

철근콘크리트 깊은 보의 전단 내력에 대한 개구부 보강 효과

Effect of Reinforcement for Web Opening on Shear Strength of Reinforced Concrete Deep Beams

이 종 권* 최 윤 철* 이 용 택**

Lee, Jong-Kweon Choi, Yun-Cheul Lee, Yong-Taeg

(논문접수일 : 2007년 1월 8일 ; 심사종료일 : 2007년 8월 10일)

요 지

일반적으로 깊은 보의 개구부 보강을 할 경우 개구부 주변의 부족한 내력에 대해 수직, 수평, 대각, 혹은 혼합된 배근 형태를 사용하게 되는데, 경제성과 구조적 안전성을 고려하기 위해서는 각 배근 형태 및 방법에 따른 깊은 보의 거동 평가와 적절한 조합에 관한 연구가 절실히 필요하다. 이에 본 연구에서는 개구부 보강방법을 변수로 한 simulation 모델을 통해 수직, 수평 보강의 효과에 대해 해석적으로 검증한 후, 각 규준에서 제시하고 있는 개구부가 있는 깊은 보의 전단 내력식을 분석하고 해당 식을 보완하여 단순지지 1경간 및 연속 경간에 적용 가능한 전단 내력 산정식을 제안하고자 한다.

핵심용어 : 유한요소해석, 보강방법, 전단 내력 산정식

Abstract

Reinforced concrete deep beams are general structural members used as transfer-girder, pile cap, foundation wall and so on. They have a complex stress formation. Generally, failure mechanisms differ from either continuous deep beams or simple supported deep beams. In continuous deep beams, a negative moment is occurred over intermediate support and the location of maximum moment coincide with high shear force. Therefore, failure usually occurs at this region. While on the other hand, in simple supported deep beam, the region of high shear coincides with the region of low moment. The web opening of deep beams for accepting a facility makes shear behaviors of deep beams more complex and gives rise to an expansion of crack around the opening and a decline of shear capacity of deep beams. Therefore, Engineers must determine a delicate reinforcement method to control a crack and increase a shear capacity. The purpose of this report is a computation of an effective reinforcement method through non-linear finite element method by means of adopting various reinforcement method as variables and a computation of shear capacity formula taking an effectiveness of reinforcement into consideration.

Keywords : finite element method, reinforcement method, shear capacity formula

1. 서 론

주상 복합건물의 전이층이나 아파트 지하 주차장과 같이 구조 형식이 변하는 곳에서 사용되는 RC 깊은 보의 구조 및 재료의 비선형성으로 인하여 구조거동이 일반보보다 훨씬 복잡하며, 각국 규준에서는 깊은 보의 전단 거동에 관한 자세한 지침을 제시하지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 깊은 보의 파괴 거동은 단순 지지된 1경간 깊

은 보와 연속 경간 깊은 보에 있어 다른 양상을 나타낸다. 단순 지지된 깊은 보의 경우 최대 전단력이 발생하는 곳에서 상대적으로 작은 휨 모멘트가 발생하게 되며, 연속경간 깊은 보의 경우에는 연속단에 발생하는 부모멘트의 영향으로 최대 전단력이 발생하는 곳과 최대 휨모멘트가 발생하는 곳이 일치하게 되는데, 이러한 영역에서 파괴가 발생하게 된다. 또한, 최근 건축물의 구조 형식은 보 하부의 공간을 사용하는 대신 보 축에 직각 방향으로 개구부를 설치하여 덕트, 파이

* 책임저자. 정회원 · 충주대학교 건축공학과 시간강사
Tel: 031-750-5338 ; Fax: 031-755-0296
E-mail: jkweon2@naver.com

* 한양대학교 BK 21 박사후 연구원

** 한밭대학교 건축공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 2월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

프 등의 설비관계를 관통시키는 경우가 많은데, 이를 통하여 다층 건물에 있어서 각 층에서의 층간 높이 감소에 따라 발생하는 전체 높이의 감소로 인하여 전체하중이 현저하게 줄어드는 효과를 얻을 수 있어 경제적이다. 하지만, 보를 관통하는 개구부의 형성은 보의 거동을 더욱 복잡하게 변화시킨다. 개구부의 형성은 보편적인 응력의 흐름에 불연속을 발생시키며, 이것은 응력 집중으로 인한 개구부 주변 조기 균열의 원인이 되며, 보의 극한 강도에도 크게 영향을 미치게 되어 개구부가 형성 될 경우 설계자는 균열 제어 및 내력 확보를 위한 세심한 보강을 할 필요가 있다.

일반적으로 개구부 보강을 할 경우 개구부 주변의 부족한 내력에 대해 수직, 수평, 대각, 혹은 혼합된 배근 형태를 사용하게 되는데, 경제성과 구조적 안전성을 고려하기 위해서는 각 배근 형태 및 방법에 따른 깊은 보의 거동 평가와 적절한 조합에 관한 연구가 절실히 필요하다.

현재 깊은 보의 개구부 보강과 관련해서는 각국 규준에서 정확한 지침을 제시해 주지 못하고 있으며, 연속 경간 개구부가 있는 깊은 보에 있어서 보강 효과를 고려한 내력 산정식의 경우 단순보의 내력 산정식에 근거하여 적용하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 개구부 보강방법을 변수로 한 해석 모델을 통해 수직, 수평 보강의 효과에 대해 해석적으로 검증한 후, 각 규준에서 제시하고 있는 개구부가 있는 깊은 보의 전단 내력식을 분석하고 해당 식을 보완하여 단순지지 1경간 및 연속 경간에 적용 가능한 전단 내력 산정식을 제안하고자 한다.

2. 유한요소해석

2.1 2경간 깊은 보의 해석

본 연구를 위한 해석의 첫 단계로서, 프로그램의 효용성 검증은 이종권 등(2003)의 실험을 바탕으로 실시하였으며, 실험체 일람 및 실험 결과를 표 1에 나타내었다.

본 연구에 사용된 비선형 유한요소해석 프로그램은 일본 Total Information사에서 개발한 Total-RC를 사용하였다.

대상 실험체는 평면 응력 상태로 가정하여 2차원 해석을

실시하였으며, 해석에 있어 각 요소들은 다음과 같은 거동 효과를 고려하였다.

1) 콘크리트 : 4절점 iso-parametric 평면 응력 요소를 사용하였으며, 압축응력-변형률 관계는 다축 응력 하에서의 재료적 특징을 고려하였다. 균열 발생 후의 압축응력의 감소를 고려하였으며, 인장응력-변형률 관계는 균열 발생까지는 선형 탄성, 균열 발생 후는 지수형의 인장연화를 고려하였다.

