

구조벽의 단부 횡보강 설계

강수민^{1)*} · 박홍근¹⁾

¹⁾ 서울대학교 건축학과

(2003년 7월 7일 원고접수, 2003년 10월 20일 심사완료)

Design of Boundary Confinement of Structural Walls

Su-Min Kang^{1)*} and Hong-Gun Park¹⁾

¹⁾ Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

(Received July 7, 2003, Accepted October 20, 2003)

ABSTRACT

For a performance-based design of structural walls, it is necessary to develop a rational design method for determining the length and detail of boundary confinement so as to satisfy the given ductility demand. In the present study, the curvature capacity of a structural wall with boundary confinement was estimated considering the effects of various design parameters. The curvature demand of the plastic hinge corresponding to the given design displacement was also determined. By equalizing the curvature capacity to the demand, a design method for determining the length of boundary confinement, was developed. According to the design method, the length of boundary confinement increases as axial compressive load and design displacement increase, and as concrete strength, wall thickness, amount of lateral reinforcement and aspect ratio decrease. A study was performed on details for effective lateral confinement of walls with rectangular cross-section. Based on the findings, design guidelines on spacings of ties and cross-ties were proposed.

Keywords : confinement, ductility, reinforced concrete, seismic design, structural wall, boundary element

1. 서 론

현 설계기준에 따라 벽식구조에 대하여 내진설계를 수행할 때, 구조설계자들이 공통적으로 의문을 갖는 부분은 벽식구조에 대한 반응수정계수 R 의 적정성과 벽체단부에 대한 횡보강설치의 필요성 여부이다. 이전의 건축물하중기준¹⁾에서는 단부횡보강이 있는 경우 $R = 3.5$, 단부횡보강이 없는 경우에는 $R = 3$ 을 사용하였다. 현재의 건축물하중기준(2000)²⁾에서는 단부횡보강의 필요성을 규정하지 않고 있으며, 일률적으로 $R = 3$ 을 사용하고 있다. 또한 콘크리트 구조설계기준³⁾에서도 단부횡보강에 대한 기준을 규정하고 있지 않다.

Fig. 1은 지진에 대한 비탄성응답을 추정하는 대표적인 설계개념으로서 등가변위개념(principle of equal displacement)을 보여주고 있다. 이 개념에 의하면, 구조물의 비탄성거동능력을 감안하여 탄성거동시 요구되는 강도 Q_E 보다 $1/R$ 의 비율로 감소된 강도요구량 Q_Y 에 대하여 설계할

수 있다. 다만, 이를 위하여 비탄성변형 $\Delta_u (=R \times \Delta_y)$ 까지 연성거동을 유지할 수 있도록 연성설계가 이루어져야 한다. 즉, 이 변형요구량 Δ_u 에 의하여 소성힌지가 발생하는 벽체단부의 곡률요구량을 산정하여, 이 곡률요구량을 충족하도록 벽체단면의 횡보강여부가 결정되어야 한다. 따라서 구조벽의 내진설계에서 반응수정계수 R 의 적정성 여부는 벽체의 변형능력과 관계가 있으며, 따라서 단면의 횡보강여부와 직접적으로 관계가 있다.

또한 단면의 횡보강여부는 곡률요구량 뿐만 아니라 단면의 형상, 콘크리트 강도, 축력의 크기 등 다양한 설계변수에 의하여 영향을 받으므로 모든 벽체에 대하여 일정한 반응수정계수를 적용하는 설계방법보다는 설계자의 의도나 구조물의 특성에 따라서 다양한 반응수정계수를 적용하고 이에 필요한 변형요구량을 만족하도록 성능에 기초하여 설계하는 것이 바람직하며 이러한 구조벽의 성능기초설계를 위해서는 변형요구량, 단면의 형상, 콘크리트 강도, 축력 등의 다양한 설계변수의 영향을 반영할 수 있는 횡보강설계방법의 개발이 필요하다.

* Corresponding author
Tel : 02-880-7053 Fax : 02-871-5518
E-mail : ksm@snu.ac.kr

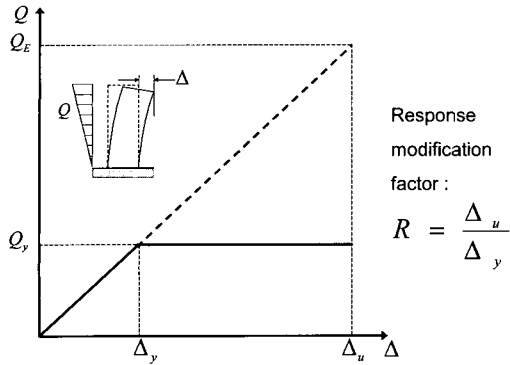


Fig. 1 Principle of equal displacement

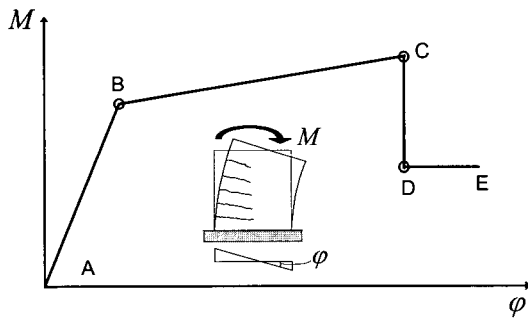


Fig. 2 Simplified moment-curvature curve for structural wall with boundary confinement (FEMA 273)

벽체의 횡보강에 관한 기준을 살펴보면, ACI 318-95⁴⁾ 이전의 내진기준에서는 모든 중력하중을 지지할 수 있는 횡보강된 단부요소를 구조벽에 배치하도록 규정하였는데 이 경우에는 압축대 전체가 횡보강되는 효과를 가져오므로 과설계를 가져올 수 있다⁵⁾. 이러한 문제점을 개선하여 ACI 318-99⁶⁾ 이후에는 압축단부의 일부만을 횡보강하도록 허용하고 있는데, 이 기준에 따르면 횡보강효과를 무시하고 계산된 압축대 길이의 절반이상을 횡보강하도록 규정하고 있다. 또한 Prestley⁷⁾, Wallace⁸⁾ 등은 변형률이 0.004 이상의 압축대를 횡보강하도록 제안하고 있다. 그러나 이러한 제안들은 대부분 경험적 방법들이며 횡보강영역 길이산정에 대한 구체적인 이론이나 이러한 횡보강영역의 확보가 벽체 연성도 증가에 미치는 영향에 대한 선행연구는 거의 없는 실정이다.

한편 선행연구⁹⁾에서는 단면의 형상, 콘크리트 강도, 축력의 크기 등을 변수로 한 비선형해석연구를 통하여 단부 횡보강된 구조벽의 거동과 파괴 메카니즘을 분석하였다. 이를 기초로 하여 FEMA 273¹⁰⁾에서 정의하는 바와 같은 Fig. 2의 모멘트-곡률 곡선을 정의하는 방법을 개발하였으며 이 방법에 의하여 최대곡률변형능력을 비교적 정확히 구할 수 있다. 본 연구에서는 이 선행 연구결과를 이

