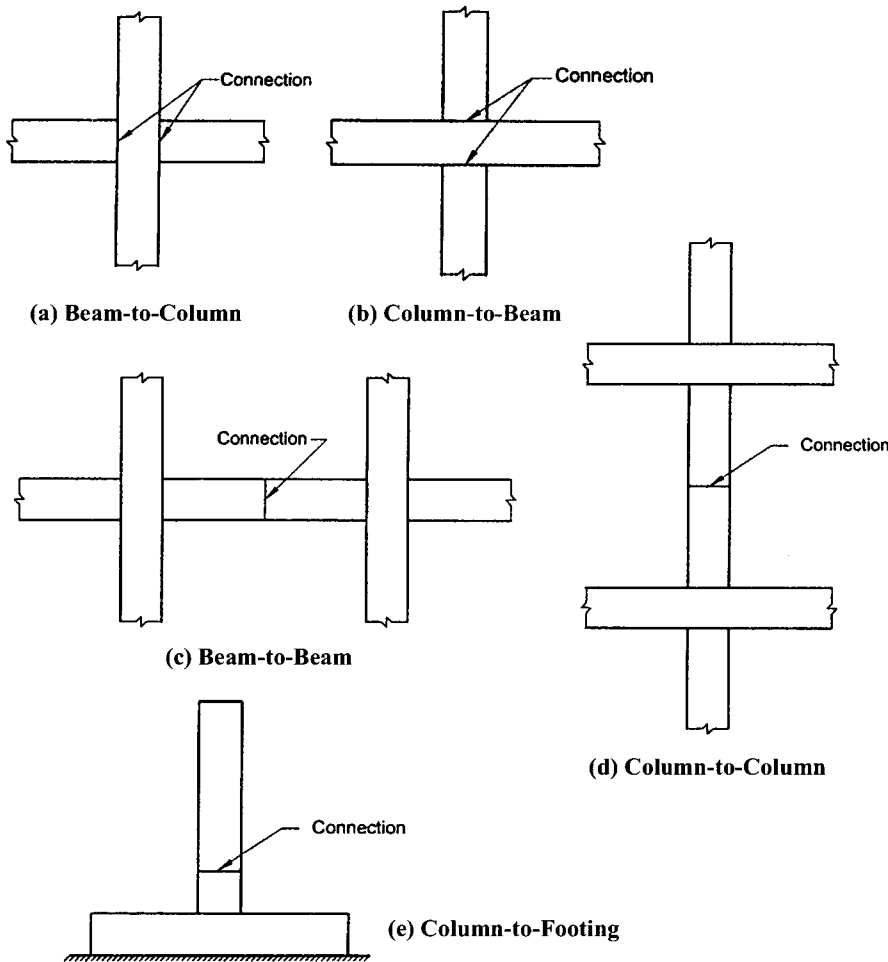


그림 1. 대표적인 PC 접합 형태

이하로 제한하였고, 이를 만족할 수 없는 경우, 프리캐스트 중력 저항 골조 모든 접합부는 “부분 구속”으로 설계한다.

2) 횡력을 전달하는 모멘트 골조의 각 골조 라인에 대해서, 최소한 몇 개(저항 골조 길이 방향 스패수/4 + 1)의 스패는 지진 저항 시스템이 되어야 한다.

3) 각 접합부는 모멘트 강도 M 을 발휘할 수 있어야 하며, 이 모멘트는 골조가 Δ_s (설계 지진 하중에 대한 탄성 변위)만큼 변형되었을 때의 접합부 모멘트이다. 접합부는 $0.7R\Delta_s$ 에 상응하는 변위까지 저항할 수 있어야 하고, 모멘트 값은 접합부 완전 고정과 전체 단면 강성의 1/2보다 크지 않은 보 휨 강성을 가정하여 결정한다.

4) 4면에서 횡지지되지 않은 연직 하중 지지 기둥에 대하여 구조물의 주축 면에 나란한 방향으로 지지되지 않은 접합부에

는 정모멘트를 받는 접합부로 설계하며 이때의 횡력은 기둥의 축 하중 강도 P_0 의 4%에 해당하는 수평 하중으로 한다.

PC 구조에 대한 1997년 기준과 1994년 기준의 기본적인 차이점은 PC 구조에 대한 실험과 해석적인 자료 확보와, 이상에서 언급한 바와 같이 일체식에 준하는 성능 설계를 적용하기 위한 조건이 설정된 점이다. 지진 하중에 대해서, 1994년 제안된 일체식에 준하는 PC 접합부 설계 개념은 그 틀은 기본적으로 유지한 채 부분적인 수정을 거쳐 2000년 기준까지 지속적으로 발전되었다.

일체식에 준하는 PC 접합부와 연성적인 접합부에 관한 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 일체식에 준하는 강한 접합부

일체식에 준하는 강한 접합부가 되기 위해서는 비선형 거동을 유도하기 위한 위치(소성힌지)가 선정되어야 한다. 그래서 강진시 골조에 대한 강한 기둥-약한 보의 변형 메커니즘을 구축할 수 있는 것이다. 이를 위한 조건은 다음과 같다.

