

R/C조 외측 보-기둥 접합부의 정착설계에 대한 해석적 연구

An Analytical Study on the Anchorage Design in Exterior R/C Beam-Column Connections

최 기 봉*
Choi, Ki-Bong

요 약

외측 보-기둥 접합부에 정착된 곧은 보 주철근의 인발거동을 예견하기 위한 해석모델이 개발되었다. 이 모델은 외측조인트에 수직방향으로 콘크리트를 구속하기 위하여 횡방향 철근을 배치한 상태의 구속조건(confined condition)하에서 이형철근의 부착특성에 관한 정착철근의 직경, 콘크리트 압축강도, 항복강도, 철근간격 및 주압력(column pressure)에 대한 영향을 고려할 수 있는 국부부착에 관한 시뮬레이션을 구체화하였다.

이 연구에서 채택된 해석 기법은 횡방향 철근이 배근된 공시체에 매입한 곧은 이형철근에 대한 인발실험의 결과를 만족하게 예견하였다. ACI-ASCE 352 위원회가 제안하고 있는 외측조인트 상태에서의 정착철근길이에 관한 규정이 개발된 해석접근법을 사용해 평가 되었다. 이 해석 평가의 결과는 현재의 외측조인트의 구속조건에서의 정착길이에 대한 규정이 너무 안정적인 측면에 있다는 것을 암시하고 있다.

Abstract

An analytical model was developed for predicting the pullout behavior of straight beam longitudinal bars anchored at exterior beam-column connections. The model incorporates a local bond constitutive simulation capable of considering the effects of anchored bar diameter, yield strength and the spacing, concrete compressive strength, and column pressure on the bond characteristics of deformed bars in confined conditions of exterior joints. The analytical techniques adopted in this study were shown to satisfactorily predict the results of pullout tests on straight bars embedded in confined concrete specimens. An evaluation of the ACI-ASCE Committee 352 development length requirements in exterior joint conditions was made using the developed analytical approach. The results of this analytical evaluation are indicative of the conservatism of the current development length requirements in the confined conditions of exterior joints.

* 정희원, 경원대학교 토목공학과 조교수

이논문에 대한 토론을 1993년 3월 31일까지 본학회에 보내 주시면 1993년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 보-기둥 접합부가 재하되면, 외측기둥과 보의 접합부에 상대적으로 큰 휨모멘트가 그림1a(보 AB의 끝 A부분)와 같이 나타나게 된다. 이러한 치명적인 보부분에 충분한 휨강도를 주기 위해서 접합부 안쪽의 보 주철근을 완전하게 부착하여야 한다. 보 주철근이 접합부 안쪽에 완전히 부착된다면, 외측접합부의 위험영역(critical region) 안에서 철근이 항복할 때까지 활동(slip)하는 일 없이 그 기능을 발휘하여 부착 파괴를 피할 수 있다. 그러므로, R/C조의 보-기둥 접합부에서의 보강철근의 정착은 R/C구조물의 연속성 및 안전성에 대한 설계를 위해 매우 신중히 고려해야 한다. 이러한 정착을 위해 일반적으로 외측접합부에 곧은 이형철근이나 표준 후크를 사용한다(그림 1b, 1c). 본고에서는 정하중 하에서 외측조인트 안쪽에서 종결되는 곧은 이형철근의 정착에 관한 현재의 정착설계식을 해석적으로 평가하여 설계절차를 좀더 개선하는데 주안점을 두었으며 이를 위해 ACI-ASCE 352 위원회가 제시한 규정(1)을 사용하였다.

ACI-ASCE 352 위원회는 외측조인트에서 Type 1인 경우에 기둥의 외측면으로부터 #11 이하의 곧은 철근에 대한 기본정착길이를 아래 식(1)과 같이 제시하고 있으며(그림 2) 상부철근 및 소요 값을 초과하여 제공된 철근면적을 갖는 상황에 대해 수정계수를 곱하도록 규정하고 있다.

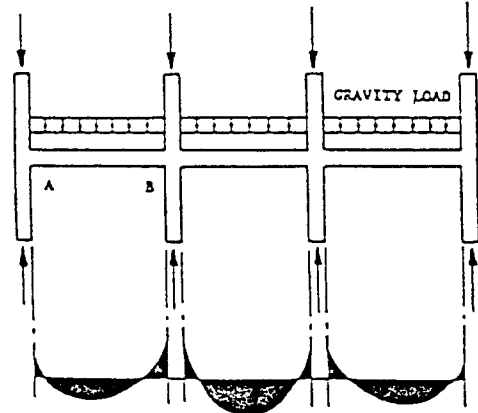
$$L_d = \frac{f_y(\text{psi}) A_b(\text{in}^2)}{25 \sqrt{f'_c}(\text{psi})} \quad (1)$$