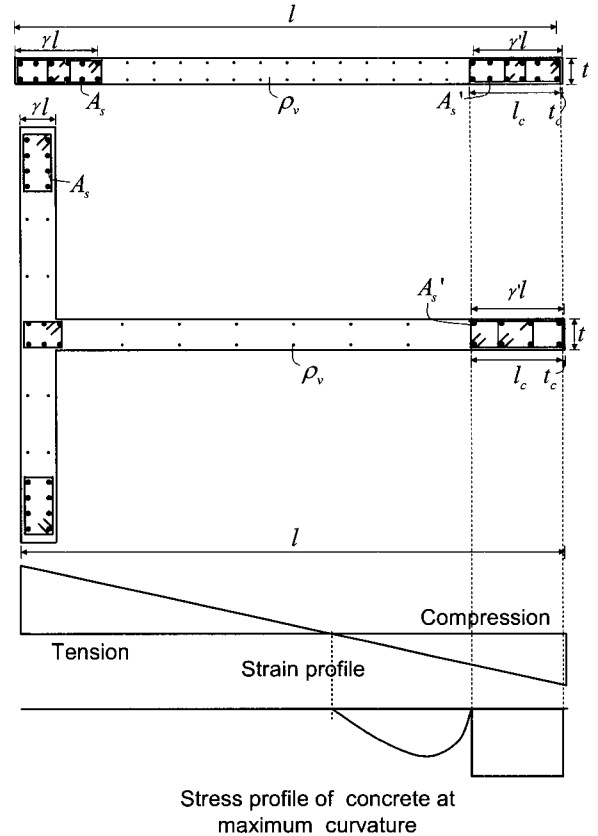


Fig. 3 Cross-sections of wall with boundary confinement

용하여 변형요구량을 만족하고 여러 설계변수를 고려할 수 있는 구조벽의 횡보강길이의 산정을 위한 설계식을 개발하고자 한다. 또한 국내에서 사용하는 벽체의 특성을 고려한 효과적인 횡보강 상세를 제안하고자 한다.

2. 횡보강된 벽체의 최대변형능력

FEMA 273¹⁰⁾에서는 실험에 대한 경험적인 연구결과로서 Fig. 2와 같은 모멘트-곡률관계를 제안하였다. 반면, 선행연구⁹⁾에서는 비선형해석을 통하여 단부가 적절히 횡보강되어 비횡보강영역에서 파괴가 일어나는 구조벽의 거동과 파괴메카니즘을 연구하였으며, 그 결과에 근거하여 보다 합리적인 모멘트-곡률곡선을 정의하였다.

선행연구에 따르면 최대변형곡률에 해당하는 Fig. 2의 점 C는 비횡보강 콘크리트의 압축파괴로 인하여 압축대의 압축내력이 감소되는 시점이며, C점 이후 벽체는 비횡보강된 콘크리트의 압축파괴와 그로 인한 강도저하로 압축력에 대한 평형조건을 만족할 수 없으며 이에 따라 변형능력을 유지할 수 없다는 사실을 밝혀내었다. 따라서 단부횡보강된 벽체의 변형능력은 C점에서의 곡률 ϕ_c 라 할 수 있으며, 선행연구⁹⁾에 따르면 구조벽의 특성에 따라서

ϕ_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_c = \frac{t \varepsilon_u (\alpha \beta f_{ck} + 2 \rho_v f_y)}{\{P + (A_s - A_s') f_y - f_{cc} A_{cc} + [(1 - \gamma + \gamma') l - 2(l_c + t_c)] \rho_v t f_y\}} \quad (1)$$

여기서 t = 벽체두께, ε_u = 콘크리트 극한변형률, $\alpha \beta$ ¹¹⁾ = 콘크리트응력계수, f_{ck} = 비횡보강 콘크리트강도, ρ_v = 수직철근비, f_y = 철근의 항복강도, P = 벽체에 가해지는 압축력, A_s = 인장축 수직철근량, A_s' = 압축축 수직철근량, f_{cc} = 횡보강 콘크리트의 응력, A_{cc} = 횡보강된 콘크리트의 면적, l = 벽체의 폭, t_c = 피복두께, l_c = 횡보강영역의 길이, γl = 인장축 단부철근이 배근된 길이, $\gamma' l$ = 압축축 단부철근이 배근된 길이(Fig. 3 참조).

단부철근 없이 수직철근이 균등배근된 경우, $A_s = A_s' = 0$, $\gamma = \gamma' = 0$ 이며, 따라서 식 (1)을 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\phi_c = \frac{t \varepsilon_u (\alpha \beta f_{ck} + 2 \rho_v f_y)}{P - f_{cc} A_{cc} + \rho_v t f_y [l - 2(l_c + t_c)]} \quad (2)$$

수직철근이 단부집중배근이고 벽체 중앙부의 수직철근량이 크지 않아 이를 무시할 수 있는 경우는 $\rho_v = 0$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\phi_c = \frac{\alpha \beta f_{ck} t \varepsilon_u}{P + (A_s - A_s') f_y - f_{cc} A_{cc}} \quad (3)$$

위의 식 (1)~(3)은 선행연구⁹⁾에 제시된 바와 같이 T형 벽체(Fig. 3)에도 적용할 수 있으며 구조벽의 형태에 따라 쉽게 수정이 가능하다.

3. 곡률 요구량의 산정

힘의 지배를 받는 세장한 벽체의 소성힌지공간에서 요구되는 곡률값은 벽체설계시 하중산정을 위해 가정된 설계변위, Δ 로부터 구할 수 있으며 구하는 과정은 다음과 같다.⁷⁾

설계시에 요구되는 변위량 Δ 는 벽체의 항복까지의 변위 Δ_y 와 항복이후 극한상태까지의 변위 Δ_p 의 합으로 이루어진다.

$$\Delta = \Delta_y + \Delta_p \quad (4)$$

벽체에 가해지는 하중이 Fig. 4에서와 같이 1차모드의 형태를 나타낸다면 Δ_y 는 다음 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta_y = \frac{11}{40} \phi_y h^2 \quad (5)$$

여기서, h = 벽체길이, ϕ_y = 항복곡률. 또한 항복이후의 소성변형 Δ_p 는 구조벽이 소성한지 영역에서의 회전 θ_p 에 의하여 발생하므로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta_p = \theta_p (h - 0.5 l_p) \quad (6)$$

l_p = 소성영역의 길이. θ_p 는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 식 (7)로 정의된다.

$$\theta_p = \phi_p l_p = (\phi_{\max} - \phi_y) l_p \quad (7)$$

ϕ_{\max} = 벽체가 발휘할 수 있는 최대곡률. 식 (6), (7)로부터 Δ_p 는 식 (8)과 같다.

$$\Delta_p = (\phi_{\max} - \phi_y) l_p (h - 0.5 l_p) \quad (8)$$

식 (5)와 (8)에서 구한 Δ_y 와 Δ_p 를 식 (4)에 대입하여 ϕ_{\max} 에 대하여 정리하면 식 (9)와 같다.

$$\phi_{\max} = \frac{40\Delta - 11 \phi_y h^2}{40 l_p (h - 0.5 l_p)} + \phi_y \quad (9)$$

식 (9)를 이용하면 설계변위 Δ 가 주어졌을 때 벽체하부 소성한지영역에서 요구되는 곡률을 구할 수 있다.

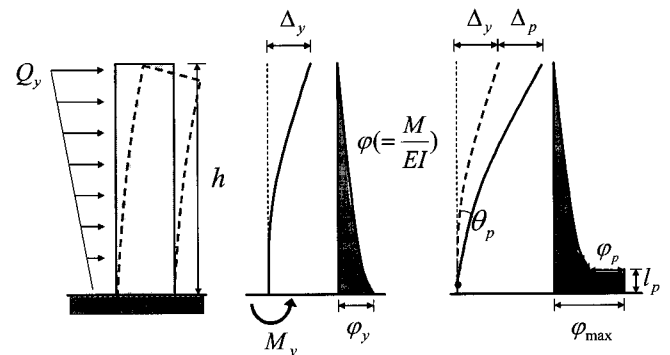


Fig. 4 Ductility demand

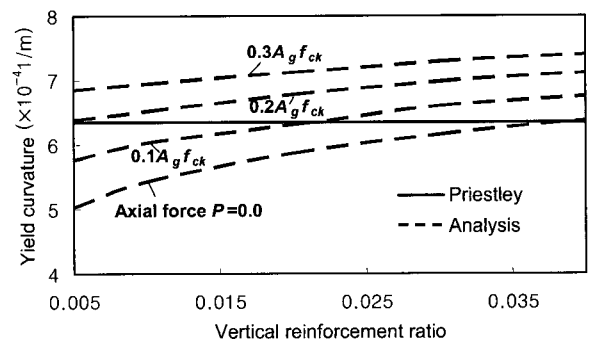


Fig. 5 Variations of yield curvature with ratio of vertical reinforcement

4. 횡보강길이의 산정

식 (9)는 곡률 요구량을 나타내고 식 (1)~(3)은 횡보강 상세에 따른 벽체단면의 곡률성능을 나타내므로 단면의 곡률요구량과 곡률성능을 등가로 하여 횡보강영역에서의 콘크리트 강도요구량 $f_{cc}A_{cc}$ 를 구할 수 있으며 그 값은 식 (10)~(12)와 같다.