2) 철근 : 2절점 트러스 요소를 사용하였으며, 재료의 항복 응력 및 탄성 계수는 재료 실험값을 적용하였다. 항복 조건식은 Von-Mises 식을 적용하였으며, 가공 변화는 등방 경화로 고려하였다.

3) 본드(Bond) : 주 인장 철근과 콘크리트와의 부착관계를 표현하는 요소로서 4절점 iso-parametric 본드 요소를 사용하였다. 균열 발생 후 잔류 응력 및 잔류 강성은 동시 개방형을 사용하였다.

본 해석에서 고려된 균열 발생 기준은 제1주응력인 σ_1 만으로 결정되는 최대 주응력 판정법을 고려하였으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 \geq f_t \tag{1}$$

콘크리트의 인장응력-변형률 관계에 있어 변형률 의존형의 균열 발생 모델의 함수는 다음 식을 사용한다.

$$\sigma_r = \text{EXP}(C(\epsilon_f - \epsilon_c))\sigma_c \tag{2}$$

여기서, ϵ_c : 균열 발생시의 변형률

ϵ_f : 현시점에서의 변형률

σ_c : 균열 발생 응력

C : 잔류 특성 계수 ($C = \frac{\log(R)}{\epsilon_f}$)

R : ϵ_f 에 대한 잔류율

콘크리트의 압축파괴는 大沼 등에 의한 다축 응력장의 콘크리트 파괴 시험을 근거로 한 2축 응력장에서의 압축파괴 식을 사용하였으며 다음과 같다.

표 1 이경간 깊은 보 실험체 일람표(이종권 등, 2003)

시험체명	a/d	h(mm)	개구부 크기(mm)	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)	p_t (%)	p_c (%)	P_{cr} (MPa)	P_{max} (MPa)
DB#1	1.25	1000	-	23.7	1.9	0.6	0.59	318.7	1794.6
DB#2	1.25	1000	300	23.7	1.9	0.6	0.59	230.5	1559.2
DB#3	1.25	1000	300	23.7	1.9	0.6	0.59	279.5	1639.6
DB#4	1.25	1000	300	23.7	1.9	0.6	0.59	196.1	1617.2

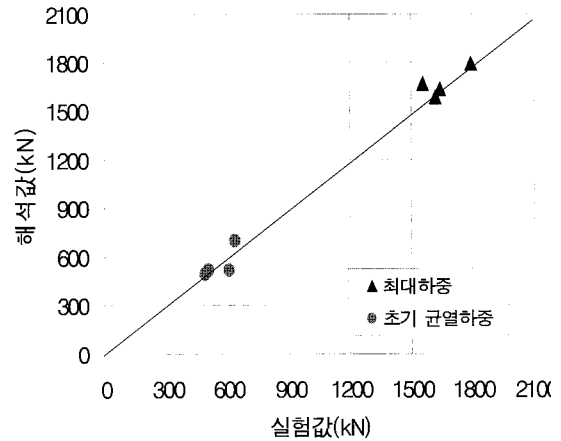
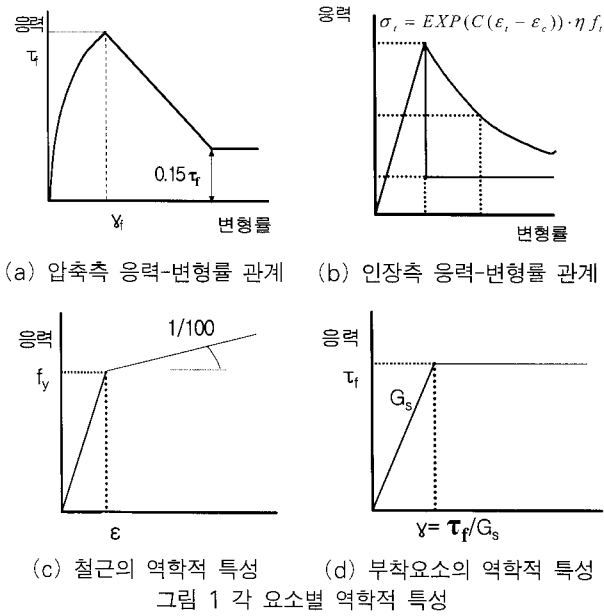


그림 2 실험-해석 결과 비교(초기균열 하중과 최대하중)

유사한 값을 나타내었으나 DB#2의 경우 최대하중에서 실험값(1559.2kN)보다 해석값(1662.1kN)이 크게 나타났는데, 이는 실험 당시 DB#2 실험체의 좌측 단부 지점 콘크리트가 초기에 지압 파괴 됨으로 인하여 최대하중에 도달하기 전에 실험이 종료된 것에 의한 영향으로 판단된다.

$$\frac{\sigma_2}{f_{ck}} \geq 1.0 + C_1 \frac{\sigma_1}{f_{ck}} - C_2 \left(\frac{\sigma_1}{f_{ck}}\right)^2 \quad (3)$$

여기서, $C_1=0.831$, $C_2=0.643$ 이며, 파괴정수이다.

하중은 실험체 지점의 수직 변위가 구속되는 동안 수직 변위를 하중점에 작용시켰다. 각 요소별 역학적 특성을 그림 1에 나타내었다.

상기의 조건을 적용하여 해석을 실시하였으며, 해석에 의한 초기균열 내력과 최대전단 내력에 대하여 실험결과와 해석결과를 비교하여 그림 2에 나타내었다.

해석값과 실험값의 차이는 초기균열 하중에 대해서는 0.91~1.19의 범위를 나타내었으며, 최대하중의 경우 0.94~1.01로 비교적 근사한 값을 나타내었다.

최대하중의 경우 DB#1, 3, 4는 해석값과 실험값이 거의

2.2 개구부 보강 효과에 대한 해석

개구부 보강방법에 따른 2 경간 깊은 보의 내력을 평가하기 위하여 동일한 보강근량에 대하여 보강방법을 달리하는 변수를 통하여 전단 내력을 해석적으로 평가하였다. 개구부 주변 보강근량의 산정을 위하여 일본 건축학회 유공보 전단 내력식을 기초로 하였으며, 개구부가 없는 기준 실험체의 실험 내력을 기준으로 하여 식의 역산으로 보강근량을 산정하였다.