$$\geq 0.004 d_b(\text{in.}) f_y(\text{psi})$$

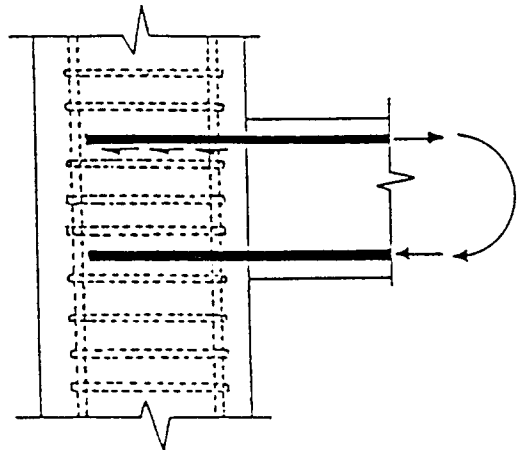
$$L_d = \frac{f_y(\text{MPa}) A_b(\text{mm}^2)}{52.7 \sqrt{f'_c}(\text{MPa})}$$

$$\geq 0.058 d_b(\text{mm}) f_y(\text{MPa})$$

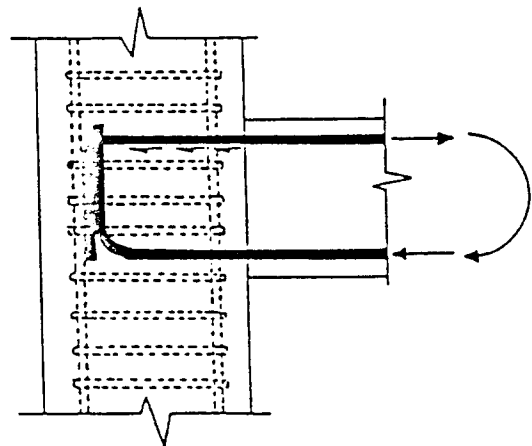
여기서 L_d =철근의 기본정착길이
 f_y =철근의 항복강도
 A_b =철근의 단면적
 f'_c =콘크리트의 압축강도
 d_b =철근의 단면적



(a) 휨모멘트



(b) 곧은철근의 정착



(c) 후크철근의 정착

그림 1. R/C조 외측 보-기둥 접합부의 보-보강근의 정착

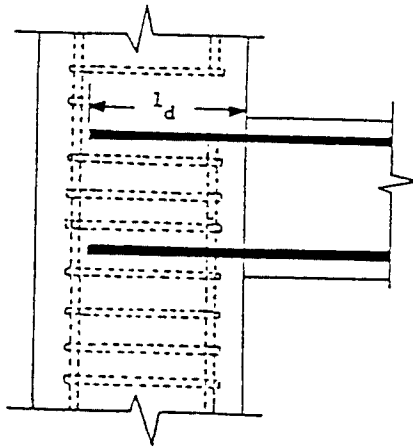


그림 2. 정착길이의 정의

2. 해석모델 및 알고리즘 개발

곧은 이형철근의 정착거동을 이상화하기 위하여 다음과 같은 일차원모델을 사용하였다(그림 3). 이 모델의 분리된 각각의 스프링들은 분리된 미세부분의 이형철근과 콘크리트사이의 부착저항(bond resistance)을 나타낸다. 그림 3의 일차원모델에서 정착 철근의 거동에 관한 콘크리트의 변형율은 무시한다고 가정하였고(2), 스프링들은 콘크리트에 그 끝이 고정되었다고 가정한다. 정착철근 모델의 탄젠트강성행렬(tangent stiffness matrix)은 구성요소인 철근 및 국부부착 사이의 상관관계를 사용하여 작성되며, 부착의 탄젠트강성(\$K_{bi}\$)와 철근의 탄젠트강성(\$K_{fi}\$)은 이러한 구성요소의 수학적 상관관계를 사용하여 유도될 수 있다. 그림 3에서의 스프링강성(\$K_{bi}\$) 및 철근 분절의 강성(\$K_{fi}\$)은 하중이력/loading history)의 각 단계에서 다음과 같이 구해진다:

$$K_{bi} = K_{fi}(\pi d_b) l_i \tag{2}$$

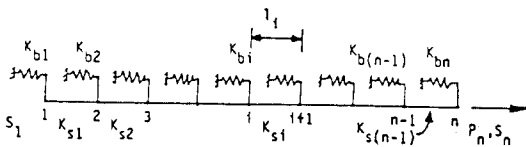


그림 3. 제안된 정착철근의 일차원모델

$$K_{si} = K_{fi}(\pi d_b^2/4) l_i \tag{3}$$

여기서 \$d_b\$=철근의 직경

\$l_i\$=i번째 철근마디의 길이(그림 3)

\$K_{fi}\$=부착 탄젠트강성(bond tangent stiffness)

\$K_{fi}\$=철근 탄젠트강성(steel tangent stiffness)

\$K_{si}\$=스프링의 강성

\$K_{bi}\$=철근 분절의 강성

이러한 철근분절과 스프링의 탄젠트강성들을 사용하여 그림 3에서 보여준 n-자유도를 갖는 이상화된 시스템의 전체 탄젠트강성행렬(\$K_T\$)은 다음과 같다.

$$K_T = \begin{bmatrix} K_{s1}+K_{b1} & -K_{b1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -K_{b1} & K_{s2}+K_{b1}+K_{b2} & -K_{b2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_{b2} & K_{s3}+K_{b2}+K_{b3} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -K_{b(n-2)} & K_{b(n-1)}+K_{s(n-2)}+K_{b(n-1)} & -K_{b(n-1)} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -K_{b(n-1)} & K_{s(n)}+K_{b(n-1)} \end{bmatrix} \tag{4}$$