$$f_{cc}A_{cc} = P + (A_s - A_s')f_y + [(1 - \gamma + \gamma')l - 2l_c - 2t_c]\rho_v f_y - \frac{(\alpha \beta f_{ck} + 2\rho_v f_y)t \epsilon_u l_p (h - 0.5l_p)}{\Delta - (11/40)\phi_y h^2 + \phi_y l_p (h - 0.5l_p)} \quad (10)$$

$$f_{cc}A_{cc} = P + \rho_v f_y (l - 2l_c - 2t_c) - \frac{(\alpha \beta f_{ck} + 2\rho_v f_y)t \epsilon_u l_p (h - 0.5l_p)}{\Delta - (11/40)\phi_y h^2 + \phi_y l_p (h - 0.5l_p)} \quad (11)$$

$$f_{cc}A_{cc} = P + (A_s - A_s')f_y - \frac{\alpha \beta f_{ck} t \epsilon_u l_p (h - 0.5l_p)}{\Delta - (11/40)\phi_y h^2 + \phi_y l_p (h - 0.5l_p)} \quad (12)$$

식 (10)은 일반적으로 배근된 벽체, 식 (11)은 단부철근 없이 수직철근이 균등배근된 벽체 그리고 식 (12)는 단부 집중철근만 있는 벽체에 관한 식이다. 식 (10)~(12)에서 분수항의 분모에 해당하는 $\Delta - (11/40)\phi_y h^2 + \phi_y l_p (h - 0.5l_p) > 0$ 이어야 한다. 그렇지 않으면 항복변위가 변형도 요구량보다 크므로 단부횡보강이 불필요하다는 것을 의미한다.

식 (10)~(12)를 이용하면 벽체의 내진설계에 있어서 요구설계변위 Δ 를 만족하기 위한 소성힌지 영역에서 벽체 단부 횡보강영역에서의 강도요구량을 구할 수 있으며, 이를 만족하도록 횡보강영역의 길이와 보강상세를 결정하여야 한다. 식 (10)~(12)가 음의 값을 갖는 경우는 횡보강이 필요치 않으며 양인 경우는 횡보강이 필요하다.

횡보강상세를 결정하기 위해서는 식 (10)~(12)를 적용해야 하는데, 실제 사용에 있어서 변수가 다양하여 계산이 복잡하다. 따라서 실용적인 설계식을 유도하기 위하여 식 (10)~(12)를 단순화하였다. 단부횡보강이 요구되는 고층 건물의 경우 $h \gg l_p$ 이므로 $(h - 0.5l_p)$ 대신 h 를 사용할 수 있다.¹²⁾ Priestley¹³⁾는 벽체의 항복곡률 ϕ_y 를 대략 $2\epsilon_y/l$ 로 정의하였다. Fig. 5는 폭이 6m이고 두께가 0.2m이고 균등배근인 벽체에 대하여 수직철근비와 축력 등을 변수로 하여 선행 연구에서 제안된 방법⁹⁾으로 구한 항복곡률과 Priestley가 제안한 항복곡률을 비교한 결과이다. 실제 항복곡률은 축력과 철근비가 클수록 커지는 경향을 보이나 오차가 크지 않으므로 본 연구에서는 설계식으로서 Priestley가 제안한 벽체의 항복곡률 계산식을 적용하였

다.⁹⁾ 또한 $l_p = 0.5l^{\overline{7})}$, $\epsilon_y = 0.002$, $\alpha \beta = 0.5^{11)}$ 와 같이 대략적으로 정의할 수 있다. 이와 같은 단순화를 통하여 식 (10)~(12)를 각각 다음과 같이 간략화할 수 있다.

$$f_{cc}A_{cc} = P + (A_s - A_s')f_y + [(1 - \gamma + \gamma')l - 2l_c - 2t_c] \times \rho_v f_y - \frac{(f_{ck} + 4\rho_v f_y)t \epsilon_u l}{4(\Delta/h) - 0.0044(h/l) + 0.008} \quad (13)$$

$$f_{cc}A_{cc} = P + \rho_v f_y (l - 2l_c - 2t_c) - \frac{(f_{ck} + 4\rho_v f_y)t \epsilon_u l}{4(\Delta/h) - 0.0044(h/l) + 0.008} \quad (14)$$

$$f_{cc}A_{cc} = P + (A_s - A_s')f_y - \frac{f_{ck} t \epsilon_u}{4(\Delta/h) - 0.0044(h/l) + 0.008} \quad (15)$$

단, 위 식에서 $4(\Delta/h) - 0.0044(h/l) + 0.008 > 0$ 이어야 한다. 그렇지 않으면 항복변위가 변형도 요구량보다 크므로 단부횡보강이 불필요하다는 것을 의미한다. 이는 식 (16)~(18)에도 동일하게 적용된다.

이때 횡보강콘크리트의 강도 $f_c = k f_{ck}$, $A_{cc} = l_c(t - 2t_c)$ 를 이용하면 식 (13)~(15)는 다음과 같이 수정할 수 있다. 여기서 k = 횡보강효과에 의한 콘크리트의 강도증가률 나타내는 계수.

$$l_c = \frac{1}{k f_{ck}(t - 2t_c) + 2\rho_v f_y t} \{ P + (A_s - A_s')f_y + [(1 - \gamma + \gamma')l - 2t_c]\rho_v f_y t - \frac{(f_{ck} + 4\rho_v f_y)\epsilon_u l t}{4(\Delta/h) - 0.0044(h/l) + 0.008} \} \quad (16)$$

$$l_c = \frac{1}{k f_{ck}(t - 2t_c) + 2\rho_v f_y t} \{ P + (l - 2t_c)\rho_v f_y t - \frac{(f_{ck} + 4\rho_v f_y)\epsilon_u l t}{4(\Delta/h) - 0.0044(h/l) + 0.008} \} \quad (17)$$

$$l_c = \frac{1}{k(t - 2t_c)} \left[\frac{P + (A_s - A_s')f_y}{f_{ck}} - \frac{l \epsilon_u t}{4(\Delta/h) - 0.0044(h/l) + 0.008} \right] \quad (18)$$

벽체에 요구되는 설계변위 Δ 와 벽체에 가해지는 축하중 P , 벽체크기(h , l), 단면의 철근배근형태가 주어진다 면 소성힌지 구간에서 요구되는 횡보강길이 l_c 를 식 (16)~(18)을 통하여 구할 수 있다. 위 식들을 살펴보면 벽체의 횡보강길이는 압축력과 설계목표변위가 증가하면 늘어나고 콘크리트 강도, 벽체두께, 횡보강에 의한 강도증가계수 k , 형상비 h/l 이 커지면 줄어든다.