개구부는 앞선 실험에서의 위치와는 달리 전단 경간과 깊이 중심에 위치시켰으며, 그 외의 실험체 형상은 앞선 실험과 동일하게 적용하여 개구부가 각각 불연속단, 연속단에

표 2 유한요소해석 실험체 일람표

실험체	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)	개구부 보강		인장철근비 p_t (%)	압축철근비 p_c (%)	비고
			수직	수평			
A	23.7	1.9	-	-	0.6	0.59	무보강
			D13-12	-			수직 100%
			D13-3	D13-9			수직25%+수평75%
			D13-6	D13-6			수직50%+수평50%
			D13-9	D13-3			수직75%+수평25%
			D13-12	D13-12			수직 100%+수평100%
			B	23.7			1.9
D13-16	-	수직 100%					
D13-4	D13-12	수직25%+수평75%					
D13-8	D13-8	수직50%+수평50%					
D13-12	D13-4	수직75%+수평25%					
D13-16	D13-16	수직 100%+수평100%					

위치하는 A, B의 2그룹으로 나누었으며, 인장철근, 압축철근의 양, 콘크리트 강도 등은 앞선 실험의 결과와 동일하게 적용하였다. 산정된 보강근량에 대하여 보강 방법의 효과를 평가하기 위해 각 그룹별로 수평 100%, 수직 25%+수평 75%, 수직 50%+수평 50%, 수평 25%+수직 75%, 수직 100%의 5가지 pattern으로 나누었다. 보강 방법에 따른 해석모델 일람을 표 2에 나타내었다.

2.3. 해석 결과 및 이론식 비교

현재 사용되고 있는 실용 코드에서는 깊은 보에 대해 서로 다르게 정의하고 있다. ACI 318-02(2002)에서는 순경간-깊이의 비가 4이하 혹은 전단 경간-깊이 비가 2이하인 경우를 깊은 보로 정의하고 있으며, CIRIA Guide 2(1997)에서는 경간-깊이비를 2.5이하로 정의하고 있다. 또한 연속 경간 깊은 보에 대해서는 단순 지지된 깊은 보의 식으로부터 도출하여 설계식을 제안하고 있다. 웨브에 개구부가 있는 깊은 보의 전단 내력식은 현재 CIRIA Guide 2 및 일본 건축학회(1999)에서 실용 코드로 제안을 하고 있으며 이를 바탕으로 해석 결과와 비교하였다.

1) 일본 건축학회 제안식(AIJ; 일본 건축학회, 1999)

일본 건축학회에서 제안하고 있는 전단 내력식은 일반 보 또는 깊은 보의 구분 없이 웨브에 개구부가 있는 보에 대하여 실험에 의한 경험식을 바탕으로 개구부가 위치하는 곳의 전단 내력식을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$Q_{MEAN} = \frac{0.12k_u k_p (F_c + 18)}{\frac{M}{Qd} + 0.12} (1 - 1.61 \frac{H}{D}) + 0.85 \sqrt{\rho_s \sigma_y} b j \quad (4)$$

여기서 $\frac{M}{Qd}$ 는 전단경간비,

k_u 는 보 높이에 의한 보정계수,

k_p 는 인장철근에 의한 보정계수이다.

해당 내력식은 전단 경간비, 개구부의 크기 및 개구부 주변 보강근 효과에 대해 고려를 하고 있으며, 개구부 크기의 경우 $H/D=13$ 으로 규정하고 있다(여기서 H : 원형 개구부의 지름, D : 보 깊이). 우측 두 번째 항은 개구부 주변 보강에 따른 전단내력의 기여도 향으로 보강근 효과의 경우 수직 및 대각 보강근의 효과에 대해서는 본식에서 고려하고 있으나 수평 보강근의 효과는 본 식에서 고려하지 않고 있다.

개구부가 위치한 경간에서의 전단 내력에 대하여 해석결과

표 3 최대 전단 강도 비교(AIJ)

실험체	V_c (kN)	V_v (kN)	V_t (kN)	V_{ANA} (kN)	V_{ANA}/V_t
AV	112.2	141.9	254.1	291.9	1.15
AV0	112.2	141.9	254.1	371.1	1.46
AV25	112.2	201.0	313.2	387.9	1.24
AV50	112.2	246.3	358.5	397.2	1.11
AV75	112.2	284.5	396.7	404.3	1.02
AV100	112.2	318.2	430.4	408.6	0.95
BV	112.2	141.9	254.1	312.3	1.23
BV0	112.2	141.9	254.1	360.9	1.42
BV25	112.2	217.2	329.4	389.7	1.18
BV50	112.2	272.4	384.6	415.1	1.08
BV75	112.2	318.1	430.3	425.0	0.99
BV100	112.2	358.1	470.3	435.8	0.93

* V_c (kN) : 콘크리트 전단내력,

V_v (kN) : 웨브 수직 철근 전단내력

V_t (kN) : 전체 전단 내력

와 AIJ에서 제안하는 내력값을 비교하여 표 3에 나타내었다. 제안식에 의한 내력은 각 실험체 별로 콘크리트 기여도, 철근의 기여도로 나누어 평가하였다.

2) CIRIA Guide 2 제안식(CIRIA Guide, 1977)

지점과 가력점을 연결하는 하중 경로 상에 개구부가 위치할 경우 CIRIA Guide 2에서는 다음과 같은 내력식을 제안하고 있다.

$$Q_{ult} = C_1 \left(1 - 0.35 \frac{k_1 x}{k_2 D} \right) f_t b k_2 D + \sum \lambda C_2 A \frac{y_1}{D} \sin^2 \alpha_1 \quad (5)$$

여기서 C_1 : 일반콘크리트 1.4, 경량콘크리트 1.0

C_2 : 이형철근 300MPa, 원형철근 130MPa,

$k_1 x$: 개구부중심의 수평위치,

$k_2 D$: 개구부중심의 수직위치,

λ : 주근 1.0, 웨브 보강근 1.5,

f_t : 활렬인장강도이다.