식(4)는 증분단력, \$dP_n\$(incremental end force)으로 부터 철근길이에 따른 증분미끄럼값(\$ds_1, ds_2, \dots, ds_n\$)을 산출하기 위해 사용되며 이 관계를 식으로 표시하면 아래의 식(5), (6)과 같이 표현된다:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ dP_n \end{bmatrix} = K_T \begin{bmatrix} ds_1 \\ ds_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ ds_{n-1} \\ ds_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

\$F=K_T^{-1}\$으로 가정하면,

$$\begin{bmatrix} ds_1 \\ ds_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ ds_{n-1} \\ ds_n \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ dP_n \end{bmatrix} \tag{6}$$

식(6)으로부터 다음과 같은 관계식이 결정된다:

$$ds_1 = f_{1,n} dP_n \quad (7)$$

$$ds_n = f_{n,n} dP_n \quad (8)$$

여기서 f_{ij} = 역행렬 F 의 i 번째 열과 j 번째 행의 요소

일반적으로 인발실험에 있어서 단부미끄럼의 증분값(ds_n)은 정의되므로 이를 이용하여 식(7) 및 (8)로부터 다른쪽 단부에서의 미끄럼값(ds_1) 및 인발력(dP_n)을 구할 수 있다:

$$dP_n = ds_n / f_{n,n} \quad (9)$$

$$ds_1 = ds_n f_{1,n} / f_{n,n} \quad (10)$$

이와같은 관계로부터 아래의 해법 알고리즘이 정착철근의 인발거동을 해석하기위해 개발되었다.

(1) 앞의 하중단계에서의 미끄럼값과 부착 및 철근의 수학적법칙(식2-4)을 사용해 시스템의 전체 탄젠트강성행렬을 작성한다. 또한 이 탄젠트강성행렬로부터 역행렬 F 를 구한다.

(2) 주어진 ds_n 및 식(9), (10)로부터 dP_n 및 ds_1 을 구한다.

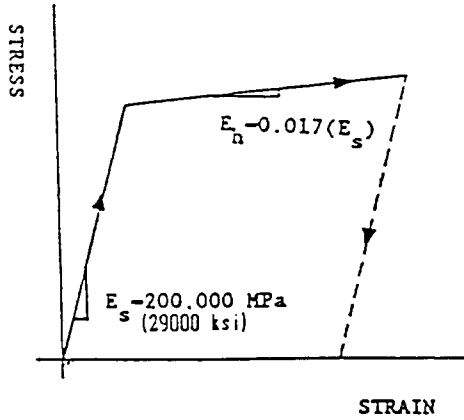
(3) 식(6)을 사용하여 철근의 길이에 따른 증분 미끄럼값을 모두 구한다.

위의 알고리즘을 마지막 하중이력의 최종하중단계까지 반복한다.

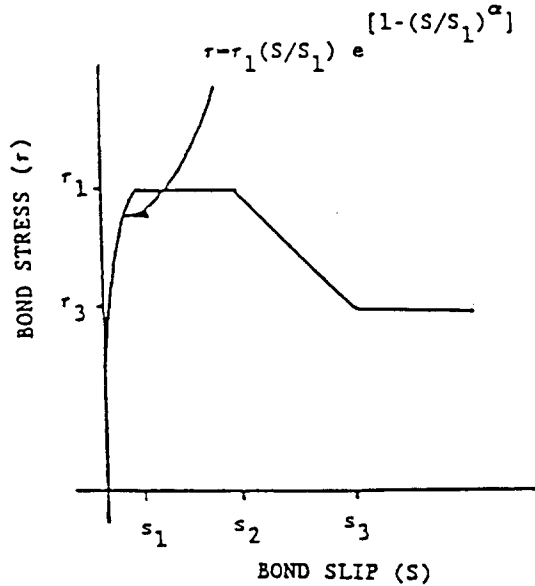
현재 이용가능한 다른 방법들(2,3,4)과는 달리 정착철근거동의 해석을 위한 이 알고리즘은 이차원 비선형방정식의 반복해석을 포함하지 않도록 개발 되었으므로 컴퓨터를 활용하는 해석시 매우 유용하다. 또한, 제안된 접근방법으로 완전한 구조물의 정적 및 동적 해석을 위해 컴퓨터 프로그램에 있어 일반적으로 사용되는 변위해석방법을 적용하여 R/C 보-기둥 접합부에서의 철근의 미끄럼 효과를 연구하기 위한 실제적이며 경제적인 tool을 연구자에게 제공한다.