- ① <그림 1(a)>와 같이 기둥이 연속되고 여기에 보가 연결되는 접합부에 대해서는 이 위치가 기둥 쪽으로 보 춤의 3/4보다 가까워서는 안 된다.
- ② <그림 1(b)>와 같이 보가 연속되고 여기에 기둥이 연결되는 접합부, 그리고 (d)와 같이 기둥-기둥 접합부에 대해서는 조인트를 벗어난 보 어디에 위치해도 상관없다.
- ③ <그림 1(c)>와 같이 보와 보가 만나는 접합부에 대해서는 골조의 휨 부재 내 어디에 위치해도 상관없지만 보 춤의 3/4배 이내로 기둥에 가까워지면 안 된다.
- ④ <그림 1(e)>와 같이 기둥-기초 접합부에서는 기둥 하부에서 완전한 비선형 변형 메커니즘을 통하여 에너지 소산이 이루어질 수 있는 경우, 접합부는 기초 방향으로 기둥 폭의 3/4배 이내까지 가까이 위치하면 안 된다.
- ⑤ 강한 접합부에는 습식 접합만이 허용되며, 이러한 접합을 힌지 부분에 적용하면 안 된다.

강한 접합부 설계시에는 다음 조건이 만족되어야 한다.

$$\phi S_n^{CON} \geq 1.1 S_n^{FRAME} \quad (1)$$

여기서, S_n = 단면의 공칭강도,

ϕ = 강도저감계수,

S_n^{FRAME} = 소성힌지부의 강도.

강한 접합부에 대해서 요구되는 강도는 소성힌지와의 거리, 소성힌지에서의 강도, 그리고 비선형 메커니즘과 관련되어 있다.

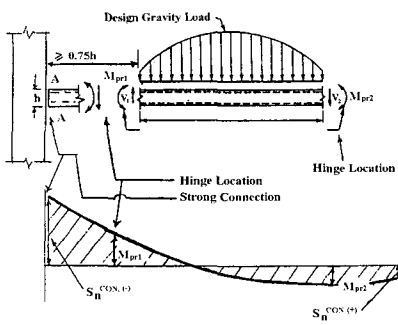


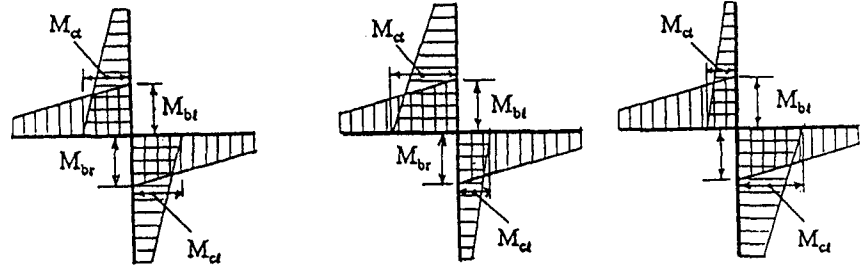
그림 2 강한 접합부에 대한 설계 하중

〈그림 2〉와 같은 연속 기둥에 보가 연결된 접합부와 같은 경우, A-A에서 강한 접합부는 항복하지 않거나, 미끄러지지 않으며, 이 때의 공칭 강도 S_n^{CON} 는, 휨과 전단 모두에 대해서, 예상 강도 M_{pr1} 과 M_{pr2} 에 의한 힘 보다 커야 한다. 이로부터 A-A에 대한 설계 전단력은 M_{pr1} 과 M_{pr2} 에 따라 계산되는 전단력으로부터 산정할 수 있다. ACI 318-89를 적용할 경우, 모멘트 M_{pr1} 과 M_{pr2} 는 $\phi = 1.0$ 과 적어도 $1.25 f_y$ 에 해당하는 보강근의 응력을 이용하여 결정할 수 있다.

임의 조인트에서의 모멘트는 이 조인트에 연결된 보의 휨 강도에 의해 제한될 수 있다. 강한 기둥-약한 보의 변형 메커니즘에 대한 동적 비탄성 해석과 연구로부터, 비록 기둥이 동일한 강성을 보유하고 있더라도, 보 단부 모멘트는 기둥 상부와 하부 사이로 균등하게 나누어지지 않는 것으로 보고되고 있다. 〈그림 3(a)〉에 나타난 바와 같이 탄성 해석은 모멘트를 예측하지만, 실제 거동은 〈그림 3(b)〉에 나타난 바와 같게 된다. 기둥-기둥 접합부에서 공칭 모멘트에 ϕ 를 곱한 값은 층고 내 기둥에 대한 최대 예상 모멘트 M_{br} 의 0.4배 이상 되어야 하며, 이러한 조건은 기둥 내의 접합부에 대해 적절한 성능을 보장하기 위한 것이다.

(2) 일체식에 준하는 연성 접합부

일체식 철근 콘크리트 구조와 동일하거나 그 이상의 성능을 보유하는 조인트 지역(Joint region)에서 연성적인 접합이



모든 경우에 있어서, $M_{br} + M_{br} = M_{ct} + M_{ct}$

(a) 탄성 해석 결과

(b) 동적 비탄성 해석 결과

그림 3. 보-기둥 접합부에서의 모멘트

이루어지는 접합부를 말한다. 접합부가 충분한 비선형 특성을 보유하고 있다는 것을 입증하기 위해서는 항상 실험 자료가 구축되어야 한다.