Fig. 6과 7은 제안식 (16)과 ACI 318-02 내진설계기준에 의한 횡보강길이를 비교하고 있다. 이 비교에서 사용

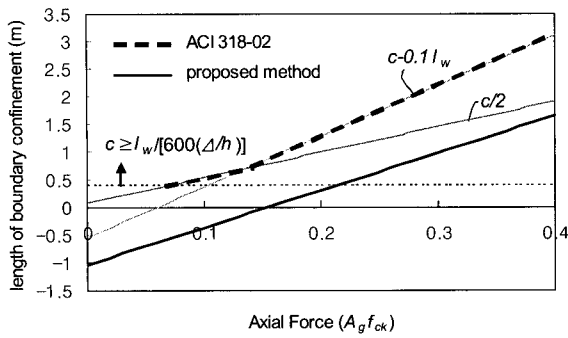


Fig. 6 Variations of length of boundary confinement with axial force

된 벽체는 30층의 건물에 층고가 2.6m로서 $h = 78\text{ m}$, 폭 $l = 7\text{ m}$, 두께 $t = 0.2\text{ m}$, 벽체 단부 0.7m에 집중배근된 단부철근비는 0.03 ($A_s = A_s' = 0.0042\text{ m}^2$), 중앙부 철근비 $\rho_v = 0.0015$, $f_{ck} = 28\text{ MPa}$, $f_y = 400\text{ MPa}$, $\Delta/h = 0.015$ 이다. Fig 6은 벽체에 가해지는 압축력이 $0.4 A_g f_{ck}$ 까지 증가할 때까지 제안식과 ACI 318-02에 의해서 산정된 횡보강길이를 비교하고 있다. ACI 318-02에서는 축하중을 고려하여 구한 압축대의 길이 $c \geq l_w/[600(\Delta/h)]$ 인 경우, $c/2$ 와 $(c - 0.1l)$ 중에서 큰 값을 횡보강하도록 하고 있다. $c/2$ 는 최소한의 횡보강 영역을 규정하기 위한 값이고 $(c - 0.1l)$ 는 압축층 콘크리트의 변형률이 0.003 이상 되는 부분을 횡보강하기 위하여 제안된 값이다.¹²⁾ 제안식 (16)의 횡보강영역 산정에서 안전측의 설계를 위하여 횡보강에 의한 강도 증가계수 $k = 1$, 콘크리트의 극한변형률 $\epsilon_u = 0.003$ 을 사용하였다. Fig. 6에서 ACI 318-02에 의해 횡보강을 필요로 하는 영역은 점선으로 표시되어 있는데 제안식에 의한 값보다 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 ACI 318-02에서는 횡보강 길이 설계를 위한 값임에도 불구하고 압축대 길이 c 의 산정에 횡보강 효과를 고려하지 않기 때문이다. 선행연구⁹⁾에 의하면 횡구속효과는 콘크리트의 강도와 변형능력을 동시에 증가시킨다. 따라서 안전측으로서 강도증가를 무시한다 할지라도 ($k = 1$) 변형능력의 증가에 따라서 Fig. 8(b)와 같이 횡보강영역에서 균등한 응력분포가 발생한다. 이로 인하여 압축대의 길이 c 가 줄어들며, 이는 단면의 곡률연성능력을 크게 향상시킨다. 실제 ACI 318-02에서 제시된 횡보강상세를 사용할 경우 횡구속 효과에 의하여 콘크리트 강도가 1.5~1.7배 가량 증가하는 것으로 나타났으며 따라서 식 (16)에서 $k = 1.5 \sim 1.7$ 를 사용할 경우, 횡보강 길이는 더욱 줄어들 수 있다. Fig. 6에서 압축력이 $0.3 A_g f_{ck}$ 일 때, ACI 318-02에 의하면 횡보강영역 길이가 2.2m 요구되는데 반하여 제안식을 사용하는 경우에는 0.9m로서, 제안식을 사용할 경우에 성능에 기반한 경제적인 설계가 가능하다.

Fig. 7은 벽체폭을 변수로 하였을 경우에 횡보강길이에

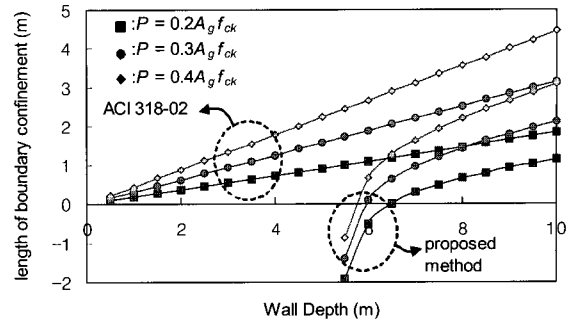


Fig. 7 Variations of length of boundary confinement with wall depth

대한 ACI 318-02와 제안식을 비교하고 있다. Fig. 6에서 나타난 결과와 마찬가지로 본 연구에서 제안된 횡보강길이 ACI 318-02에 비해서 작은 것을 알 수 있으며 특히 벽체폭이 5m 이하인 경우에는 횡보강이 필요없음을 알 수 있다. 일반적으로 벽식구조의 아파트 설계에 벽체단부 횡보강 여부는 시공성에 큰 영향을 줄 수 있으므로 가능한 단부횡보강을 설치하지 않는 것이 바람직하다.

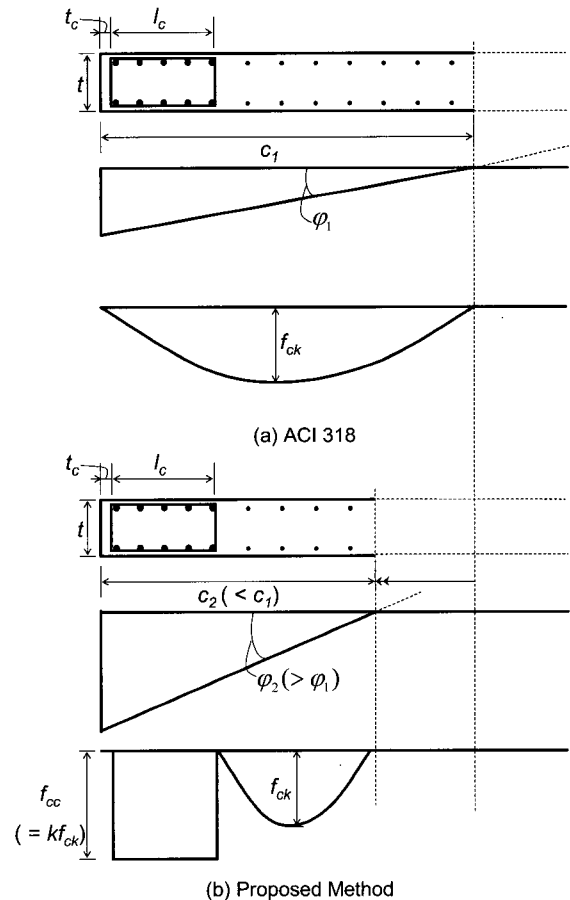


Fig. 8 Comparisons of stress and strain profiles in compressive zone

식 (16)~(18)에 의하면 콘크리트 강도를 증가시키거나 벽량을 증가시켜 횡보강 길이의 요구량을 감소시킴으로서 횡보강상세의 필요성을 없앨 수 있다. 만약 제안된 설계 방법에 의하여 적정한 단부횡보강을 실시하여 구조벽의 연성능력을 확보한다면 건축물하중기준에서 제시하는 $R = 3.0$ 이상의 값으로 R 을 사용할 수 있을 것으로 판단되며, 보다 설계의 유연성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 횡보강길이 산정법의 검증

구조 벽체의 횡보강 길이 산정을 위해 제안된 방법의 검증용을 위하여 Wallace¹⁴⁾ 가 실시한 T형 벽체의 실험결과와 비교하였다. Fig. 9는 시험체의 단면상세, 하중조건, 사용된 재료의 성질 등이 나타나 있으며 Fig. 10은 실험결과로서 하중-변위관계를 나타내고 있다.

실제 압축단부의 일부만을 횡보강한 구조벽체의 실험은 극히 제한적이다. 그 이유는 ACI 318-99이전의 ACI 기준이 중력하중 전부를 부담할 수 있는 압축단부요소를 설치하도록 규정하였는데 이러한 경우 압축대 전 영역이 횡보강되는 효과를 가져온다. 또한 압축대 일부가 횡보강되고 ACI 상세를 사용하면서 벽체의 휨과피를 유도하기 위해서는 실험체의 크기와 가력 하중이 매우 커야 하므로 실질적으로 이러한 구조벽에 대한 실험은 매우 어려우며 따라서 이러한 실험의 사례는 극히 제한적이다.