3. 철근 및 국부부착 모델

정착철근의 강성행렬인 식(4)는 요소를 이루는



(a) 철근 변형-응력 모델



(b) 국부부착 응력-미끄럼모델

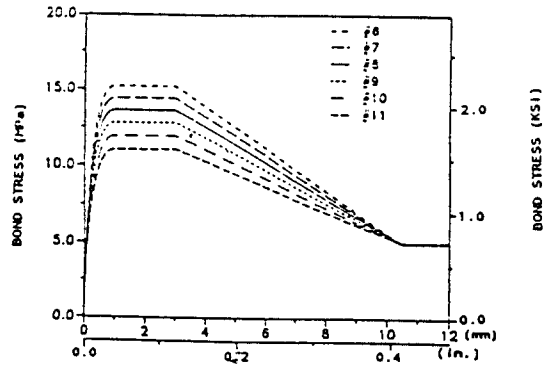
그림 4. 철근 및 국부부착모델

국부부착 및 철근 모델의 식으로 정의되어진다. 철근 응력-변형 모델은 변형경화율(strain hardening ratio) 1.7%를 갖는 bilinear로 가정(5)하였다(그림 4a). 본고에서 사용된 국부부착응력-미끄럼 모델의 전체적 형태가 그림 4b에 나타나 있다. 실험결과에 입각한 이모델의 부착응력 및 미끄럼 특성값들(s_1 , s_2 , s_3 , r_1 및 r_3)이 표1에 나타나 있다. 이 모델은 국부부착거동에 주요한 변수인 정착철근직경, 콘크리트 압강도, 철근간격,

표 1. 국부부착응력-활동 특성값

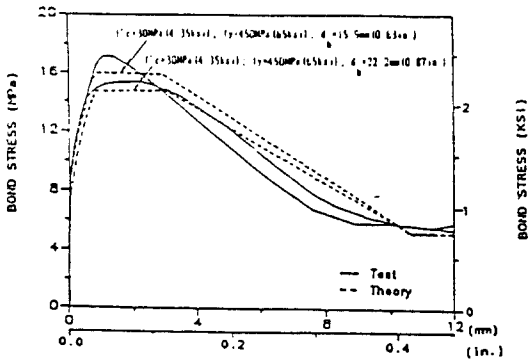
S_1 mm (in.)	S_2 mm (in.)	S_3 mm (in.)	τ_3 MPa (psi)	τ_1 MPa (psi)
1.0 (0.039)	3.0 (0.118)	10.5 (0.413)	5.0 (725)	$20 - \frac{d_b}{4} \sqrt{\frac{f_c}{30}}$ $(2900 - 921d_b) \sqrt{\frac{f_c}{4350}}$

주압력(column pressure)들의 영향을 고려하여 만들었다. 특히 정착철근의 직경 및 콘크리트 압축강도의 영향은 이 연구에서 수행한 실험결과에 바탕을 두었다. 그림 5는 콘크리트에 매입된

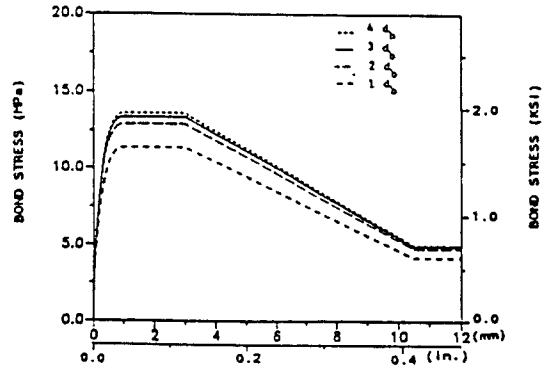


BOND SLIP
 $f'_c=30\text{MPa}(4.35\text{ksi})$; $f_y=450\text{MPa}(65\text{ksi})$

(a) 철근의 직경

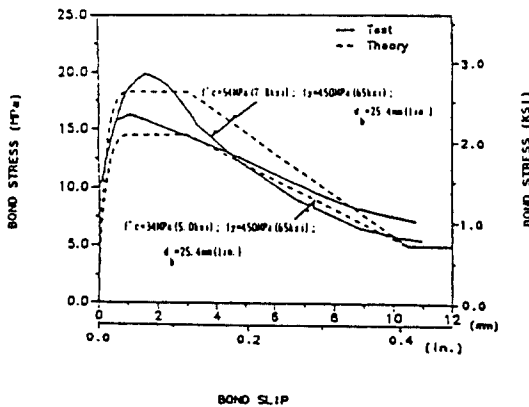


BOND SLIP
 (a) 참고문헌(3,6,7)

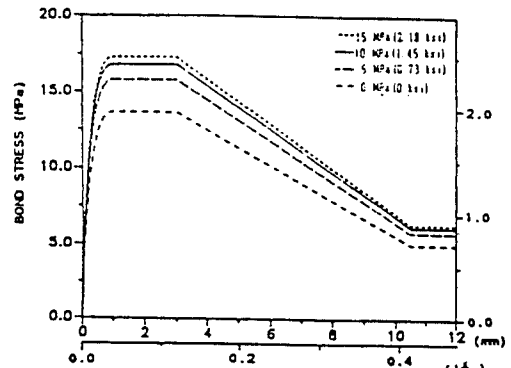


BOND SLIP
 $f'_c=30\text{MPa}(4.35\text{ksi})$; $f_y=450\text{MPa}(65\text{ksi})$

(b) 철근의 순간직



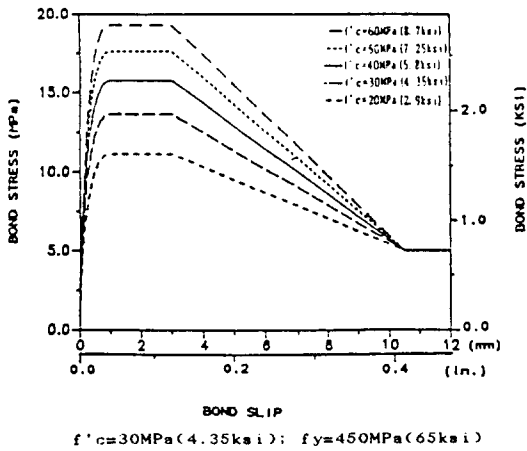
BOND SLIP
 (b) 참고문헌(3)



