

반복하중시 철근의 마디형태에 따른 부착특성

최완철^{1)*} · 이재열¹⁾ · 이웅세¹⁾

¹⁾ 숭실대학교 건축공학과

(2000년 12월 8일 원고접수, 2001년 4월 26일 심사완료)

Effects of Bar Deformation on Bond between Reinforcing Steel and Concrete Subjected to Cyclic Loading

Oan-Chul Choi^{1)*}, Jae-Yuel Lee¹⁾, and Woong-Se Lee¹⁾

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Soong-sil University, Seoul, 156-743, Korea

(Received on December 8, 2000, Revised on April 26, 2001)

ABSTRACT

One of the reasons for brittle failure in reinforced concrete structures subjected to severe earthquake is due to large slip between reinforcing steel and concrete. This study aims to evaluate effects of deformation patterns of ribbed reinforcing bars on bond under cyclic loading. Bond test specimens were constructed with machined bars to test the newly developed reinforcing bars with high relative rib areas. The degree of confinement is also another key parameter in this bond test. From the test results under monotonic and cyclic loading, bond strength and stiffness were evaluated. Bond strength and bond stiffness increase as relative rib areas under cyclic loading for specimens highly confined by transverse reinforcement. The increase rates of the bond performance under cyclic loading are larger than those of specimens under monotonic loading. The developed bars with high relative rib areas will contribute for better bond performance for reinforced concrete structures subjected to severe seismic loadings.

Keywords : bond, confinement, cyclic loading, deformation pattern, relative rib area

1. 서 론

부착에 대한 영향요인은 다수이지만 크게 철근과 콘크리트 사이의 계면 특성과 횡구속조건으로 나누어진다³⁾. 계면 특성에서 철근의 마디형태는 이형철근을 사용하면서부터 많은 연구가 되어왔으며, 마디형태에 대한 논란이 많았다. 철근콘크리트 구조에서 철근과 콘크리트 사이에 응력이 전달되어 일체화되기 위해서는 철근과 철근 주위의 콘크리트가 철근의 항복강도에 충분히 도달할 수 있을 정도까지 부착내력을 발휘하여야 한다. 따라서 철근과 콘크리트의 두 이질재료 사이의 부착 미끄러짐은 지진 하중시에 연성골조 구조물의 이력거동에 미치는 영향이 크다⁵⁾. 이러한 부착손상을 최대한 감소시키기 위한 기술이 지진시 구조물을 안전하게 하는데 특별히 중요하다.

최근 정적인 조건하에 철근 마디형태에 따른 부착강도의 영향이 많이 연구되고 있다. 횡구속이 적은 경우 부착강도는 마디형태에 영향을 받지 않으나 횡구속철근이나 피복두께가 큰 경우는 상대마디면적 증가에 따라 부착강도가 증가함을 알아내었다^{1,2,4)}. 이러한 마디형태에 대하여 지진하중시 반복하중을 받는 조건하에서는 연구가 아직까지 알려진 바가 거의 없다. 최근까지 정적하중에서 부착에 대한 연구결과로부터 반복하중에서도 마디형태에 따라 부착특성이 달라질 수 있음을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 반복하중시의 보-기둥 접합부의 부착거동을 모델화시켜 부착시험체를 제작하였다(Fig. 1).

부착시험체에서 콘크리트와 철근의 부착강도를 평가하기 위해 철근의 상대마디면적을 주요 변수로 하고, 횡구속에 따른 부착강도의 영향을 파악하고자 한다.

반복하중시의 부착특성으로는 부착강도와 부착강성을 평가하였으며 단조가력실험을 병행하여 상대비교하고자 하였다.

* Corresponding author

Tel : 02-820-0705 Fax : 02-816-3354

E-mail : occhoi@saint.ssu.ac.kr

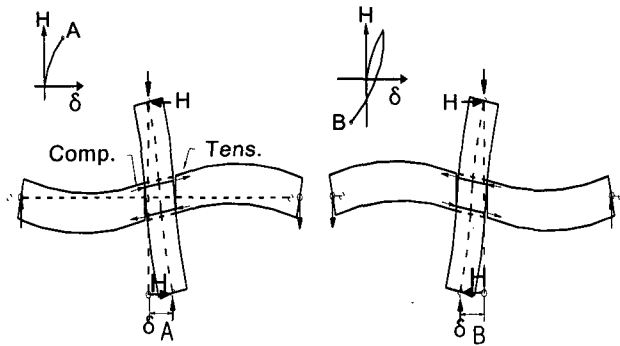


Fig. 1 Behavior of a beam-column interior joint

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 철근의 마디형태 효과가 횡구속 정도에 따라 변화됨을 평가하고자 한다. 철근의 마디형상을 그 높이별로 3가지를 두어 상대마디면적의 변화를 주었으며, 횡보강근량에 차이를 주었다.