본 식은 하중 경로법에 근거한 식으로서 콘크리트의 인장 강도, 전단경간비, 수직, 수평 보강근의 영향을 고려하고 있다. 각 실험체 별로 콘크리트의 기여도, 전단 보강근의 기여도를 나누어 최대 전단 강도를 비교하였다. AIJ식에서는 콘크리트 기여도 항에 주 인장철근의 기여도가 포함되지만, 본식에서는 순수 콘크리트의 기여도만을 고려하고 있으며, 주 인장 철근의 경우 수평 전단보강근으로 고려하고 있어, 철근

표 4 최대 전단 강도 비교(CIRIA Guide 2)

실험체	V_c (kN)	V_f (kN)	V_h (kN)	V_v (kN)	V_t (kN)	V_{ANA} (kN)	V_{ANA}/V_t
AV	59.4	79.1	-	125.5	264.0	291.9	1.11
AV0	59.4	79.1	225.2	125.5	489.2	371.1	0.76
AV25	59.4	79.1	180.4	223.4	542.3	387.9	0.72
AV50	59.4	79.1	135.7	349.0	623.2	397.2	0.64
AV75	59.4	79.1	66.8	449.6	654.9	404.3	0.62
AV100	59.4	79.1	22.1	572.6	733.2	408.6	0.56
BV	59.4	79.1	-	125.5	264.0	312.3	1.18
BV0	59.4	79.1	300.7	125.5	564.7	360.9	0.64
BV25	59.4	79.1	248.2	274.5	661.2	389.7	0.59
BV50	59.4	79.1	173.5	423.5	735.5	415.1	0.56
BV75	59.4	79.1	97.8	572.6	808.9	425.0	0.53
BV100	59.4	79.1	22.1	721.6	882.2	435.8	0.49

* V_c (kN) : 콘크리트 전단 내력,
 V_f (kN) : 주 인장근의 전단 내력
 V_h (kN) : 웨브 수평 철근 전단 내력,
 V_v (kN) : 웨브 수직 철근 전단 내력,
 V_t (kN) : 전체 전단 내력

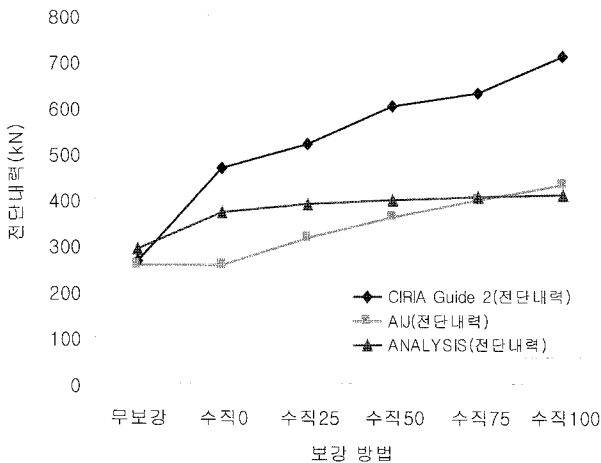


그림 3 A그룹 실험체의 전단 내력 비교

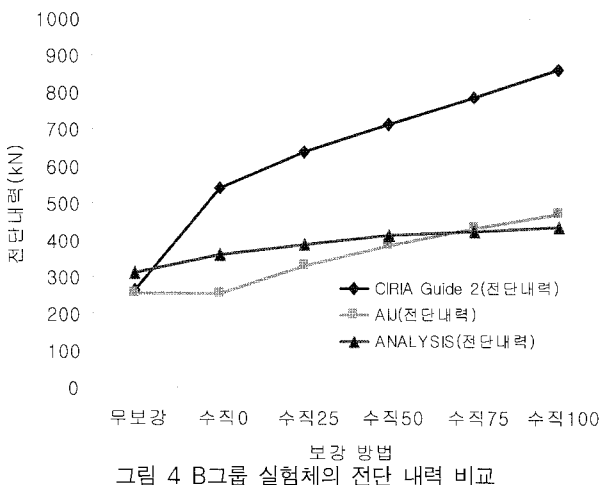


그림 4 B그룹 실험체의 전단 내력 비교

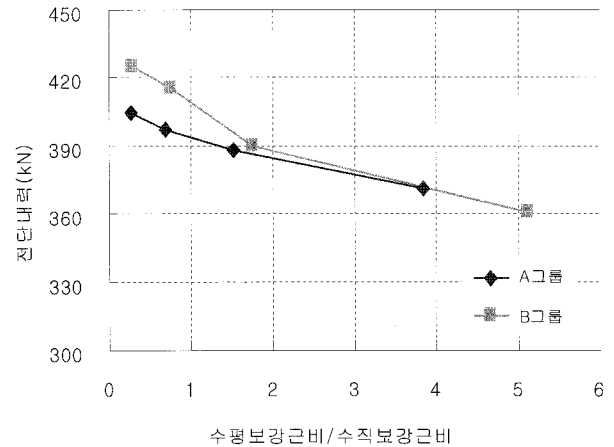


그림 5 보강근 비에 따른 내력비교

의 기여도에서 주인장철근, 수직 보강근, 수평 보강근으로 구분하여 표 4에 나타내었다.

위의 결과를 바탕으로 그림 3과 그림 4에 CIRIA Guide 2, AIJ, 해석에 의한 최대전단 내력을 비교하였다.

AIJ에서 제안하는 내력식은 수평 철근의 효과를 반영하지 못하므로 무보강 실험체(AV, BV)와 수평 철근만 보강된 실험체(AV0, BV0)에 대하여 같은 값을 나타내고 있으며, 수직 철근만으로 보강된 실험체에 대해서는 AIJ 제안값과 해석값이 근사한 값을 나타내고 있다. 이에 반하여 CIRIA Guide 2의 제안식의 경우 개구부 위치에 관계없이 수직 보강근의 증가에 따라 내력 증가를 과대평가하고 있는 양상을 나타내고 있다.

그림 5에 해석결과 수평 보강근비와 수직보강근 비에 따른 전단내력을 나타내었다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 수평 보강근의 양이 감소함에도 불구하고 수직 보강근의 양이 증가함에 따라 그 내력은 증가함을 알 수 있으며, 이는 CIRIA Guide 2에서도 동일한 양상을 나타내고 있다. 따라서 본 해석을 통하여 개구부 보강과 관련해서 개구부의 위치에 관계없이 수평 보강에 비해 수직 보강이 더 효과적임을 알 수 있다.

3. 수정식 제안

3.1. 수정식 제안

앞선 결과에서 알 수 있듯이 CIRIA Guide 2에서 제안하는 내력식은 수직 철근의 효과를 과대평가하고 있어 전체 내력이 과대평가 되고 있으며, AIJ에서 제안하고 있는 내력식은 수직 보강만으로 이루어진 실험체에 대하여는 해석값과 근사한 값을 나타내고 있지만, 수평 보강근의 효과를 고려하

표 5 보강 방법에 따른 전단 내력 기여도 비교

구분	실험체	$\rho_h(\%)$	$\rho_v(\%)$	$V_u(\text{kN})$	$V'_u(\text{kN})$	$V_s(\text{kN})$
A	NW2-0.3/4	1.19	0	290.0	120.0	170.0
	NW3-0.3/4	1.19	0	310.0	120.0	190.0
	NW7-0.3/4	0	1.13	360.0	120.0	240.0
B	W2-0.3/4	1.19	0	245.0	130.0	115.0
	W3-0.3/4	1.19	0	280.0	130.0	150.0
	W7-0.3/4	0	1.13	315.0	120.0	185.0
C	AV0	2.30	0	368.6	291.9	76.7
	AV100		2.16	390.2	291.9	98.3
D	BV0	3.07	0	360.9	312.3	48.6
	BV100	0	2.90	435.8	312.3	123.5