이에 반해 Wallace¹⁴⁾의 실험에 사용된 T형 벽체는 휨모멘트성능에 비하여 웨브의 길이가 길어서 비횡보강영역에서의 압축과피가 유도될 수 있는데, 시험체 TW2는 웨브의 비횡보강 콘크리트의 압축과피에 의하여 벽체의 파괴가 발생하였다.

Fig. 10에서 나타난 변형비(Drift ratio)와 Fig. 9에 주어진 여러 변수값을 사용하여 제안된 방법을 사용하여 횡보강 길이를 역으로 계산해 볼 수 있다. 식 (16)을 사용하여 횡보강 길이를 산정한 결과, $l_c = 445.1\text{mm}$ 로서 Fig. 9에서 나타나 있듯이 실제 횡보강 길이 406mm를 비교적 정확하게 예측하고 있다. 본 방법을 따라서 예측한 횡보강 길이가 실제 보다 약간 큰 이유는 횡보강에 의한 강도증가를 나타내는 계수 k 를 안전측으로 1로 하였기 때문이다.

6. 횡보강상세

국내에서 많이 사용되는 벽식구조의 구조벽은 $t = 200\text{mm}$ 의 비교적 얇은 벽체로서 횡보강 철근을 설치하기가 어렵다. 따라서 시공성을 고려한 효과적인 보강상세에 대한 연구가 필요하다.

국내 기준에서는 벽체의 횡보강에 대한 규정이 마련되어 있지 않으며 ACI 318-02¹⁵⁾의 내진기준에서 벽체단부 횡보강상세는 기둥의 횡보강 내진상세를 따르도록 되어 있다. 이러한 횡보강 상세를 벽체 단부에 적용할 때, 가장

핵심적인 조항은 다음과 같다.

- (1) 횡보강근의 단면 철근량 A_{sh} 는 아래 식보다 커야 한다.

$$A_{sh} = 0.3(s h_c f_{ck} / f_y) [(A_g / A_{ch}) - 1] \text{ 또는, } A_{sh} = 0.09(s h_c f_{ck} / f_y) \quad (\text{ACI 318-02, 21.4.4.1(b)})$$

여기서, s = 횡보강근의 수직간격(Fig. 11 참조), h_c = 철근량을 구하고자 하는 단면의 폭, f_y = 횡보강 철근의 항복강도, A_g = 부재의 전체 단면적, A_{ch} = 횡보강된 부재의 코어 단면적

- (2) 횡보강근의 수직간격(Fig. 11의 s)는 부재에서 제일 작은 변 길이의 1/4 이하여야 한다.

$$(\text{ACI 318-02, 21.4.4.2(a)})$$

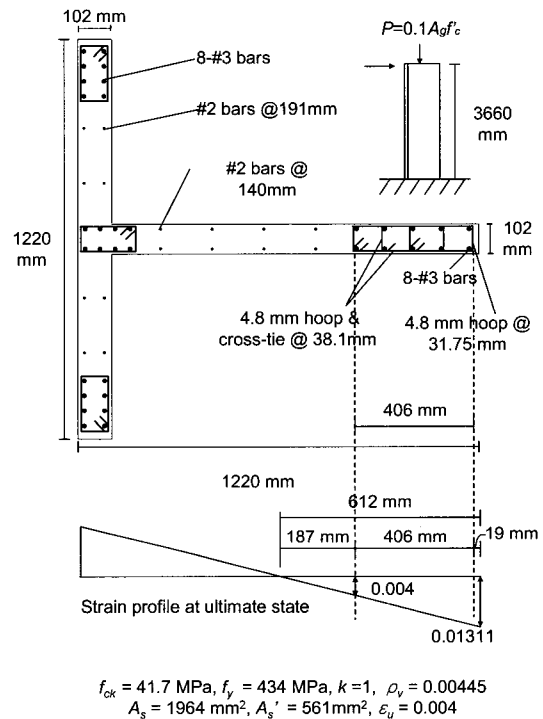


Fig. 9 Experiment of T-shaped shear wall TW2 (Wallace, 1995)

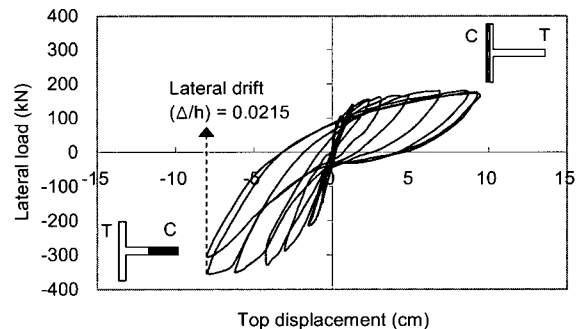


Fig. 10 Load-displacement curve for TW2

(3) 대각철근(cross-tie)이나 겹침 후프(overlapping hoops)의 간격(Fig. 11의 s')는 14 in.(356 mm)이하여야 한다. (ACI 318-02, 21.4.4.3)

(1)은 피복콘크리트의 박리로 인한 강도감소를 코어콘크리트의 강도증가로 만회하기 위한 횡보강 철근량에 대한 규정으로서 피복의 탈락 이후에도 강도감소 없이 연성도를 유지하기 위한 조항이다.(Fig. 12) 하지만 이 규정은 원형기둥의 나선철근량에 대한 식으로부터 락철근 구속효과를 단순 저감하여 만든 기준¹⁶⁾으로서 직사각형 형태 단면에 사용되는 횡보강근의 간격이나 횡보강의 상세에 따른 유효구속효과의 변화를 적절히 고려하지 못한다. 따라서 (2)에서 수직간격에 제한을 두어 효과적인 횡보강효과를 나타낼 수 있도록 하고 있다. 국내에서 벽식구조에 사용되는 구조벽의 경우, 벽체 두께가 일반적으로 200 mm 내외여서 위 규정을 따른다면 벽체의 수직간격은 50 mm 보다 작아야 한다는 것을 의미한다. 이러한 수직간격을 충족시키려면 상당히 많은 횡보강량을 필요로 하며 실제 50 mm 미만의 간격으로 횡보강근을 설치하는 것은 시공상의 어려움이 따른다. 또한 (3)의 규정은 지나치게 대각철근(cross-tie)이나 겹침 후프(overlapping hoops)의 간격 s' 를 크게 허용하고 있는데 벽체단부의 단면형상은 긴장방향으로 s' 의 간격이 작을 수록 횡보강효과가 커질 것으로 기대되며 따라서 실제 벽체에 (3)의 조항에 따라 s' 의 간격을 크게 하여 단부 횡보강설계를 실시할 경우, 합리적인 횡구속 효과를 발휘하기 힘들 것으로 예상된다. ACI 내진기준에서 위와 같은 문제점들이 발생하는 이유는 일반적으로 기준에서 사용하는 단부요소는 대부분 기둥형상으로서, 기둥의 횡보강상세를 그대로 따르고 있기 때문이다. 따라서 벽체 단부의 효과적인 횡보강 상세설계 방법을 개발하기 위하여 직사각형의 압축단부에 대한 철근의 횡구속 효과를 연구해야한다. 벽체의 횡구속 상세를 결정하는 주요한 요소는 ACI 318-02 내진기준에서 정의된 바와 같이 철근량, 횡구속 철근의 수직 간격 s , 대각철근(cross-tie)이나 겹침 후프(overlapping hoops)의 간격 s' 라고 할 수 있다. 그런데 횡보강근은 시공상의 편의로 인하여 일반적으로 벽체의 횡보강에 있어서 D10 또는 D13을 사용하므로 결국 s, s' 를 정의하면 횡구속 철근량은 자동적으로 결정된다.