- 1) 횡구속 철근량: None, D13, D16
- 2) 마디높이: Low(L), Medium(M), High(H)

상대마디면적의 증가가 부착강도증가에 미치는 영향을 알고자 한다. 같은 변수를 가진 시험체를 크게 2가지 그룹으로 나누어 제작하여 1그룹은 단조가력을 하고 2그룹은 반복가력을 하여 시험하였다. 총 31개의 시험체를 제작하여 부착거동의 영향을 정량적으로 파악한다.

2.2 실험재료

실험에 사용된 콘크리트는 보통콘크리트를 사용했으며, 최대 골재 크기는 13 mm이다. 설계 압축강도는 $f_{ck} = 34$ MPa이며, 시멘트 양은 408 kg/m^3 , 물시멘트 비 41.8%, 잔골재 780 kg/m^3 , 조골재 960 kg/m^3 를 사용하였고, 강도설계 배합법에 따라 배합 타설하였으며 콘크리트 배합비는 Table 1과 같다.

이형철근은 그 항복강도가 $f_y = 440$ MPa인 SD40철근을 사용했다. 부착하중을 받는 주철근으로는 D25 철근과 이에 해당하는 가공철근(M25)이 실험에 사용되었다. 시험에 사용된 철근 마디형태와 성질은 Table 2, 3과 같다.

Table 1 Concrete mixing proportions

Nominal strength (MPa)	Air (%)	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight(kg/m^3)			
				Water	Cement	Sand	Gravel
34	5.4	41.8	45.0	195.8	408	780	960

Table 2 Properties of reinforcing bars

Type*	Dia-meter (mm)	Cross sect. area (cm^2)	Yield str. f_y (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Ultimate str. f_u (MPa)
D13	12.7	1.267	448	188287.7	604
D16	15.9	1.986	419	154945.1	604
M25	25.0	4.908	540	188287.7	615

* D : Deformed bar, M : machined bar

Table 3 Geometry of test bar deformations

Test bar*	Bar dia-meter (mm)	Rib height (mm)	Rib space (mm)	Bearing area** (mm^2)	Shearing area*** (mm^2)	Rr****
C	25.4	1.38	16.50	89.90	1410.5	0.064
L	25.0	1.35	17.12	100.30	1344.6	0.075
M	25.0	2.03	17.12	146.49	1344.6	0.109
H	25.0	2.70	17.12	189.15	1344.6	0.141

* C : Conventional bar(D25), L, M, H : Machined bar

** Bearing area : Projected rib area

*** Shearing area : Rib spacing \times Nominal perimeter

**** Relative rib area

상대마디면적의 변화는 마디높이를 달리하여 주었다. 상대마디면적은 마디지압면적(철근축과 직교방향의 마디면적)과 전단면적(철근주장 \times 마디간 중심거리)의 비로서 다음 식으로 구할 수 있다(Fig. 2, 3).