* $V_u(\text{kN})$: 보강한 실험체의 내력,
 $V'_u(\text{kN})$: 무보강 실험체의 내력
 $V_s(\text{kN})$: 보강근에 의한 전단내력,
 $(V_u - V'_u)$, ρ_h : 수평보강 철근비
 $\rho_v(\%)$: 수직보강 철근비

지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 AIJ에서 제안하는 유공보 전단 내력 식에 대하여 수평 보강근의 효과를 고려할 수 있는 수정식을 제안하며, 이를 통하여 전체 전단강도를 보다 정확하게 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

개구부가 있는 2경간 깊은 보의 보강에 있어 수직 보강이 수평 보강에 비해 효과적임을 앞선 해석 결과를 통하여 알 수 있다. 보강의 효과에 관해서는 각 보강 방법에 따른 전단 내력을 평가함으로써 보강 방법별 내력 기여도를 평가할 수 있으며, 이를 통하여 수평 보강근의 내력 기여도를 구할 수 있다.

표 5는 Kong et al.(1977)에 의한 실험 결과(단순경간 실험체)와 해석에 의한 내력값을 나타낸 것으로 개구부 보강 방법에 있어 수직 보강, 혹은 수평 보강만을 변수로 하고 나머지 조건에 대해서는 동일한 실험체 들이다.

여기서 V_s 는 보강을 한 실험체에 대해 무보강일 때의 내력을 공제한 내력으로 이는 순전히 보강에 의한 전단 내력의 기여도를 의미하는 값이다. 이를 바탕으로 수평 보강에 대한 수직 보강의 내력 비를 평가해보면 다음과 같은 식에 의하여 수평 보강근비의 저감 계수를 구할 수 있다.

$$a_{mean} = \left\{ \sum \left(\frac{\rho_{sv} V_{sh}}{\rho_{sh} V_{sv}} \right) \right\} / n \approx 0.68 \quad (6)$$

여기서 n 은 탄성계수비이다. 일반적으로 철근콘크리트 보 부재의 전단내력은 $V_n = V_c + V_s$ 으로 산정하고 있으며, 각 항별로 평가해 볼때 AIJ 제안식에서는 콘크리트의 내력 산정 시 개구부의 영향을 고려하여 $(1 - 1.61H/D)$ 의 계수를 적용하고 있다. 이는 개구부가 있는 부재에 대해서는 개구부의

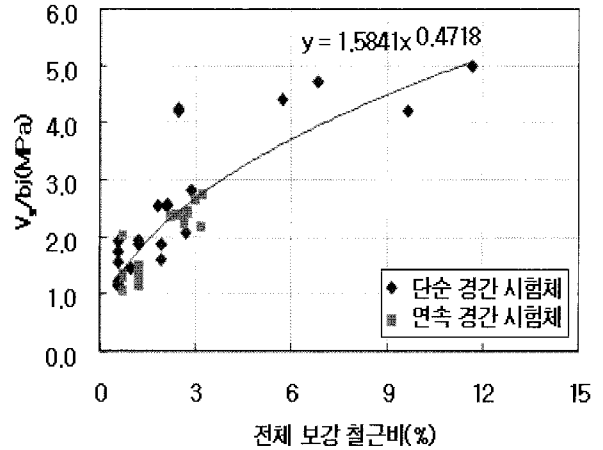


그림 6 철근비에 따른 보강근의 전단 내력

면적을 공제한 유효면적으로 콘크리트 내력을 산정하고 있음을 의미한다.

개구부 보강에 따른 내력과 관련하여 AIJ식에서는 수직 보강에 대한 효과는 고려하고 있지만 수평 보강에 대한 효과를 고려하지 못하고 있으며, 보강근의 전단 내력 기여도는 $V_s \propto \sqrt{\rho}$ 인 관계를 적용하고 있다. 수평 보강근의 효과를 고려하기 위하여 그림 6에 표 6~8실험체중 전단 경간비가 0.53~1.25인 깊은 보 중 수직 보강만 된 실험체, 수직+수평 조합으로 보강된 실험체에 대하여 철근비에 따른 보강근의 기여도를 나타내었다. 가로축의 철근비 항에서 수직보강과 수평 보강이 조합된 실험체에 대한 철근비는 앞서 평가한 보강방법에 따른 내력 기여도를 고려하여 $0.68\rho_h + \rho_v$ 를 적용하였다.

철근비와 보강근의 전단 내력의 관계에 대하여 추세식을 적용한 결과 다음과 같은 관계가 성립함을 확인 할 수 있다.

$$V_s \propto \rho^{0.47} \quad (7)$$

수평 보강과 수직 보강에 따른 전단 내력의 기여도 평가와 철근비와 내력과의 관계를 통하여 다음과 같은 수정 내력식을 제안한다.

$$Q_{mean} = \left\{ \frac{0.12k_u k_p (F+18)}{\frac{M}{Qd} + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 [(\rho' + 0.68\rho_h)\sigma_y]^{0.47} \right\} bj \quad (8)$$

여기서, $\rho' = \sum a_s (\sin \theta + \cos \theta) / bc$ (수직 및 45°대각 보강철근비) $\rho_h = \sum a_s / bd$ ($\theta = 0$)이다.

표 6 실험체 상세 및 전단 내력 비교(수직 보강 실험체)
(清水 泰 등, 1983; 東洋一 등, 1983; Kong 등, 1977; Kong 등, 1978; Ashour 등, 2000)