BOND SLIP
 $f'_c=30\text{MPa}(4.35\text{ksi})$; $f_y=450\text{MPa}(65\text{ksi})$

(c) 기둥의 축력(column pressure)

그림 5. 개발된 국부부착모델과 인발실험결과와의 비교



(d) 콘크리트의 압축강도

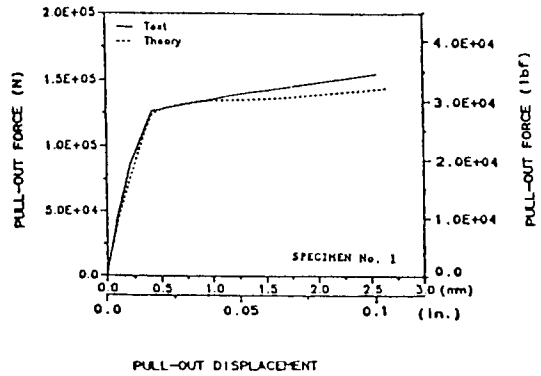
그림 6. 변수에 따른 국부부착거동의 변화

이형철근에 대해 필자(6.7)와 참고문헌(3)이 실시한 인발실험 결과들 중 하나와 개발된 부착모델을 비교하였다. 그림 6a-6d는 개발된 국부부착모델에 의해 예견된 국부부착거동에 대해 정착철근의 직경, 철근순간격, 콘크리트 압축강도, 주압력의 영향을 각각 보여준다. 이 연구에서 생성된 실험 결과에 따르면 기둥 주근이 부착할렬균열을 억제하는한 조인트영역에서의 변수인 기둥 횡보강철근은 국부부착특성값에 거의 영향을 주지 않는다.

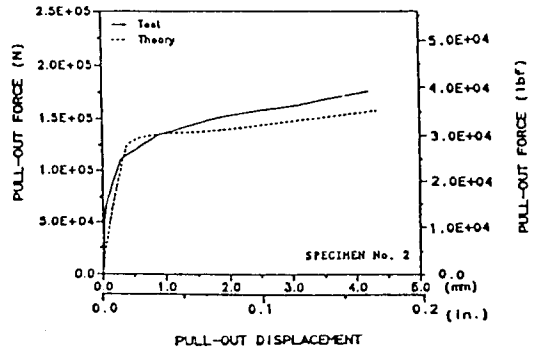
4. 정착철근의 실험결과와의 비교

곧은 매입철근의 해석 모델을 예견한 결과와 참고문헌(8)과 (9)에서 발표된 외측조인트에 정착된 곧은 이형철근에 관한 5개의 인발실험결과를

비교하였다. 표2는 해석접근의 증명에 사용된 5개의 실험공시체들에 대한 재료성질들을 나타낸다. 그림 7a-7e는 표2에 나타난 시험체 1-5까지를



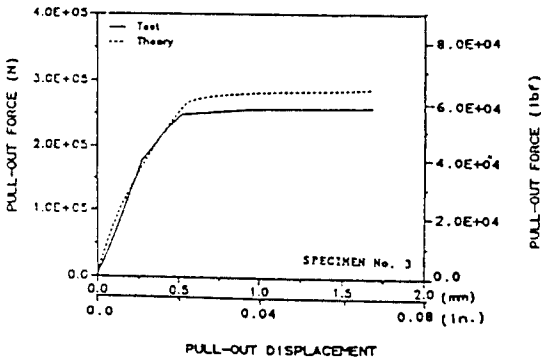
(a) 시험공시체 No.1-참고문헌(8)



(b) 시험공시체 No.2-참고문헌(8)

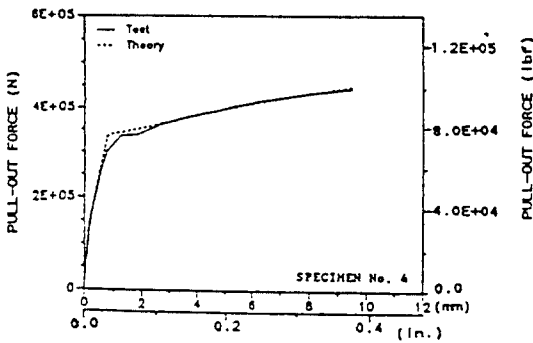
표 2. 시험체의 재료성질

No.	Ref.	Bar Dia. (mm)	Bar Yield Strength (MPa)	Concrete Compressive Strength (MPa)	Lug Geometry		
					Spacing (mm)	Height (mm)	Width (mm)
1	8	19.1	438.8	23.4	12.7	1.22	3.6
2	8	19.1	438.8	28.8	12.7	1.22	3.6
3	8	32.3	331.9	18.2	20.8	2.16	6.17
4	8	32.3	414.7	19.9	20.8	2.16	6.17
5	9	25.4	470.0	32.5	10.2	1.52	3.3