Warnes(1992)와 Yee(1991)는 이러한 특성을 보유한 접합부 상세를 정리하였다. 일체식에 준하는 연성 접합부가 되기 위해서는 횡력을 받을 경우, 일체식 RC 구조에 대응하는 성능을 보여야 한다. 그리고, 접합부에서 모든 변형에 대해 벌어짐(Rocking)과 미끄러짐(Sliding) 거동을 반드시 고려하여 설계하여야 한다. 골조 구조에서 상하의 길이 방향 주근과 벽체에 대한 주변 보강근은 접합부를 관통하여 연속되어야 하며 인장과 압축에서 적어도 $1.25 f_y$ 에 해당하는 응력을 발휘할 수 있어야 한다. 이를 위해서 스플라이스 슬리브(Warnes 1992, Yee 1991)와 같은 특수한 기계적 커넥터 또는 철근 용접과 같은 연결 방법을 사용할 수 있다.

연성 접합부의 설계는 접합부의 모멘트 M_{br} 과 전단 강도 S_{pr} 이 예상 강도와 같다는 것을 전제로 하여야 한다. 접합부 성능이 M_{br} 일 때의 전단력 S 는 다음과 같다.

$$S \leq \phi S_n^{CON} (0.47 \theta_s) \quad (2)$$

여기서, $0.47 \theta_s$ 는 비선형거동수정계수, θ_s 는 반전된 싸이클 하중에 대한 계수로서, 0.8과 1.0 사이의 값을 나타낸다. 0.8은 완전히 반전된 전단에 대한 값이며, 1.0은 최대값의 50% 미만으로 반전된 전단에 대한 값이다. 역으로 접합부의 성

능이 S_{pr} 일 때의 모멘트 M 은 다음을 만족시켜야 한다.

$$M \leq \phi M_n^{CON} \quad (3)$$

예상 모멘트, M_{pr} 은 강도저감계수 ϕ 와 $1.25 f_y$ 이상인 보강근의 응력을 근거로 결정한다. 전단 미끄러짐에 대한 예상 전단 강도 S_{pr} 은 전단 마찰 개념으로부터 구한다. 축력의 효과는 예상 모멘트 및 전단 강도, 그리고 공칭 모멘트와 전단 강도를 계산할 때 반드시 고려하여 하며, 접합부에 대한 전단 강도는 그 접합부에 연결된 부재에서의 값보다 작도록 하여야 한다.

〈그림 4〉와 같은 PC 판넬로 구성된 벽체의 경우, 접합부 A-A에 작용하는 전단력을 다음 3가지 중 작은 값으로 제한한다.

- ① A-A 위 PC 부재의 전단 성능
- ② A-A를 따른 미끄러짐에 대한 전단력
- ③ 예상 접합부 모멘트 M_{br} 과 관련된 전단 성능

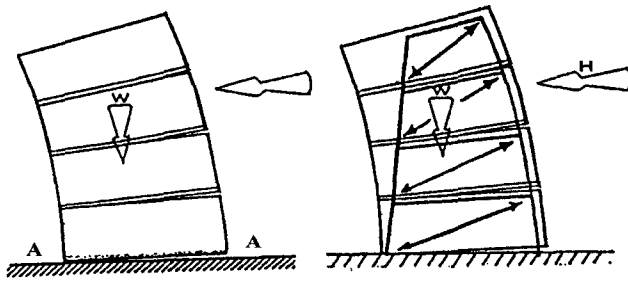
강한 접합부에 대해서 요구되는 강도는 소성힌지와 거의, 소성힌지에서의 강도, 그리고 비선형 메커니즘과 관련되어 있다.

A-A면을 관통하여 연결되는 수직보강근에서 $1.25 f_y$ 에 해당하는 응력을 발생시킬 때의 모멘트는 횡력 H 에 대응된다. H 에 의한 모멘트가 $1.25 f_y$ 에 해당하는 응력을 유발시킬 경우, 접합부 미끄러짐을 유발하는 전단력은 철근 응력이 $1.25 f_y$ 보다 작았을 때 보다 낮은 값을 보이게 된

다. 미끄러짐을 유발하는 전단력은 균열 폭이 증가함에 따라 감소하게 되므로, 철근의 응력을 f_y 또는 그 이하로 제한할 경우, 전단 강도는 전단 마찰에 의한 값으로 할 수 있다. 이 경우, 전단마찰계수는 Mattock(1977)에 의해 정리된 반복 하중 효과에 따라 수정되어야 한다. 모멘트

에 의해 철근 응력이 $1.25 f_y$ 에 도달할 때, 예상 전단 강도는 Muller(1986)에 의한 실험 결과, PC 전단벽에 대한 Taisei Prefab Corporation(1992)의 실험 결과, 일체식 전단벽에 대한 Wood(1990)의 실험 결과를 근거로 한 값을 적용할 수 있다. 전도 모멘트가 수평 접합부의 벌어

짐을 유발할 경우, 일체식 벽과 PC 벽에서의 전단 전달 메커니즘은 전혀 다르게 된다. PC 벽에 대해서, 수평 전단력은 압축된 콘크리트를 통해서만 효과적으로 전달되며, 벽체가 보강되어 있기 때문에 <그림 4(b)>와 같은 트러스 메커니즘을 구축할 수가 있는 것이다. 횡보강근은 판넬의 상부에 반드시 배근되어 사압축에 의한 수평방향 성분과 평형을 이룰 수 있어야 한다.