No.	실험체명	D (mm)	d (mm)	a/d	b (mm)	H (mm)	주철근비	c (mm)	ρ_v	f_{ck} (MPa)	V_{exp} (kN)	V_{AIJ} (kN)	V_{M-AIJ}	V_{exp}/V_{AIJ}	V_{exp}/V_{M-AIJ}
1	D-E-S	625	575	1.15	120	176.8	0.0066	282.5	0.0059	24.7	139.2	148.2	141.8	0.94	0.98
2	D-I-S	625	575	1.15	120	176.8	0.0066	282.5	0.0059	25.5	187.2	149.5	143.2	1.25	1.31
3	D-E-L	625	575	1.15	120	353.6	0.0066	282.5	0.0059	28.1	85.3	90.1	83.7	0.95	1.02
4	D-I-L	625	575	1.15	120	353.6	0.0066	282.5	0.0059	26.2	80.9	89.6	83.2	0.90	0.97
5	AV	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.006	23.8	291.9	254.1	248.6	1.15	1.17
6	BV	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.006	23.8	312.3	254.1	248.6	1.23	1.26
7	AV100	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0276	23.8	408.6	430.4	391.7	0.91	1.04
8	BV100	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0348	23.8	435.8	470.2	423.8	0.93	1.03
9	80-No.3	700	650	0.77	200	230	0.0075	320	0.0101	25.2	333.2	372.7	351.0	0.89	0.95
10	80-No.5	700	650	0.77	200	230	0.0075	320	0.0213	25.2	457.7	464.0	426.6	0.99	1.07
11	80-No.7	700	650	0.77	200	230	0.0075	320	0.0184	25.2	458.6	443.3	409.6	1.03	1.12
12	82-No.2	700	650	0.77	200	140	0.0075	320	0.0126	25.2	464.5	471.5	445.8	0.99	1.04
13	82-No.4	700	650	0.77	200	140	0.0075	320	0.0271	25.2	479.2	576.6	532.4	0.83	0.90
14	NW7-0.3/4	750	700	0.46	100	270	0.009	162.5	0.0113	42.9	360.0	345.6	336.1	1.04	1.07
15	W7-0.3/4	750	700	0.46	100	270	0.009	162.5	0.0113	33.0	315.0	315.2	305.7	1.00	1.03
* D : 보 길이, d : 유효깊이, b : 보폭, H : 개구부 지름(원형 환산), c : 개구부 유효범위, ρ_v : 수직 철근비													average	1.00	1.06
f_{ck} : 콘크리트 강도, V_{exp} : 실험 내력, V_{AIJ} : 기존식에 의한 내력, V_{M-AIJ} : 수정식에 의한 내력													St.D	0.12	0.10

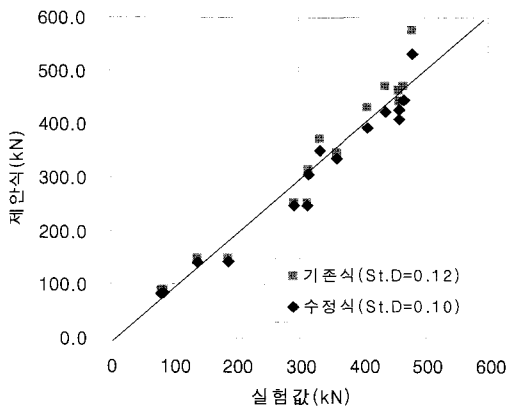


그림 7 수직보강 실험체의 전단 내력 비교

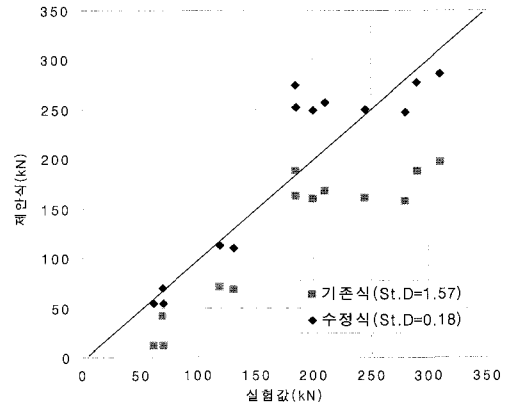


그림 8 수평보강 실험체의 전단 내력 비교

3.2 수정 제안식의 검토

수정 내력식의 효용성을 검토하기 위하여 식 (7)에서 제안한 내력식을 바탕으로 보강 방법을 달리하는 실험체들에 대하여 적용하여 실험값과 비교하였다. 여기에서 편차는 제안식과 실험값에 대한 상대편차이다.

3.2.1 수직 보강 실험체

개구부가 있는 깊은 보에서 수직 철근으로만 보강이 된 2경간 실험체 및 단순경간 실험체에 대하여 내력을 평가하였다. 선행 연구자들의 연구 결과 중 전단 경간비가 0.77~1.25인 15개의 실험 결과를 바탕으로 AIJ에서 제안하는 값과 식 7에서 제안한 수정식을 적용한 내력값을 비교하였으

며, 그 결과를 표 6과 그림 7에 나타내었다.(연속 경간 실험체 : 8개(Ashour et al.), 단순 경간 실험체 : 7개(清水 泰 et al. Kong et al.)) 기존식의 경우 평균이 1.00, 표준편차가 0.12를 나타내었으며, 수정식의 경우 평균이 1.06, 표준편차가 0.11을 나타내었다. 하지만 그래프에서 볼 수 있듯이 기존식에 비하여 수정식이 내력에 있어 다소 안전측으로 제시하고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 수평 보강 실험체

수정 내력식을 바탕으로 개구부가 있는 깊은 보에서 수평 철근으로만 보강 된 2경간 실험체 및 단순경간 실험체에 대하여 내력을 평가하였다. 표 7에는 해당 실험체 상세와 전단 내력값을 나타내었으며, 그림 8에 기존 내력식에 의한 내력,

표 7 실험체 상세 및 전단 내력 비교(수평보강 실험체)(양창진 등, 1999; Kong 등, 1977; Kong 등, 1978; Ashour 등, 2000)

No.	실험체	D (mm)	d (mm)	a/d	b (mm)	H (mm)	주철근비	ρ_h	f_{ck} (MPa)	V_{exp} (kN)	V_{AJ} (kN)	V_{M-AJ} (kN)	V_{exp}/V_{AJ}	V_{exp}/V_{M-AJ}
1	NW1-0.3/4	750	700	0.46	100	270	0.009	0.0119	36.8	210.0	167.1	256.5	1.26	0.82
2	NW2-0.3/4	750	700	0.46	100	270	0.009	0.0119	43.4	290.0	187.4	276.8	1.55	1.05
3	NW3-0.3/4	750	700	0.46	100	270	0.009	0.0119	46.2	310.0	196.0	285.4	1.58	1.09
4	NW5-0.3/4	750	700	0.46	100	270	0.009	0.0111	43.5	185.0	187.7	274.2	0.99	0.67
5	W1-0.3/4	7500	700	0.46	100	270	0.009	0.0119	34.2	200.0	159.2	248.5	1.26	0.80
6	W1-0.3/4	750	700	0.46	100	270	0.009	0.0119	34.6	245.0	160.4	249.7	1.53	0.98
7	W1-0.3/4	750	700	0.46	100	270	0.009	0.0119	33.7	280.0	157.6	247.0	1.78	1.13
8	W1-0.3/4	750	700	0.46	100	270	0.009	0.0119	35.3	185.0	162.5	251.9	1.14	0.73
9	C-E-S	625	575	1.15	120	176.8	0.0066	0.0029	24.7	119.1	70.6	113.2	1.69	1.05
10	C-I-S	625	575	1.15	120	176.8	0.0066	0.0029	22.9	130.8	67.6	110.2	1.94	1.19
11	C-E-L	625	575	1.15	120	353.6	0.0066	0.0029	25	70.6	11.6	54.3	6.07	1.30
12	C-I-L	625	575	1.15	120	353.6	0.0066	0.0029	23.9	61.7	11.3	54.0	5.45	1.14
13	ODG	400	360	1.11	120	134.5	0.0179	0.0033	18.8	69.1	41.6	69.5	1.66	0.99
* D : 보 깊이, d : 유효깊이, b : 보폭, H : 개구부 지름(원형 환산), c : 개구부 유효범위, ρ_h : 수평 철근비, f_{ck} : 콘크리트 강도, V_{exp} : 실험 내력, V_{AJ} : 기존식에 의한 내력, V_{M-AJ} : 수정식에 의한 내력												average	2.14	1.00
												St.D	1.57	0.18