벽체에 요구되는 단부의 횡보강 효과는 피복박리로 인한 압축단부의 강도저하와 횡보강된 콘크리트의 유효 변형률 등을 고려해야 한다. 횡보강된 코어 주변의 피복이 모두 박리될 때, 압축단부의 연성도를 유지하려면 압축대에서 감소된 강도를 횡보강영역이 보충할 수 있어야 한다.(Fig. 12) 이를 수식으로 표현하면 식 (19)와 같다.

$$A_g f_{ck} = A_c f_{cc} \quad (19-a)$$

$$\text{또는, } (l_c + t_c) t f_{ck} = l_c (t - 2t_c) k f_{ck} \quad (19-b)$$

식(19)를 이용해서 횡보강영역에서의 강도증가를 나타내는 계수 k_d 를 식 (20)과 같이 구할 수 있다.

$$k_d = \frac{(l_c + 25)t}{l_c(t - 50)} \quad (20)$$

여기서 k 는 압축단부의 연성도를 유지하기 위한 요구량 이므로 k_d 로 구별하여 표기하였으며, 피복두께 t_c 는 25 mm로 가정하였다.

일반적으로 벽체두께 $t \geq 180$ mm 그리고 횡보강영역의 길이 $l_c \geq 300$ mm 이므로 식 (20)에 의하여 $k_d \leq 1.5$ 이다.

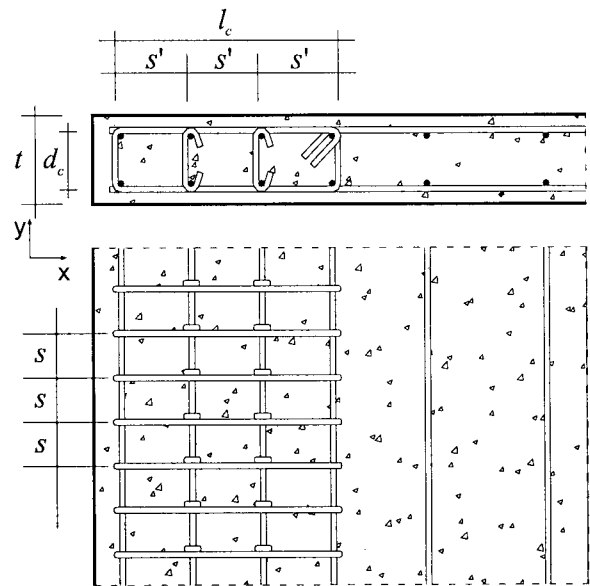


Fig. 11 Details of lateral confinement

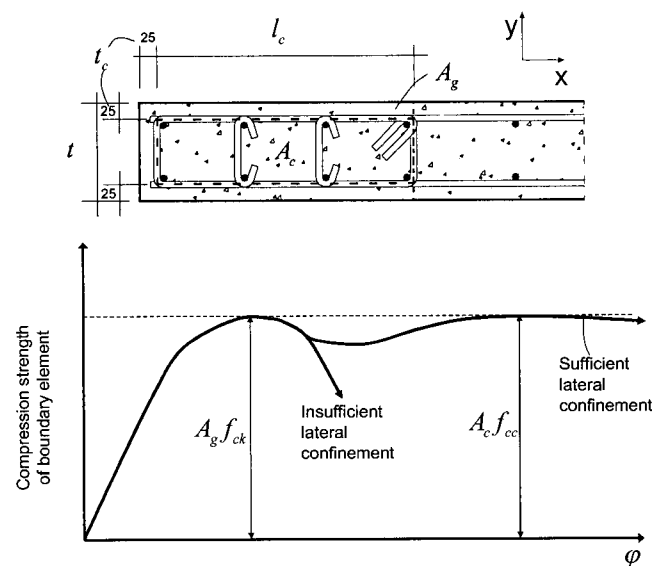


Fig. 12 Effect of lateral reinforcement on ductility

따라서 안전측으로 벽체 단부의 강도요구량 $k_d = 1.5$ 로 가정한다. 강도요구량과 함께 벽체 단부를 횡보강했을 때의 유효변형률에 대한 검토도 필요하다. 횡보강된 콘크리트의 유효변형률 ϵ_{cu} 에 관한 계산은 Priestley⁷⁾에 의하여 다음과 같이 제안되었다.

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + 1.4\rho_s f_y \epsilon_{sm} / f_{ck} \quad (21)$$

여기서, ρ_s = 횡보강 철근비, ϵ_{sm} = 횡보강 철근의 중국 변형률. 단부에 요구되는 강도요구량 $k_d = 1.5$ 를 만족하기 위해서 ρ_s 는 최소 0.017 이상되어야 한다. 이는 식 (23), (26), (27)를 통하여 확인할 수 있다. 만약 $f_y = 400$ MPa, $f_{ck} = 30$ MPa, $\epsilon_{sm} = 0.15$ 라고 한다면 $\epsilon_{cu} = 0.004 + 1.4 \times 0.017 \times 400 \times 0.15 / (1.5 \times 30) = 0.0357$ 이다. 한편, Wood¹⁷⁾의 연구에 의하면, 구조벽에서 인장측 철근의 변형률이 0.04이면 철근의 파단에 의한 파괴를 고려해야 한다. 휨과 축력에 저항하는 벽체 단면에서 상대적으로 압축대의 길이가 인장대의 길이보다 작기 때문에 압축단부에서 $\epsilon_{cu} = 0.0357$ 로 산정된다는 것은 인장철근의 파단 이전에 압축측에서는 압축에 의한 파괴가 일어나지 않는다는 것을 의미한다.

따라서 $k_d = 1.5$ 인 조건을 만족하도록 벽체의 단부를 설계한다면 강도와 연성도 측면에서 충분한 내진성능을 발휘할 수 있다는 것을 의미한다. $k_d = 1.5$ 를 만족하는 벽체단부의 상세를 분석하기 위해 Mander¹⁸⁾가 제안한 횡보강된 철근콘크리트의 응력-변형률관계를 이용하였다. 이 제안식은 벽체단부의 횡보강효과를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 알려져 있으며⁵⁾ 이 제안식으로부터 $k_d = 1.5$ 를 만족하는 횡보강근의 간격 s, s' 를 다음과 같이 찾아 낼 수 있다.

우선 Fig. 13은 직사각형 콘크리트 단면 부재의 각 방향에서의 유효횡압력에 의한 콘크리트의 강도증가를 나타내는 그래프이다.¹⁸⁾ Fig. 13에서 점선으로 표시된 것과 같이, 콘크리트의 강도 증가 계수 $k = 1.5$ 를 만족하는 x, y 각 방향에서 유효횡압력의 관계를 찾아보면 다음과 같다.¹⁸⁾

$$(f'_2 / f_{ck}) = \frac{0.00421}{(f'_1 / f_{ck})^{1.23}} \quad (22)$$

여기서 f'_2 는 x, y 각 방향의 유효 횡압력 중에서 큰 값을, f'_1 는 작은 값을 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$f'_1 = k_e \rho_1 f_y, \quad f'_2 = k_e \rho_2 f_y \quad (23)$$

여기서, k_e 는 횡보강상세에 따른 효과를 나타내는 계수로 횡보강 간격, 부재의 형상비에 의해 결정되고 벽체의

경우는 안전측으로 0.6을 사용할 수 있다.⁷⁾ ρ_2 는 ρ_x, ρ_y 중 큰 값, ρ_1 는 ρ_x, ρ_y 중 작은 값. ρ_x = 단부요소에서 x 방향 수직단면에 대한 횡보강 철근비, ρ_y = 단부요소에서 y 방향 수직단면에 대한 횡보강철근비. $k_e = 0.6$ 을 사용하고 식(23)을 (22)에 대입하면 $k_d = 1.5$ 를 만족하는 철근비의 관계를 다음과 같이 찾을 수 있다.

$$\rho_2 = \frac{0.01315}{\rho_1^{1.23} (f_y / f_{ck})^{2.23}} \quad (24)$$

Fig. 11에서 횡보강철근으로 D10을 사용할 경우, ρ_x, ρ_y 는 다음과 같다.

$$\rho_x = \frac{142}{s \cdot d_c}, \quad \rho_y = \left(\frac{71}{s \cdot s'} \right) \cdot \left(\frac{l_c / s' + 1}{l_c / s'} \right) \quad (25)$$

여기서 d_c = 횡보강영역의 폭.