(a) 작용 하중 (b) 하중 저항 메커니즘

그림 4. 벽체의 하중 저항 메커니즘

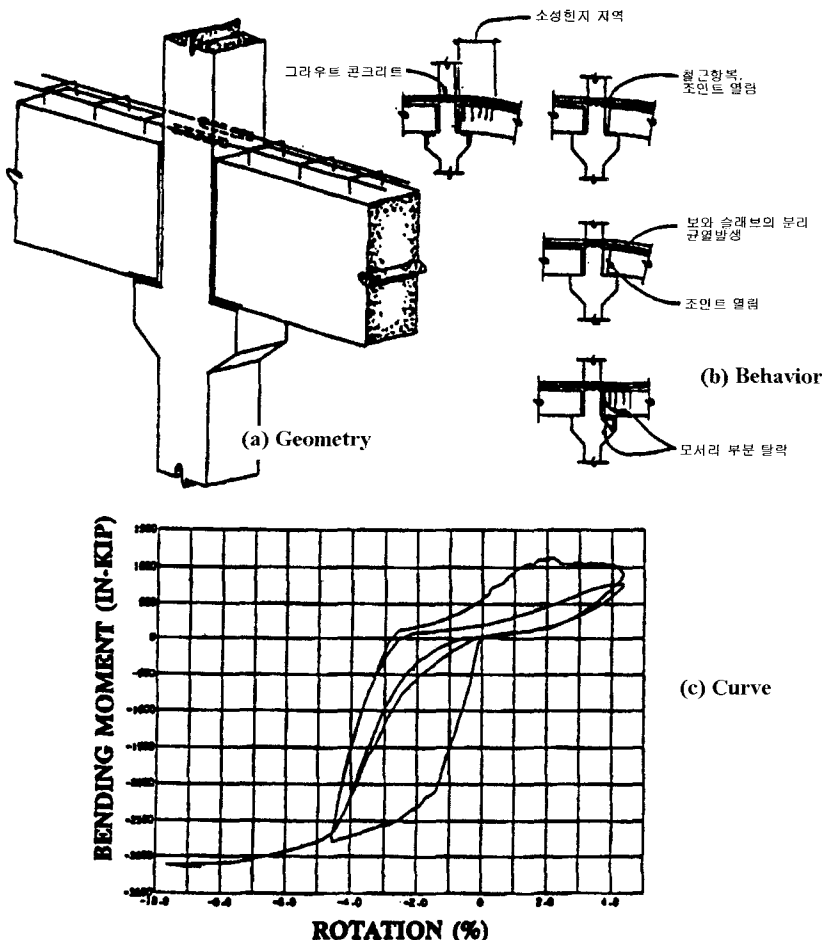


그림 5. 건식 접합부의 거동 특성

(3) 일체식에 준하지 않는 연성 접합부 Inter-connected element로 연결된 접합부로서, 중간 또는 약진 지역에서 적절한 강도, 강성, 그리고 에너지 소산 성능을 보유한 구조 시스템이며, 볼트, 용접 또는 이와 유사한 방법인 건식 접합으로 PC 부재를 시공하는 방법의 적용을 위한 부분이다. Stanton(1986)의 실험에 의하면, PC 시스템의 시공에 널리 사용되는 모멘트 저항 건식 접합은 연직 하중이 지배하는 경우에는, 일체식에 대응할 수 있는 소정의 강도를 보유하고 있으나, 반복 하중이 지배하는 경우에는 그렇지 않은 것으로 나타났다. 반복 하중에 대해서, 용접이나 볼트로 연결된 접합부는 연성이 부족해 지는 것으로 나타났다. 예를 들면, 코벨(Corbel)은 지지 부분의 상세가 충분하지 않을 경우, <그림 5>와 같이 보 단부가 코벨의 단부에서 회전하게 되고, 이에 의해 부모멘트 접합부에서 <그림 5(b)>와 같은 거동(Prying action)이 나타나, 삼입물이나 용접과 같이 접합부를 구성하는 보강근에 2차 응력을 유발하게 되는 것이다. Prying action은 보강근의 Kinking, 보강근 주변의 콘크리트 박리를 야기시킨다. 이에 의해 반복하중에 대해 허용되는 수준 아래로 강도가 저감되고 회전이 증대되는 것이다. 응답에서의 불명확성과 이러한 현상을 고려하여, 일체식 철근 콘크리트 구조 시스템에 비하여 낮은 건식 접합을 이용한 경우에는 응답저감계수와 처짐확대계수를 수정하여 사용할 수밖에 없는 것이다. 그러나 다음과 같이 불명확한 점들이 있기 때문에 R값과 C_d 값을 기준에서

는 제한하지 않고 있다.

- ① 구조 시스템이 요구되는 전체 변형을 확보할 수 있도록 하기 위하여, 접합부가 부담하게 되는 변형량 결정
- ② 각 접합부가 상기 변형량에 대하여 저항할 수 있는 성능
- ③ 에너지 소산을 위해 필요한 각 접합부와 관련된 접합부 부근의 성능

따라서, 일체식에 준하지 않는 PC 접합 시스템을 횡력 저항 시스템에 사용하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

- ① 적절한 실험 또는 건물에서의 접합부 거동을 유사하게 표현할 수 있는 해석 모델(실험 결과를 근거로 할 것)을 이용하여 접합부 지역에 대한 하중-변형 관계가 규명될 것.
- ② 해석으로부터 건물의 응답을 구할 때, 상기 접합부로 연결된 PC 부재에 대한 하중-변형 관계를 조합한 조인트 지역과 접합부의 하중-변형 관계를 이용할 것

상기와 같은 조건에 따라, 1994년 기준에서는 <표 1>에 나타난 바와 같이 지진 성능 그룹과 접합부 성능에 따라 R과 C_d 값을 변화시킬 수 있도록 규정하고 있으며, 설계시에는 반드시 다음과 같은 사항을 반영하도록 하고 있다.