$$R_r = \frac{F_R}{\pi \cdot d_b \cdot c} \quad (1)$$

여기서,

F_R = 마디지압면적

c = 마디간 중심거리

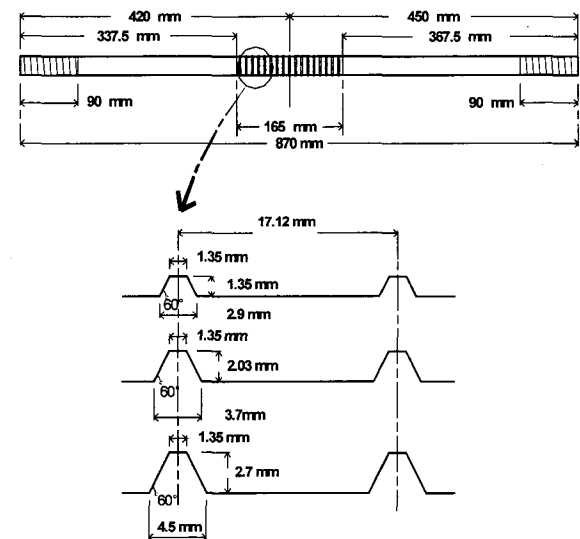


Fig. 2 Machined bar deformation pattern for 25mm diameter bars

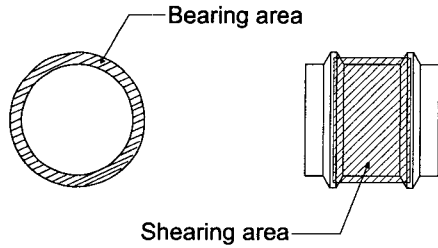


Fig. 3 Schematic illustrating relative rib area

2.3 시험체 제작

콘크리트의 피복두께는 $3.5d_b$ 로 하였다. 콘크리트 속에 묻혀지는 철근의 묻힘길이(embedded length)는 철근의 부착파괴가 일어나되 국부 부착파괴가 묻힘길이 전체에 고르게 발생하도록 $5d_b$ (125 mm)의 길이로 계획하였다. 시험체 단부의 콘크리트 콘파괴 방지를 위해 양단에 P.V.C. 파이프를 삽입하였다. 4-D13 철근을 기둥 주근으로 사용하였으며 D13 철근으로 80mm간격으로 4개를 배치하였다. 횡구속 철근의 차이를 나타내기 위하여 부착길이에 한 개의 주근 D13외에 한 개의 D13과 두 개의 D16의 철근을 각각 배치하였다(Fig. 4).

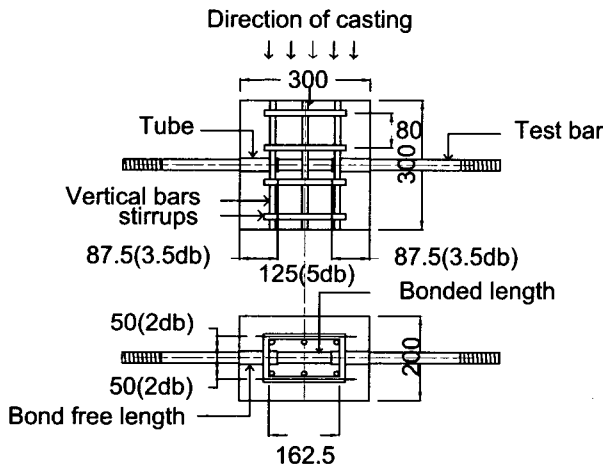


Fig. 4 Test specimen

2.4 재하방법

하중재하는 특별히 고안한 실험장치를 이용하였다. 시험체를 고정된 프레임에 올려 놓고 헤드를 시험체 가력봉에 고정시킨 후 가력하였다. 변위 측정을 위해서 LVDT를 재하단쪽에 2개를 설치하여 측정하였으며 Fig. 5와 같다.

하중은 약 390 N/sec으로 단방향(monotonic)일 경우는 시험체를 정방향으로, 반복(cyclic)인 경우 1사이클이 윗방향 한번, 아랫방향 한번으로 변위제어방식에 따라 진행하였다.

변위제어는 정부 방향으로 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.75, 2.5, 4 mm 까지 증부재하하여 7사이클까지 가력하였다(Fig. 6).