식 (25)를 식 (24)에 대입하면 $k_d = 1.5$ 를 만족하는 s 와 s' 의 관계를 찾을 수 있고 이는 다음과 같다.

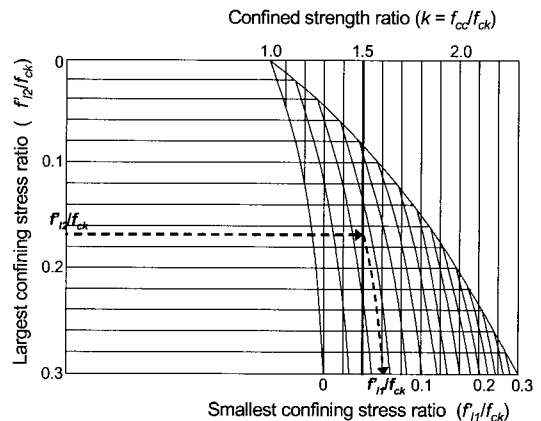


Fig. 13 Confined strength determination from lateral confining stress for rectangular sections (mander, 1998)

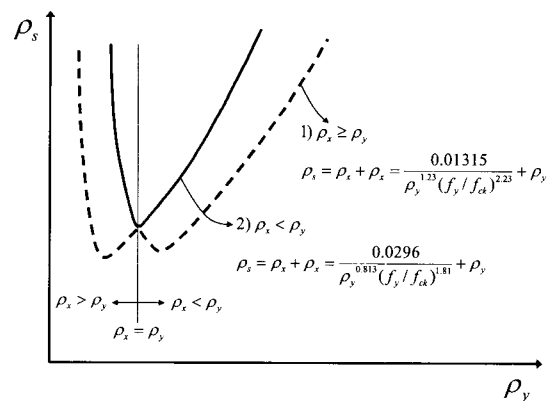


Fig. 14 $\rho_y - \rho_s$ Relationship in case of $k_d = 1.5$

- a) $\rho_y \geq \rho_x$ ($\rho_2 = \rho_y, \rho_1 = \rho_x$)인 경우
 즉, 식 (25)에 의해 $s' \leq (l_c d_c)/(2l_c - d_c)$ 일 때,

$$s = 730 \left(\frac{l_c + s'}{l_c s'} \right)^{0.45} d_c^{-0.55} (f_y / f_{ck}) \quad (26)$$

- b) $\rho_y < \rho_x$ ($\rho_2 = \rho_x, \rho_1 = \rho_y$)인 경우
 즉, 식 (25)에 의해 $s' > (l_c d_c)/(2l_c - d_c)$ 일 때,

$$s = 680 \left(\frac{l_c + s'}{l_c s'} \right)^{0.55} d_c^{-0.45} (f_y / f_{ck}) \quad (27)$$

따라서 위 식을 이용하면 설계자가 재료성질(f_y, f_{ck}), 횡보강영역의 형상(l_c, d_c)을 고려하여 $k_d = 1.5$ 를 만족하는 횡보강근의 간격 s, s' 를 시공 편리성에 맞춰 선택할 수 있다. 보다 효과적인 횡보강설계를 위해서 식 (26), (27)에서 제안된 s, s' 에 대한 분석이 필요하다. 횡보강철근을 설치하는 데에 있어서 어려운 점은 횡보강간격이 작아서 시공이 복잡하다는데 있다. 따라서 효과적인 횡보강 설계는 가능한 횡보강 철근을 적게 써서 시공의 복잡성을 피하는 것이며 이는 전체 횡보강 철근비 ($\rho_s = \rho_x + \rho_y$)를 가능한 작게 하면서 강도요구량 $k_d = 1.5$ 를 만족시키는 것이다. 따라서 식 (24)에 $\rho_x = \rho_s - \rho_y$ 를 대입하여 ρ_y 와 ρ_s 의 관계를 나타내면 이는 Fig. 14와 같다. Fig. 14에 나타나 있듯이 ρ_s 가 최소가 될 때는 $\rho_x = \rho_y$ 일 때이며 이 때의 s' 를 식 (25)에 의해서 찾을 수 있다.

$$s' = \frac{l_c d_c}{2l_c - d_c} \quad (28)$$

식 (28)을 식 (26) 또는 (27)에 대입하면 ρ_s 가 최소인 s 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$s = \frac{1000}{d_c} \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (29)$$

따라서 강도요구량을 만족시키는 동시에 최소의 횡보강량으로 단부횡보강을 실시하고자 할 때는 식 (28), (29)와 같이 횡보강근의 간격을 결정하면 된다.

또한 시공의 편의를 위해 횡보강근의 간격을 조정할 때에는 식 (26) 또는 (27)를 통해서 횡보강근의 간격을 변화시킬 수 있다.

7. 설계예제

구조 벽체의 단부횡보강 설계에 대한 예제로서 Fig. 15와 같은 일반적인 아파트 평면에 대하여 본 연구에서 제안한 방법을 통하여 단부횡보강 설계를 실시하였으며 이를 ACI 318-02 내진기준에 의한 설계결과와 비교하였다. 우선 Fig. 15의 벽식구조 아파트는 층고가 2.7m이고 층수가 26층으로 $h = 70.2$ m이고 벽체두께 $t = 0.2$ m이다. 사용된 재료의 성질은 $f_{ck} = 24$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\epsilon_u = 0.003$ 이다. 벽체하부에 가해지는 압축력 $P = 0.2A_g f_{ck}$ 이고, 설계변위요구량 $\Delta/h = 0.015$ 이다. 이와 같은 조건일 때 Fig. 15의 벽체 W1, W2의 단부횡보강 설계는 Table 1에 정리된 바와 같다.

우선 W1의 경우, 본 연구에서 제안한 방법으로 구한 횡보강 영역의 길이 l_c 는 1532 mm로 ACI 기준에 의해 산정된 값 3660 mm에 비해 현저히 작은 것을 알 수 있다.

전체 횡보강 철근비 ρ_s 또한 본 연구에서 제시된 방법으로 구한 값이 0.017로 ACI 기준으로 산정된 값 0.028보다 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만 횡보강 효과를 의미하는 계수 k 값은 철근비의 차이에도 불구하고

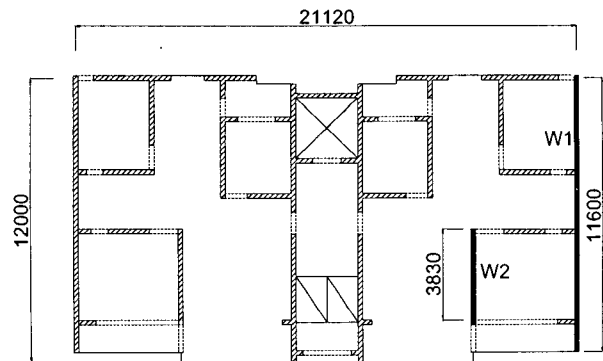


Fig. 15 Design example

Table 1 Design of boundary confinement W1 and W2

	Design method	l_c (mm)	s (mm)	s' (mm)	k	ρ_s
W1 ($l = 11600$ mm, $t = 200$ mm, vertical reinforcement : D10@250 $\rightarrow \rho_v = 0.00286$)	Proposed method	1532 (by Eq. 17)	110 (by Eq. 29)	80 (by Eq. 28)	1.5	0.0172
	ACI 318-02	3660 mm ($c - 0.1l_w$)	50 ($s \leq t/4 = 50$)	140 (ACI318-02, 21.4.4.1(b))	1.55	0.02799
W2 ($l = 3830$ mm, $t = 200$ mm, vertical reinforcement : D13@300 $\rightarrow \rho_v = 0.0042$)	Proposed method	0 $\because 4(\Delta/h) - 0.0044(h/l_w)$ $+ 0.008 < 0$	-	-	-	-
	ACI 318-02	1227 mm ($c - 0.1l_w$)	50 ($s \leq t/4 = 50$)	130 (ACI318-02, 21.4.4.1(b))	1.61	0.02865