- ① 탄성 변형의 C_d 배인 변형에서 완전한 하중 전달 경로가 명확해야 하며,
- ② 건물의 횡 하중에 대한 기본적인 변형 상태(상부로 갈수록 층 변위가 증대)를 반영할 수 있는 접합부와 조인트 지역에 대한 하중-변형 관계가 구축되어야 한다.
- ③ 탄성 변형의 C_d 배에 해당되는 변형에서 Prying action이나 벌어짐(Rocking motion) 거동이 발생할 가능성에 대하여 검사하여야 한다.

표 1. 일체식에 준하지 않는 연성 접합부에 대한 R과 C_d 의 보정

Response Modification Factor (R)	Deflection Amplification Factor (C_d)	Seismic Performance Category					Connection Performance Category
		A	B	C	D	E	
3/2	3/2	P	P	N	N	N	A
$3/2 \leq R \leq R_m/2$	$3/2 \leq C_d \leq C_{dm}/2$	P	P	P	N	N	B
$R_m/2 \leq R \leq R_m-1$	$C_{dm}/2 \leq C_d \leq C_{dm}-1$	P	P	P	P	P	C

R_m = 일체식 철근콘크리트 구조의 R값
P = 허용, N 허용되지 않음.
 C_{dm} = 일체식 철근콘크리트 구조의 C_d 값

<표 1>에서의 접합부 성능 레벨은 다음과 같이 분류된다.

- ① A그룹 : 특별한 보강 상세가 필요 없다.
- ② B그룹 : 건물의 강도 수준이 공칭 강도와 같을 때 접합부와 접합부 주변 또는 조인트 지역은 반복 하중에 대해 안정된 비탄성 변형 특성을 보유하여야 한다.
- ③ C그룹 : 선정된 R값과 상응하는 건물 성능을 확보할 수 있도록 접합부와 접합부 주변 또는 조인트 지역은 적절한 강성, 강도, 에너지 소산 성능을 확보하여야 한다.

이와 같은 접합부 성능 레벨은 커넥터의 특성, 접합을 위한 정착, 그리고 접합부 지역에 의해 결정된다. 접합부 성능 레벨 B와 C의 경우는, 커넥터가 인장 또는 전단력에 대해 용접 또는 그와 유사한 방법으로 PC 부재 또는 현장 타설 콘크리트 내의 주근과 연결되어야 한다. 레벨 C인 접합부의 경우는 응력 전달이 되는 부분이 부재 면적의 30% 이상이 되어야 한다(접합 면에서 단면의 최대 치수만큼 떨어진 곳). 이러한 조건들은 접합부에서의 비선형 변형이 집중되는 것을 저감시키기 위한 것이다.

3. 2000년 NEHRP 기준

전술한 바와 같이 1985년 이래로 NEHRP 기준에서 콘크리트 구조에 관한 내용은 ACI 기준을 기본 문헌으로 채택하

고 이 기준을 계속하여 수정해 왔다. 따라서, 1997년 NEHRP 기준을 수정 제안한 2000년 기준에 대해서도 ACI 318-99의 내용이 채택되었고 그리고 부분적으로 수정되었다. 2000년 기준에서 새로이 고려된 주요 내용은 콘크리트 내의 정착과 PC 구조의 지진 저항 시스템, 그리고 토핑없는 슬래브에 관한 내용이다. PC 구조의 지진 저항 시스템에 관련된 내용은 NIST, US-PRESSS, JAPAN-PRESSS, ACI ITG(Innovation Task Group)에 의해 실시된 연구를 근거로 제정되었다.

NEHRP 기준에서 지진 설계 범주(Seismic Design Category)의 분류는 건물의 점유 기간과 지진 위험도, 그리고 지반 조건에 의해 결정된다. 지진 설계 범주가 A, B로 판정되는 구조물은 상세 요구 제한상 지진 위험도가 낮은 경우에 해당되며, 지진 설계 범주가 C인 경우는 중지진, E, F, G인 경우는 높은 지진 위험도에 해당된다. 지진 설계 범주가 C인 경우에 대해서는 지진 저항 프리캐스트 콘크리트 시스템과 모멘트 골조 접합부에 대해서 특별한 요구 조항이 추가되었다. 지진 설계 범주가 C인 경우 PC 벽체는 일반적인 벽체(Ordinary Wall)로 설계될 수 있도록 허용되었으며, 구조벽과 골조 모두에 대해서 강한 접합부 또는 연성적인 접합부를 이용한 「일체식에 준하는 설계」와 「일체식에 준하지 않는 설계」에 대한 기준이 만들어졌다.

또한, 토핑이 없는 PC 슬래브의 다이어프램에 관한 기준도 새로이 포함되었다. 그러나, 이러한 다이어프램의 지진 거동에 대해서, 설계를 위해 내부 힘의 분배와 접

합부에 내재하는 연성 수준 등에 관해서 미비한 점이 있어, 토핑이 없는 PC 슬래브의 다이어프램에 관한 내용은 기존의 부록에 수록되었다. 이는 과거지진에서 토핑이 없는 PC 슬래브의 다이어프램 성능을 실험과 해석적으로 연구하는 데 있어 기본 골격으로 이용하도록 하기 위함이다.