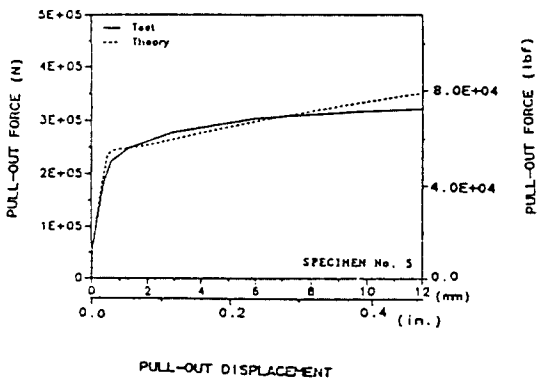
$f_y=331.9\text{MPa}(48.0\text{ksi})$; $f'_c=18.2\text{MPa}(2.6\text{ksi})$
 $l_d=609.6\text{mm}(24\text{in})$

(c) 시험공시체 No.3-참고문헌(8)



$f_y=414.7\text{MPa}(60.0\text{ksi})$; $f'_c=19.9\text{MPa}(2.9\text{ksi})$
 $l_d=609.6\text{mm}(24\text{in})$

(d) 시험공시체 No.4-참고문헌(8)



$f_y=470.0\text{MPa}(68.0\text{ksi})$; $f'_c=32.5\text{MPa}(4.7\text{ksi})$
 $l_d=635.0\text{mm}(25\text{in})$

(e) 시험공시체 No.5-참고문헌(9)

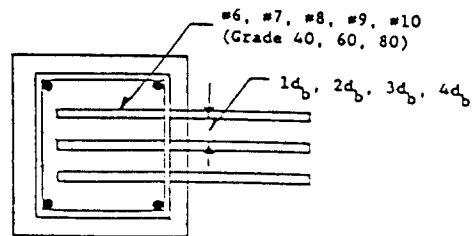
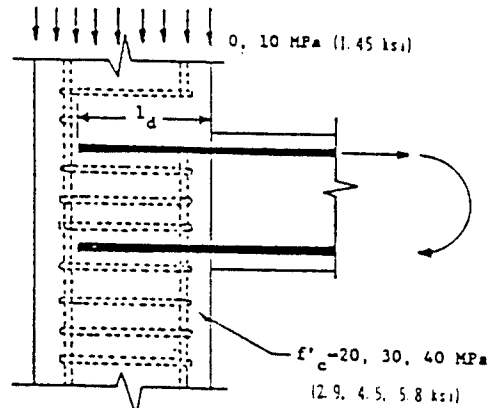
그림 7. 실험결과와 해석된 인발하중-변위 상관관계의 비교

해석적 및 실험적으로 비교한 것이며 채택된 모든 공시체에서 실험 및 해석결과 사이의 비교가 거의 일치하게 나타났다.

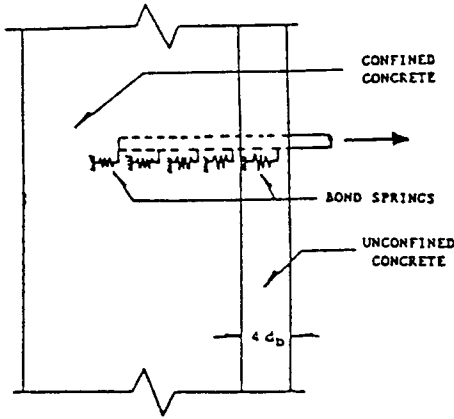
5. 정착길이식의 수치해석적 증명

개발된 해석모델이 ACI-ASCE 352 위원회의 정착길이규정인 식(1)을 증명하기 위해 사용되었다. 외부 보-기둥 접합부에 정착된 콘은 보 종방향철근의 인발거동(그림 8a)은 그림 8b에서 보여준 해석모델을 사용해서 연구되었다. 서로 다른 상태에서의 정착철근의 직경, 항복강도, 순간격, 콘크리트 압축강도 및 주압력이 고려되었다. 표3은 이 해석연구에서 고려된 100여개 이상의 정착조건을 포함하는 변수의 범위를 나타내며 각조건에서의 정착길이는 식(1)로부터 산출되었다.

매입길이를 변화시킴으로써 전정착길이에 해당하는 값아래로 극한강도 및 인성거동이 떨어지기 시작하는 정착길이의 범위를 결정하기 위해 식



(a) 실제상황 (Actual condition)



(b) 해석모델 (Analytical model)