표 8 시험체 상세 및 전단 내력 비교(수직+수평보강 실험체)(김자영 등, 2003; 이진섭 등, 2001; 清水 泰 등, 1983; Ashour 등, 2000)

No.	실험체	D (mm)	d (mm)	a/d	b (mm)	H (mm)	주철근비	c (mm)	ρ_h	ρ_v	f_{ck} (MPa)	V_{exp}	V_{AJ}	V_{M-AJ}	V_{exp}/V_{AJ}	V_{exp}/V_{M-AJ}	
1	A-E-S	625	575	1.15	120	176.8	0.0066	282.5	0.0031	0.0089	26.5	155.8	168.9	176.4	0.92	0.88	
2	A-I-S	625	575	1.15	120	176.8	0.0066	282.5	0.0031	0.0089	20.8	144.1	159.4	166.9	0.90	0.86	
3	A-E-L	625	575	1.15	120	353.6	0.0066	282.5	0.0031	0.0089	29.8	101.4	108.3	115.7	0.94	0.88	
4	A-I-L	625	575	1.15	120	353.6	0.0066	282.5	0.0031	0.0089	26.1	78.9	107.3	114.7	0.74	0.69	
5	B-E-S	625	575	1.15	120	176.8	0.0066	282.5	0.0015	0.0059	26.4	152.4	151.0	155.1	1.01	0.98	
6	B-I-S	625	575	1.15	120	176.8	0.0066	282.5	0.0015	0.0059	26.1	192.6	150.5	154.6	1.28	1.25	
7	B-E-L	625	575	1.15	120	353.6	0.0066	282.5	0.0015	0.0059	26.9	87.2	89.8	93.8	0.97	0.93	
8	B-I-L	625	575	1.15	120	353.6	0.0066	282.5	0.0015	0.0059	25.3	73.0	89.3	93.4	0.82	0.78	
9	5-N	600	575	0.53	160	234.3	0.0094	150	0.0049	0.0053	57.8	392.0	340.3	381.1	1.15	1.03	
10	AV0	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0122	0.006	23.8	368.6	254.1	361.6	1.45	1.02	
11	AV25	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0092	0.006	23.8	380.6	313.2	369.5	1.22	1.03	
12	AV50	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0061	0.006	23.8	383.7	358.5	377.1	1.07	1.02	
13	AV75	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0031	0.006	23.8	384.1	396.6	384.5	0.97	1.00	
14	BV0	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0163	0.006	23.8	360.9	254.1	388.2	1.42	0.93	
15	BV25	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0122	0.0072	23.8	389.7	329.3	397.6	1.18	0.98	
16	BV50	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0081	0.0144	23.8	415.1	384.5	406.6	1.08	1.02	
17	BV75	1000	882	1.25	150	300	0.0056	470	0.0041	0.0216	23.8	425.0	430.3	415.3	0.99	1.02	
18	ZMB1-0	500	460	0.87	100	141.4	0.0125	200	0.0033	0.0072	24.5	237.9	152.1	169.6	1.56	1.40	
19	ZMB1-1	500	460	0.87	100	141.4	0.0125	200	0.0147	0.0320	24.5	246.0	197.8	212.8	1.24	1.16	
20	VMB1-2	500	460	0.87	100	141.4	0.0125	200	0.0263	0.0572	24.5	238.1	236.5	251.9	1.01	0.95	
21	ZNB1-0	500	460	0.87	100	141.4	0.0125	200	0.0033	0.0072	24.5	239.6	152.1	169.6	1.58	1.41	
22	ZNB1-1	500	460	0.87	100	141.4	0.0125	200	0.0180	0.0391	24.5	259.2	209.8	224.9	1.24	1.15	
23	VNB1-2	500	460	0.87	100	141.4	0.0125	200	0.0322	0.0699	24.5	270.0	253.0	268.4	1.07	1.01	
24	82-No.3	700	650	0.77	200	140	0.0075	320	0.0021	0.0169	25.2	456.7	507.1	491.7	0.90	0.93	
25	82-No.6	700	650	0.77	200	100	0.0075	320	0.0021	0.0169	25.0	459.6	539.2	523.8	0.85	0.88	
* D : 보 깊이, d : 유효깊이, b : 보폭, H : 개구부 지름(원형 환산), c : 개구부 유효범위, ρ_h : 수평 철근비, ρ_v : 수직 철근비, f_{ck} : 콘크리트 강도, V_{exp} : 실험 내력, V_{AJ} : 기존식에 의한 내력, V_{M-AJ} : 수정식에 의한 내력															average	1.10	1.00
															St.D	0.22	0.16

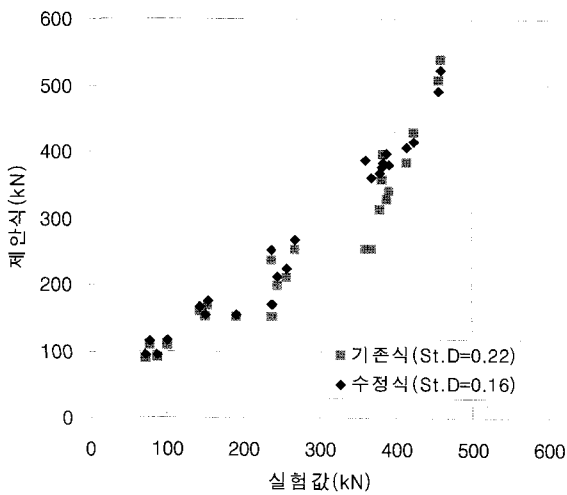


그림 9 수직+수평보강 실험체의 전단 내력 비교

수정 내력식에 의한 내력에 대하여 각각 실험값과 비교하여 나타내었다.