본고에서는 2000년 NEHRP 기준에서 새로이 반영된 부분 중, 지진 저항 시스템에 대해서만 언급하기로 한다.

3.1 지진 저항 시스템에 대한 기준의 구성

ACI 318-99에서 지진 위험도는 저진, 중진, 강진으로 분류되어 있고 마찬가지로 NEHRP 기준에서 지진 설계 범주는 크게 3가지로 분류되어 있다. 지진 설계 범주 A와 B는 ACI 318-99의 낮은 지진 지역과 같으며 기준의 1장에서 18장에 해당되는 부분과 관련이 있다. 지진 설계 범주가 C인 경우는 ACI 318-99의 중지진 지역, D, E, F는 ACI 318-99의 강진 지역에 대응된다. 지진 설계 범주가 D, E, F에 해당하는 PC 구조에 대해서는 특수 모멘트 골조(Special Moment Frames), 특수 구조벽(Special Structural Walls), 그리고 Type Z 접합부(기둥 면에 보가 접합되는 형식으로서, 반복 하중에 대하여 적어도 연결재가 철근 강도 f_y 의 40% 이상 되는 응력을 발휘할 수 있어야 하며, 원칙적으로는 습식 접합부를 말한다. 그리고, 접합부의 연성비가 8 이상이 되어야 한다)가 반드시 지진 저항 시스템으로 적용되어야 한다. 또는 특수 모멘트 골조 또는 특수 구조벽의 설계와 상세에 대해서는 일체식에 준하는 설계 프로세스 또는 일체식에 준하지 않는 설계 프로세스 중 하나를 적용할 수 있다.

지진 설계 범주가 C인 구조에 대하여 PC 모멘트 골조는 최소한 Type Y 접합부(기둥-기둥 접합부로서, 연성비 4 이상을 확보할 수 있는 접합부)의 형태로 연결되어야 한다. PC 벽체는 ACI 318-99의 1장에서부터 18장에 따라 보통 벽

(Ordinary Wall)으로 설계할 수 있다. 단, 이 경우 최소한 Type Y 접합부로 설계하여야 한다.

3.2 특수 모멘트 골조

PC 특수 모멘트 골조(Special moment frames)에 대해, 소성힌지의 위치는 설계 개념과 상관없이 강한 기둥-약한 보의 변형 메커니즘이 형성될 수 있도록 선정되어야 한다.

3.2.1 일체식에 준하는 설계

PC 특수 모멘트 골조의 설계시, 현장 타설한 일체식에 준하는 성능을 요구하는 내용은 1994년 기준에서 처음 소개되었다. 두 가지의 설계법이 제안되었고 이것이 부분적으로 수정되어 2000년 기준에 반영된 것이다.

(1) 강한 접합부

강한 접합부가 사용되는 경우 소성힌지부는 부재 춤의 1/2보다 접합부쪽으로 가까운 면에 위치하면 안 된다. 보 스패의 중앙부 반에서 바깥쪽에 위치한 강한 접합부는 반복 하중 실험 결과에 의해 인정되는 건식 접합부인 경우를 제외하고는 어떠한 경우에도 습식 접합이 되어야 한다.

(2) 연성 접합부

일체식에 준하도록 연성 접합부로 연결할 경우, 힌지 부분에서 나타나는 골재 및 물림 작용은 일반적인 PC 구조 시공시와는 다르게 나타난다. 따라서, 힌지 부분에 작용하는 모멘트가 최대 값인 M_{pr} 에 도달할 때 전단 미끄러짐을 피하기 위해서는 상존하는 전단력이 힌지 단면에서의 모든 접합부 공칭 전단 강도 S_n^{CON} 합 의 1/2을 초과하면 안 된다. 단면의 공칭 전단 강도 V_n 은 접합부에 바로 인접한 부재의 전단 강도보다 커야 한다.

각 접합부는 Type Z 접합부 요구 사항을 반드시 만족하여야 한다. 접합부는 습식 또는 건식 둘 중 하나가 될 수 있다. 습식 접합시, ACI 318-99의 21장에서 규

정된 연결 방법(기계 접합, 용접 또는 결침)을 이용할 수 있다. 연성 접합부에 널리 이용되는 습식 접합부는 스플라이스 슬리브 접합이며, 유사한 연성 능력을 보유한 접합에 대해서는 최근 개발 중에 있다.

3.2.2 일체식에 준하지 않는 연성 접합부

지난 10여 년 동안 NIST, US-PRESSS, 그리고 Japan-PRESS 연구 결과에 의해 프리캐스트/프리스트레스트 콘크리트 골조 구조의 지진 거동에 관하여 많은 발전이 있어 왔다. 이와 같은 발전을 통하여 콘크리트 특수 모멘트 골조의 실험에 관한 허용 기준이 ACI에서 제정되게 되었다. 연성적인 재료로 연결된 접합부에 대해서는 1994년부터 NEHRP 기준에 언급되었으나, 이전의 내용은 일체식 콘크리트 부재와 비교하여 PC 부재를 사용할 경우, 불리한 것으로 고려되어 있었다. 2000년 기준에서는 실험에 관한 허용 기준을 반영함으로써, 이러한 불리한 측면이 줄어들게 되었으며, 실험 연구로부터 PC 시공을 할 경우, 장점이 있는 것으로 인식되어지게 되었다.