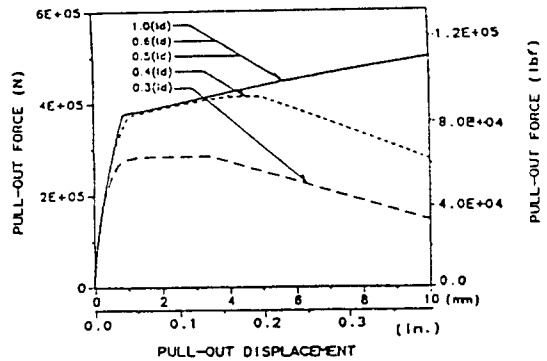
그림 8. 수치해석 연구에 사용된 정착철근

표 3. 수치해석 연구에서 사용된 변수의 범위

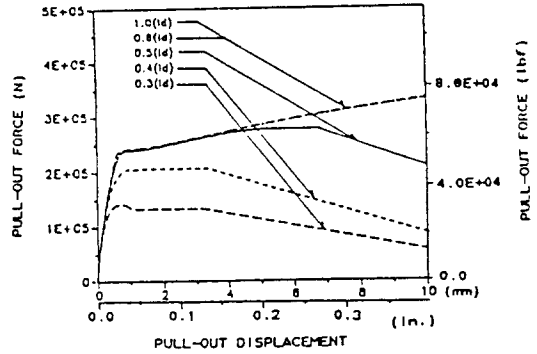
Bar diameter, mm (in.)	Bar yield strength, MPa (ksi)	Concrete compressive strength, MPa (ksi)	Bar clear spacing	Column pressure, MPa (ksi)
19-32 (0.75-1.26)	300-550 (44-80)	20-40 (2.9-5.8)	$1d_b-4d_b$	0-10 (0-1.45)

(1)에서 산출된 정착길이를 100%-30%까지 매입길이율(embedment length fraction)을 변화 시킴에 따라 정착된 철근에 대한 인발성능을 분석하였다. 이렇게 매입길이를 변화시킨 이유는 전정착길이가 제공된 모든 경우에서 항복에 따른 거동을 함으로써 바람직한 인발강도(pull-out strength)와 인성(ductility)을 줄 수 있는 실제적이며 경제적인 설계정착길이의 최소값을 찾는 데 있다. 그림 9a-9d는 무작위 표본추출로부터 선출된 4개의 상황에서 총 정착길이에 대한 매입길이의 변화에 따른 전형적인 인발하중-변위상관계를 보여준다.

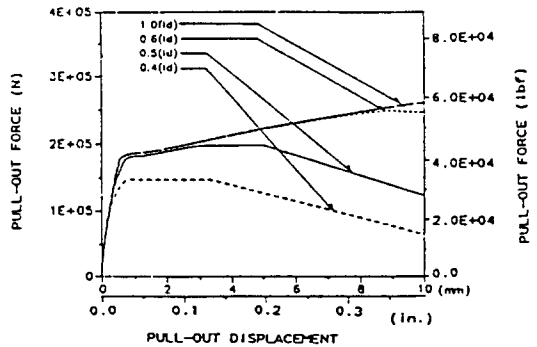
극한인발강도(ultimate pull-out strength), F_y 와 10mm 변위에서의 최고점후의 인발저항(post-peak pull-out resistance), F_p 가 각각 정착철근의 항복강도에 따른 인발강도와 인성을 나타내기 위해 그림 10a에서 처럼 정의되었다. 이로부터 그려진 그림 10b-10c는 외측접합부 안쪽의 매입길이를 ACI-ASCE 352 위원회가 제시한 값의 75% 정도로



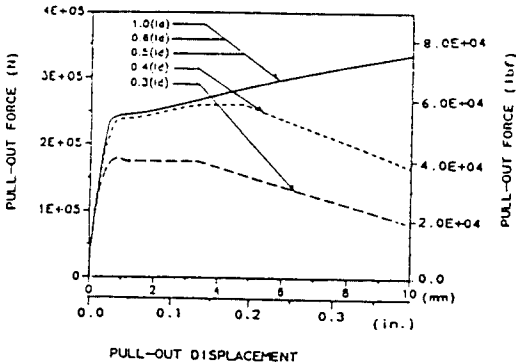
(a) $f'_c=30\text{MPa}$, $f_y=450\text{MPa}$, $d_b=32.3\text{mm}$, $C=1d_b$ 및 $P=0\text{MPa}$



(b) $f'_c=30\text{MPa}$, $f_y=450\text{MPa}$, $d_b=22.2\text{mm}$, $C=1d_b$ 및 $P=0\text{MPa}$



(c) $f'_c=40\text{MPa}$, $f_y=450\text{MPa}$, $d_b=25.4\text{mm}$, $C=1d_b$ 및 $P=0\text{MPa}$



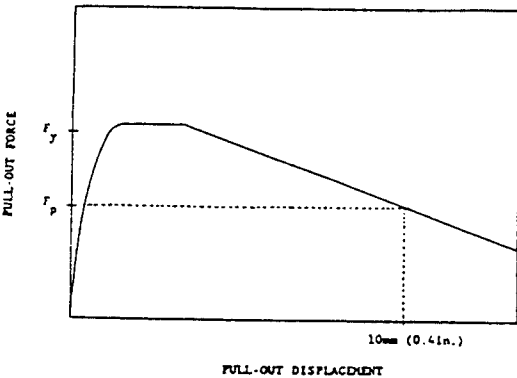
$f'_c=30 \text{ MPa}(4.35 \text{ ksi}); f_y=450 \text{ MPa}(65 \text{ ksi});$