$\rho_s (= \rho_x + \rho_y)$ = ratio of volume of transverse confining steel to volume of confined concrete core

$\rho_{x(y)}$ = ratio of area of transverse confining steel running in the x-direction(y-direction) to area of corresponding perpendicular section

고 거의 비슷한 값을 나타내며 이는 ACI 기준에 의한 상세가 효과적이지 못하다는 것을 나타낸다. 또한 전체 철근량을 비교하는 경우에는 그 차이가 더 커진다. 전체 횡보강 철근량은 $\rho_s \cdot l_c \cdot l_p \cdot d_c$ 이다. 벽체의 소성힌지길이 l_p 와 횡보강역영의 폭 d_c 는 동일하므로 ACI 기준에 의해 산정된 횡보강 철근량과 본 연구에서 제시한 횡보강 철근량의 비율은 $(0.028 \cdot 3660 \cdot l_p \cdot d_c) / (0.017 \cdot 1532 \cdot l_p \cdot d_c) = 3.93$ 배로서 ACI 기준에 의해서 산정된 횡보강 철근량이 3.93배 크다는 것을 의미하고 그 만큼 비경제적이다.

시공성의 측면에서도 본 연구에서 제안하고 있는 횡보강 근의 수직간격 s 는 110 mm로 ACI 318-02에 의한 수직간격 50 mm 보다 크므로 보다 나은 시공성을 확보할 수 있다. 실제 철근의 수직, 수평 간격은 수직철근의 배치를 고려하여 결정해야 한다.

W2의 경우 본 연구에서 제시한 방법으로는 벽체의 항복변위가 변형도 요구량보다 크므로 단부횡보강 설계를 실시할 필요가 없는 것으로 나타나 있으나 ACI 기준에서는 횡보강 설계를 요구하고 있다.

본 예제에서 살펴본 바와 같이 제안한 방법을 이용하여 비교적 간단하게 벽체의 단부횡보강 설계를 효과적으로 수행할 수 있다.

8. 결 론

변형요구량을 만족시킬 수 있는 구조벽의 횡보강 길이 산정 방법 및 효과적인 보강상세를 결정하는 방법에 대하여 연구하였으며 주요한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 단부 횡보강된 벽체의 철근배근방식, 철근비, 압축력, 콘크리트강도, 두께, 횡보강상세 등의 설계변수를 고려하는 최대곡률성능을 정의하였고 벽체의 형상, 설계변위 등을 고려한 곡률요구량을 정의하였다.
- 2) 벽체의 곡률요구량과 성능을 이용하여 벽체 단부의 횡보강길이를 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 단부횡보강길이는 압축력과 설계변위가 증가하면 늘어나고 콘크리트 강도, 벽체두께, 횡보강효과, 형상비가 커지면 줄어든다.
- 3) ACI 318-02 내진기준에 의한 횡보강 길이는 횡보강효과를 적절하게 고려하지 않으므로 비경제적인 설계가 될 수 있다. 반면에 제안된 방법은 횡보강효과를 적절하게 반영하고 있으며 다양한 설계변수를 고려할 수 있어서 성능에 기초한 벽체의 단부설계가 가능하다.
- 4) 효율적인 단부 횡보강 효과와 시공성을 확보하기 위해서 현행 설계 기준의 문제점을 파악하였고 단부 횡보강상세에 대한 분석을 수행하여 이를 근거로 하여 구조벽의 형태적, 거동적 특성을 반영한 횡보강근의 배치 간격을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구사업 (과제번호 : 1999-1-310-002-3)의 재정적 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, "건축물하중기준," 1996.
2. 건설교통부, "건축물하중기준," 2000.
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준," 2000.
4. American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete," *ACI 318-95*, 1995, Special Provision for Seismic Design 21.6.
5. 강수민, 박홍근, "장방향 콘크리트 구조벽의 연성 보강," 콘크리트학회논문집, 14권 4호, 2002, pp.530~539.
6. American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete," *ACI 318-99*, 1999, Special Provision for Seismic Design 21.6.
7. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., "*Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*," Wiley Interscience, New York, 1992, pp.362~423.
8. Wallace, J. W., "Seismic Design of RC structural Walls. Part I: New Code Format," *J. Struct. Engr.*, ASCE, Vol.121, No.1, 1995, pp.75~87.
9. 강수민, 박홍근, "단부 횡보강된 구조벽의 모멘트-곡률 관계," 콘크리트학회논문집, 15권 2호, 2003, pp.323~334.
10. Building Seismic Safety Council, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," 1997.
11. Chang, G. A. and Mander, J. B., "*Seismic Energy Base Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns, Part I : Evaluation of Seismic Capacity*," Technical Report NCEER-94-006, Buffalo, New York, 1994.
12. Wallace, J. W. and Orakcal, K., "ACI 318-99 Provisions for Seismic Design of Structural Walls," *ACI Structural Journal*, ACI, Vol.99 No.4, 2002, pp.499~508.
13. Priestley, M. J. N., "Performance Based Seismic Design," *12th World Conference on Earthquake Engineering(WCEE)*, 2000, Paper No.2831.
14. Thomsen IV, J. H. and Wallace, J. W., "*Displacement Based Design of RC Structural Wall : An Experimental Investigation of Walls With Rectangular And T-Shaped Cross Sections*," Technical Report NSF-BCS-9112962, Clarkson University, 1995, pp.314~353.

15. American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete," *ACI 318-02*, 2002, Special Provision for Seismic Design 21.7.
16. Sakai, K. and Sheikh, S. A., "What Do We Know about Reinforced Concrete Columns : A Critical Review of Previous Work and Code Provisions," *ACI Structural Journal*, ACI, Vol.86, No.2, 1989, pp.192~205.
17. Wood, S. L., "Minimum Tensile Reinforcement Requirements in Walls," *ACI Structural Journal*, Vol.86, No.4, 1989, pp.582~591.
18. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete," *J. Struct. Engrg., ASCE*, Vol.114, No.8, 1988, pp.1804~1826.

요 약

구조벽의 성능에 기초한 내진설계를 위해서는 변형요구량을 만족시킬 수 있도록 구조벽의 횡보강 길이 및 보강상세를 결정하는 합리적인 설계 방법이 필요하다. 이를 위하여, 다양한 설계변수를 고려하여 단부 횡보강된 구조벽의 최대곡률성능을 정의하였고 벽체의 형상, 설계변위에 따른 곡률요구량을 정의하였다. 벽체의 곡률성능과 요구량을 등가로 하여 벽체 단부의 횡보강 길이를 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 본 방법에 의하면 단부횡보강길이는 압축력과 설계변위가 증가하면 늘어나고 콘크리트 강도, 벽체두께, 횡보강효과, 형상비가 커지면 줄어든다. 또한 효율적인 단부 횡보강 효과와 시공성을 확보하기 위해서 단부 횡보강상세에 대한 연구를 수행하였으며 이 연구결과를 근거로 효율적인 횡보강근의 배치간격에 대한 합리적인 지침을 제안하였다.

핵심용어 : 횡보강, 연성도, 철근콘크리트, 내진설계, 구조벽, 단부요소