이 실험에 관한 허용 기준은 ACI/ITG T1.1-99(1999)에서 제안한 보고서를 근거로 한 것으로서, 이에 관한 내용은 본 학회지 2001년 1월호에 자세히 소개되어 있다.

3.2 특수 구조 벽체

골조 구조의 실험에 관한 허용 기준에 개발과 더불어 특수 구조 벽체(Special structural walls)에 관한 내용도 연구가 수행되었으며, 이 기준의 적합성은 PRESSS의 5층 건물 벽체 방향 실험 결과로부터 입증되었다. 그 결과를 반영하여, 2000년 NEHRP 기준에서는 골조와 유사하게 특수 구조 벽체에 대해서 실험과 해석적인 평가를 규정하고 있는 것이다.

특수 구조 벽체에 관한 실험 모듈의 설계, 모듈의 축척, 실험 방법과 보고서 작

성 등에 대한 내용은 ACI/ITG T1.1-99에서 제안한 골조 구조에 대한 방법과 유사하다. 다만, 실험체의 최소 모듈은 적어도 2개 층 높이에 대한 벽체들로 구성되도록 되어 있다.

Seo, Lee, and Hawkins(1998)에 의한 결과로부터, 강진 지역에 적용되는 일체식 철근 콘크리트 벽체와 같은 거동을 보이기 위해서는 설계 강도를 상회하는 보류 강도를 확보해야 할 뿐만 아니라, 다음과 같은 변형 성능을 보유해야 하는 것으로 나타났다.

$$1.0 \leq \frac{\Delta}{h_w} (\%) = 0.67 \left(\frac{h_w}{l_w} \right) + 0.5 \leq 3.0 \quad (4)$$

여기서, Δ = 층변위,
 h_w = 벽체 높이,
 l_w = 벽체 길이.

부재의 반복 하중 실험으로부터 최대 변형은 최대 강도의 20%까지 저하된 부분으로 하고, 이때 상대 에너지 소산 성능은 15%를 상회하는 것으로 나타났다. 이 결과는 PRESSS 실험 결과와 비교하여 그 적합성이 평가되어, 2000년 NEHRP 기준으로 반영되었다. 물론 실험 결과 나타난 층변위 각이 "0"일 때의 강성은 골조 구조에 대해서 규정한 값을 그대로 적용하도록 하였다.

3.3 접합부

지진 저항 시스템에 대한 건식 접합은 Type Y와 Type Z로 분류된다. 비선형 거동이 발생하는 지역에서, 접합부의 작용 방향과 직각 방향 모두에 대한 변위는 반드시 통제될 수 있어야 한다.

접합부에서 예상되는 휨, 전단 또는 압축력 또는 이들의 조합에 대하여 Type Y 접합부는 ϕ 값을 이용하여 결정된 예상 강도 S_{pr} , 즉 접합부 항복 강도의 125%보다 큰 값을 나타낼 수 있어야 하며, 이는 본질적으로 접합부의 변형이 구속되어야

함을 의미하는 것이다.

반복 하중 하에서 S_{pr} 일 때의 접합부는 항복시의 변위에 대해 적어도 4.0배의 값에 해당하는 변위를 나타낼 수 있어야 한다. 조인트의 양면에 대해 PC 부재내의 접합부 정착은 인장시 S_{pr} 의 1.3배에 저항할 수 있어야 한다. 그리고 PC 또는 현장 타설 부재의 주근에 스프라이스로 직접 연결되어야 한다.

Type Z 접합부의, S_{pr} 은 접합부 항복 강도의 140%보다 커야 한다. 그리고 반복 하중 하에서 접합부는 S_{pr} 에서 적어도 항복 변위의 8배에 해당하는 변위를 보일 수 있어야 한다. 접합부의 정착은 인장과 압축에 Type Y 접합부에 대한 요구치를 만족하여야 하며, ACI 318-99의 18.13.5에 나타난 소성 모델(스트럿-타이 모델)을 근거로 한 방법을 접합부 지역의 설계에 이용할 수 있다.

S_{pr} 에서 정착부의 국부 압축 응력이 $0.7f_c$ 를 초과하는 경우, 압축력의 0.05배 보다 큰 항복내력을 가지며, 3in(76mm)를 넘지 않는 폐쇄형 후프 또는 스파이럴의 형태로 구속된 보강근이 정착 부분 주위에 설치되어야 한다. 접합부 지역은 ACI 318-99의 2.1장에서의 정착부와 같은 개념으로 구분된다.

접합부의 실험과 결과의 평가는 ACI/ITG/T1.1-99의 원칙에 따라 실시되어야 한다.

4. 결 론

지금까지 NEHRP 기준의 최초 제정에서 현재까지의 내용상 변천 과정을 살펴보고, 최근 개정된 2000년 기준에 새로이 추가된 내용을 정리하였다.

전체적인 기준의 변천 과정을 살펴보면, 미국의 PC 구조를 발전시키기 위한 연구자들의 많은 노력을 볼 수가 있으며, 그리고, 연구자들은 실용적인 연구를 실시하고, 그 결과를 실험적으로 확인한 후, 기준에 적극 반영하였음을 알 수 있다. 1994년부터, PC 구조를 강진 지역에 사

용하기 위한 안이 제안되었고, 2000년에 이르러서야, 실험 방법과 그 실험 결과를 근거로 한 설계 방법까지 기준에 수록하게 된 것이다.