비교 결과 Kong의 실험체 중 NW1-0.3/4, NW5-0.3/4, W1-0.3/4, W5-0.3/4의 경우 실험값에 대해 67%~82%의 범위로 나타나는데, 이는 보강 방법에 있어 개구부를 중심으로 개구부 하부에만 집중적으로 보강을 한 경우와 전단 경간에 걸쳐 수평 보강이 되지 않고 개구부 주변만을 보강한 경우로서, 본 수정식을 적용함에 있어 수평 보강의 경우 전단 경간에 걸쳐 완전 정착이 된 경우로 제한할 필요가 있다.

3.2.3 수직+수평 보강 실험체

표 8 에는 수직 및 수평의 조합으로 보강된 실험체 상세와 전단 내력을 비교하여 나타내었다.

해당 실험체는 전단경간비가 0.53~1.25인 연속경간 실험체와 단순 경간 실험체를 포함하고 있으며, 그림 9에 각각의 실험체에 대하여 실험값과 내력값을 비교하여 나타내었다. 수직, 수평의 조합으로 개구부 주변이 보강된 실험체에 대해 기존 내력식의 경우 평균 1.10, 표준편차 0.22의 값을 나타낸 반면 수정내력식의 경우 평균 1.00, 표준편차 0.16의 값을 나타내고 있어 수정 내력식이 개구부가 있는 춤이 큰 보의 내력 평가에 적절함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 개구부가 있는 RC 깊은 보에 대하여 개구부 보강방법에 따른 거동을 유한요소해석 프로그램인 Total-RC를 사용하여 해석적으로 평가하고, AIJ 및 CIRIA Guide 2에서 제안하는 규준식과 비교하였으며, 최종적으로 AIJ 제안식에서 수평보강근의 효과를 고려한 수정 내력식을 제안하

였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개구부 보강에 따른 내력 평가를 위하여 연속경간 깊은 보를 대상으로 보강 변수를 적용하여 해석적으로 검증한 결과 개구부의 위치에 관계없이 수직 보강이 수평 보강보다 효과적이다.

2) 개구부가 있는 깊은 보의 내력식을 제안하고 있는 CIRIA Guide 2와 AIJ 내력식에 대하여 해석결과와 비교한 결과 CIRIA Guide 2의 제안식은 수직 철근이 증가함에 따라 내력을 과대평가 하고 있으며, AIJ 내력식의 경우 수직 철근만 배근된 실험체에 대해 비교적 근사한 값을 나타내고 있으나 수평근의 효과를 반영하지 못하고 있어 해석값과의 차이를 보이고 있다.

3) 무보강 실험체와 보강이 이루어진 실험체를 대상으로 보강에 의한 순수 내력 기여도를 고려할 수 있으며, 이를 통하여 수평 보강에 따른 감소계수 ($\alpha_{mean}=0.68$)를 도출할 수 있었다. 또한 보강에 따른 내력 기여도 평가를 위하여 철근 비와 내력의 관계를 비교한 결과 $V_s \propto \rho^{0.47}$ 과 같은 관계를 나타내었다.

4) 보강 방법에 따른 내력 기여도와 철근비에 따른 내력 비교를 통하여 다음과 같은 수정 내력식을 제안한다.

$$Q_{mean} = \left\{ \frac{0.12k_u k_p (F+18)}{\frac{M}{Qd} + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 [(\rho' + 0.68\rho_h)\sigma_y]^{0.47} \right\} bj$$

수정 제안식의 효용성 검토를 위하여 수직 보강, 수평 보강, 수직+수평 조합 보강을 한 깊은 보 실험체를 대상으로 적용한 결과 각각 평균 1.06, 표준편차 0.10, 평균 1.00, 표준편차 0.18, 평균 1.00, 표준편차 0.16을 나타내어 개구부 수직·수평 보강근의 상대 비율에 상관없이 깊은 보의 전단 내력 평가에 적용할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 김자영, 김광두, 양근혁, 정현수 (2003) 개구부 보강철근의 배근방법이 고강도 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동에 미치는 영향, 대한건축학회 학술발표회 논문집, 23(2), pp.63~66.
- 양창진, 안상호 (1999) 춤이 큰 유공보의 전단파괴거동에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 15(9), pp.3~10.
- 은희창, 양근혁, 정현수 (2003) 장방형 개구부를 갖는 고강도 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동, 대한건축학회논문집,

- 19(8), pp.35~42.
- 이은진, 김옥중, 문정호, 이리형** (2002) 단부 철근콘크리트 중앙부 철골조로 이루어진 혼합구조보의 비선형 이력거동, 한국전산구조공학회 논문집, pp.379~387.
- 이종권, 이용택, 황홍순, 이리형** (2003) 철근 콘크리트 연속 유공 깊은 보의 전단내력에 관한 실험연구, 한국구조물진단학회 춘계 학술발표회 논문집, 7(1), pp.223~228.
- 이진섭, 김상식** (2001) 개구부를 갖는 철근 콘크리트 깊은 보의 전단거동, 한국콘크리트학회 논문집, 13(6), pp.619~628.
- 한국 콘크리트 학회** (2003) 콘크리트 구조설계 기준 해설.
- 清水 泰, 東 洋一, 遠藤 利根穂** (1983) 鐵筋コンクリート造有孔梁のせん断力に関する實驗研究, 第5回コンクリート工學年次講演會講演論文集, pp.361~364.
- 東 洋一, 遠藤 利根穂, 清水 泰, 日向 俊二** (1983) 鐵筋コンクリート造有孔梁のせん断補強方法に関する實驗研究, 第5回コンクリート工學年次講演會講演論文集, pp.245~248.
- 日本建築學會** (1999) 「鐵筋コンクリート構造計算規準・同解説」
- ACI Committee 318-02** (2002) Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute.
- Ashraf F. Ashour, G. Rishi** (2000) Tests of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams with Web openings, *ACI Structural Journal*, 97(3), pp.418~426.
- CIRIA, CIRIA Goide 2** (1977) The Design of Deep Beams in Reinforced Concrete. Ove Arup and Partners, Construction Industry Research and Information Association, London.
- F. K. Kong, G. R Sharp** (1977) Structural idealization for deep beams with web openings, *Magazine of Concrete Research*, 29(99), pp.81~91.
- F. K. Kong, G. R Sharp** (1978) Structural idealization for deep beams with web openings Further Evidence, *Magazine of Concrete Research*, 30(103), pp.89~95.