$d_b=25.4 \text{ mm}(1.0 \text{ in.})$

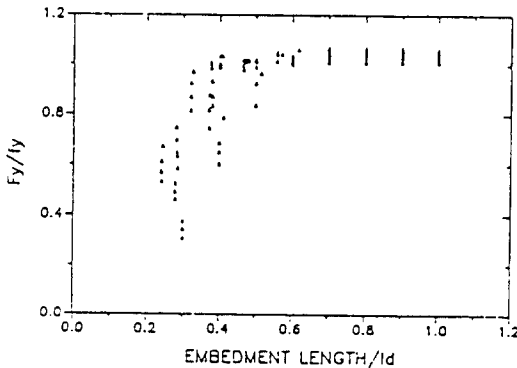
CHANGE OF BAR SPACING ($4d_b$)

(d) $f'_c=30\text{MPa}$, $f_y=450\text{MPa}$, $d_b=25.4\text{mm}$,
 $C=4d_b$ 및 $P=0\text{MPa}$

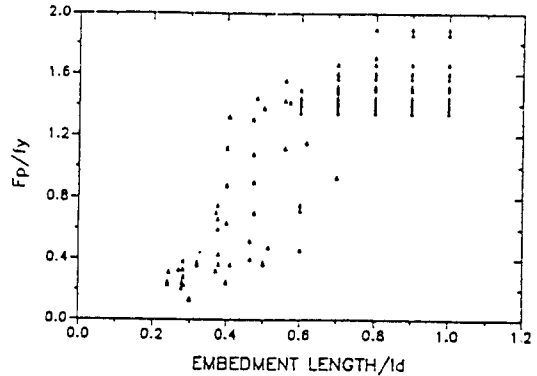
그림 9. ACI-ASCE 352 위원회가 규정한 정착길이의 매입율에 따른 인발하중-변위 상관관계의 해석



(a) F_y 및 F_p 의 정의



(b) F_y/f_y VS. 매입길이/정착길이



(c) F_p/f_y VS. 매입길이/정착길이

그림 10. 정착길이의 매입율에 따른 비탄성 초기 및 10mm-인발변위에서의 인발하중

하였을지라도 상대적으로 큰 인발변위(pull-out deformation)에서조차 정착철근이 완전한 항복강도를 발현하고 있음을 보여준다. 그러므로, 외측조인트의 상황에 적용되는 현재의 정착길이에 관한 ACI의 규정이 너무 안전한 측면에 쏠려 비경제적임을 알 수 있다.

6. 결 론

이 해석연구는 외측 보-기둥 접합부에 정착된 끝은 이형철근의 인발거동을 조사하기 위해 수행되었다. 개발된 부착철근 모델은 외측조인트의 구속 상태(confined condition)에서의 국부부착특성에 관한 철근직경, 철근순간격, 항복강도, 콘크리트 압축강도 및 주압력(column pressure)에 대한 영향을 잘 반영하고 있다. 이 해석모델은 콘파인드 콘크리트(confined concrete)에 매입된 끝은 이형철근에 관한 인발실험의 결과와 잘 일치하고 있으며 이러한 기법은 외측조인트에서의 끝은 철근의 정착을 위한 현재의 설계지침을 평가하기 위해 사용되었다. 이 연구로부터 외측접합부에서의 끝은 보철근(straight beam bar)의 정착에 대해 현재 제안되고 있는 규정들이 너무 안전성에 치우쳐 비경제적 측면에 있으므로 정착길이(development length)에 관한 현재의 규정들은 정착거동에 대한 강도 및 인성에 영향을 주지 않으면서도

감소할 여지가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 논문은 1990년 3월부터 1992년 2월 까지 한국 과학재단의 연구비 지원(903-1301-004-2 구조)에 의해 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures(ACI 352 R-85)," ACI Journal, Proceedings V.82, No. 23, May-June 1985, pp.266-283.
- [2] Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V.V., and Popov, E.P., "Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Loading Conditions," Report No. UCB/EERC-82/23, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Nov. 1982, 103 pp. Analytical Evaluation of Straight Bar Anchorage Design in Exterior Joints
- [3] Eligehausen, R., Popov, E.P., and Bertero, V.V., "Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations," Report No. UCB/EERC-83/23, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Oct. 1983, 169 pp.
- [4] Al-Mahaidi, R.H., "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members," A Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University in Partial Fullfillment for the Degree of Doctor of Philosophy, May 1978, 374 pp.
- [5] Soroushian, P., and Choi, Ki-Bong, "Steel Mechanical Properties at Different Strain Rates," J. of Structural Engineering, ASCE, V. 113, No.4, April 1987, pp.663-672.
- [6] Soroushian, P., and Choi, K.B., "Local Bond of Deformed Bars with Different Diameters in Confined Concrete," ACI Structural Journal, V.86, No.2, March-April 1989, pp.217-222.
- [7] 최기봉, "철근콘크리트 보-기둥 접합부의 부착거동에 대한 콘크리트강도 및 보강철근의 효과," 콘크리트학회지, 제3권 2호, 1991년 6월, pp. 115-121.
- [8] Ueda, T., Lim, I., and Hawkins, N.M., "Beam Bar Anchorage in Exterior Column-Beam Connections," ACI Journal, Proceedings V. 83, No.3, May-June 1986, pp.412-422.
- [9] Viwathanatepa, S., Popov, E.P., and Bertero, V.V., "Effects of Generalized Loadings on Bond of Reinforcing Bars Embedded in Confined Concrete Blocks," Report No. UCB/EERC-79/22, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Aug 1979, 293 pp.

(접수일자 : 1992. 11. 9)