지진 저항 설계에 관하여 2000년 기준에서 다루는 주요 내용은 일체식에 준하지 않는 접합부의 설계에 관한 내용이 새로운 부분이다. 일체식에 준하는 접합부 설계 개념에서는 특수 모멘트 골조에 대해서 비탄성 거동이 접합부에 떨어진 곳에 발생하도록 유도하여, 접합부는 탄성 상태에 두는 강한 접합부 설계, 또는 지진 에너지를 소산하는 연성적인 접합부로 설계할 수 있다. 특수 구조 벽에 관련해서는 단지 연성적인 접합부만이 가능하다. 일체식에 준하지 않는 접합부 설계 개념에서는 특수 모멘트 골조뿐만 아니라 특수 구조 벽에 대해서 모두 규정되게 된 것이다.

우리나라는 지진학자들에 의해 중지진 지역으로 분류되고 있다. 이러한 중지진 지역에 적합한 PC 구조 시스템을 지속적으로 발전시키기 위해서는 NEHRP 2000 기준에서와 같이 중지진 지역에 적합한 시스템에 대해서 가이드 라인을 제공하고, 그리고 그 성능을 검증할 수 있는 허용 실험 기준이 필요할 것으로 생각된다. 특히, 최근에는 철근 콘크리트 구조가 아닌 새로운 시스템, 즉 합성 구조나 Hybrid 시스템 등이 계속해서 개발되고 있는데, 이들에 대한 성능을 제대로 평가하기 위해서는 국내 실정에 적합한 실험 기준의 필요성이 더욱 절실한 느낌이다. □

참고문헌

1. 한국건설기술연구원 & 삼성물산주식회사, "국내 PC 공법의 소개", PC 공법 활성화를 위한 한·일 공동 세미나, 1999.
2. 이광수, 이한승, "프리캐스트 콘크리트의 변천과 장래전망(건축)", 콘크리트학회지, Vol.13, No.1, 2000, pp.42-47, pp.37-41.
3. FEMA, "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures -

- Provision and Commentary", Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., Feb. 1988, 1991, 1994, 1997, 2000.
4. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (318-99) and Commentary(318R-99)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., June 1999.
 5. Neil M. Hawkins, "U.S. Progress on Seismic Design Regulations for Precast/Prestressed Concrete Buildings", FIP'93 Symposium, Kyoto, Japan, Oct. 1993.
 6. Neil M. Hawkins, S. K. Ghosh, "Proposed Revisions to 1997 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for Precast Concrete Structures Part 1 - Introduction-", *PCI Journal*, May-June 1999, pp.74-77.
 7. Neil M. Hawkins, S. K. Ghosh, "Proposed Revisions to 1997 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for Precast Concrete Structures Part 2 - Seismic Force-Resisting-Systems -", *PCI Journal*, Sep.- Oct. 2000, pp.34-44.
 8. Priestley, M.J.N., "Overview of PRESSS Research Program", *PCI Journal*, Vol.36, No.4, Jul.-Aug. 1991, pp.50-57.
 9. Stanton, J. F., Hicks, T. R., and Hawkins, N. M., "PRESSS Project 1.3 : Connection Classification and Evaluation", *PCI Journal*, Vol.36, Nov. 1991, pp.36-44.
 10. Warnes, C. E., "Precast Concrete Connection Details for All Seismic Zones", *Concrete International*, Vol.14, No.11, Nov. 1992, pp.36-44.
 11. Yee, A. A., "Design Considerations for Precast Prestressed Concrete Building Structures in Seismic Areas", *PCI Journal*, Vol.36, No.3 May-June 1991, pp.40-55.
 12. Mattock, A. H., "Shear Transfer Under Cyclically Reversing Loading Across an Interface Between Concrete Cast at Different Times", Report SM 77-1, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, WA, June 1977.
 13. Muller, P., "Hysteretic Behavior of Precast Panel Walls", Proceedings of Seminar on Precast Concrete Construction in Seismic Zones, JSPS/NSF, Tokyo, Vol.1, 1986, pp.127-142.
 14. Taisei Prefab Corporation, "Experiments of the Slip Displacement of Horizontal Joint of Wall Columns for High Rise Precast Concrete Frame-Wall Structural Systems", Taisei Technology Research Center, March 1992.
 15. Wood, S. L., "Shear Strength of Low-Rise Reinforced Concrete Walls", *ACI Structural Journal*, Vol.87, No.1, Jan.-Feb. 1990, pp.99-107.
 16. Stanton, J. F., "Moment Resisting Simple Connections", Research Report 1/4, Prestressed Concrete Institute, 1986.
 17. ACI Innovation Task Group and Collaborators, "Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., 1999.
 18. 서수연, 이리형, "철근콘크리트 골조의 구조실험에 관한 허용기준", 콘크리트학회지, Vol.13, No.1, 2000, pp.42-47.
 19. Seo, Soo-Yeon, Lee, Li-Hyung, Neil M. Hawkins, "The Limiting Drift and Energy Dissipation Ratio for Shear Walls Based on Structural Testing", *Journal of the Korean Concrete Institute*, Vol.10, No.6, Dec. 1998, pp.273-311.
 20. Priestley, M.J.N., Sritharan, S., Conley, J. R., and Pampanin, S., "Preliminary Results and Conclusions form the PRESSS Five-Story Precast Concrete Test Building", *PCI Journal*, Vol.44, No.6, Nov.-Dec. 1999, pp.42-67.