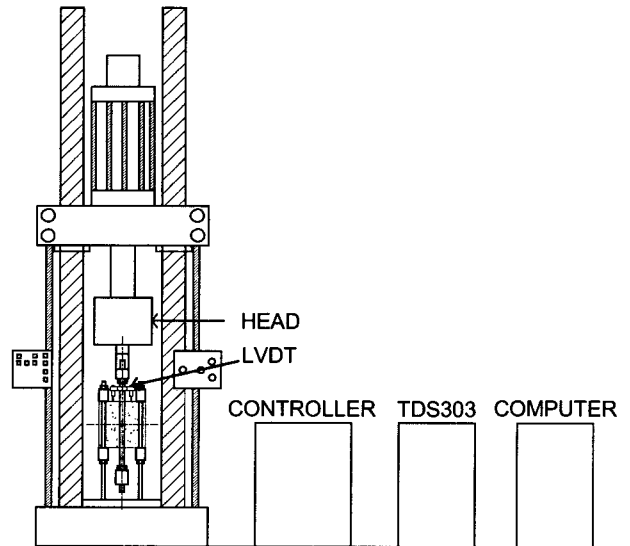


Fig. 5 Test setup

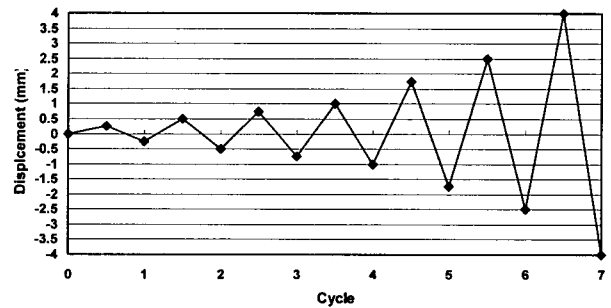


Fig. 6 Increment of loading

본 실험의 단조가력과 반복가력시 시험체별 변수와 실험 결과는 Table 4와 같다.

2.5 실험결과와 파괴양상

파괴양상은 쪼개짐파괴와 뽀뽀파괴 또는 이들의 혼합형태로 나타났다. 횡구속이 없는 시험체는 큰 소음과 함께 콘크리트의 쪼개짐파괴가 일어났으며, 하중은 급속히 떨어졌다. 반면 횡구속이 있는 경우는 균열이 점차적으로 진행되면서 하중에 저항하는 현상이 일어났다. 단조가력시 균열의 전체적인 형태는 거의 일정하게 주근방향으로 균열이 형성되며, 부착이 끝나는 점에서의 파단 종단현상으로 양옆으로 갈라지고 있다. 반복가력시에는 단조가력이 양쪽에서 이루어진 것으로 균열 또한 방향이 서로 반대인 단조가력 시험체를 합한 것과 같은 양상이 나타났다(Fig. 7).

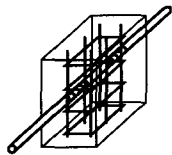
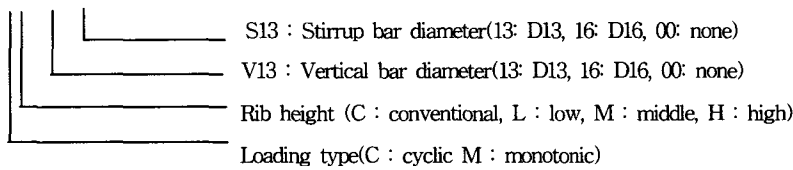
반복가력시 횡구속이 있는 시험체는 상대마디면적이 증가할수록 주근방향의 균열과 함께 파괴형태가 더욱 미세하고 복잡하게 이루어지고 있다. 이는 횡구속이 쪼개짐 파괴를 뽀뽀파괴로 유도시키고, 에너지를 더욱 많이 소산시킬수 있도록 균열을 분산시켜서 부착력을 증가시키는 것으로 사료된다.

Table 4 Test variables and specimen label

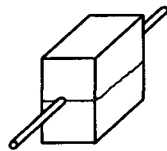
Specimen label*	Loading type	Relative rib area (mm)	Confining reinforcement	Ult. bond strength (kN)	Slip at ultimate load(mm)
MLV00S00	monotonic loading	0.075	--	56.9	0.36
MLV13S13			3-D13	174.6	3.52
MLV16S13			2-D13, 2-D16	183.4	2.06
MMV00V00		0.109	--	41.2	0.19
MMV13S13			3-D13	181.4	2.00
MMV16S13			2-D13 2-D16	151.3	1.25
MHV00S00		0.141	--	60.5	0.21
MHV13S13			3-D13	192.0	1.83
MHV16S13			2-D13 2-D16	195.1	1.33
CLV00S00	cyclic loading	0.075	--	68.2	0.37
CLV13S13			3-D13	118.0	1.75
CLV16S13			2-D13 2-D16	144.3	1.75
CMV00S00		0.109	--	49.0	0.14
CMV13S13			3-D13	129.5	1.00
CMV16S13			2-D13 2-D16	138.9	0.75
CHV00S00		0.141	--	54.9	0.20
CHV13S13			3-D13	152.8	1.00
CHV16S13			2-D13 2-D16	188.3	1.00
CCV00S00		0.064	--	--	0.75
CCV13S13			3-D13	107.3	1.75
CCV16S13			2-D13 2-D16	126.5	0.75

* Specimen label

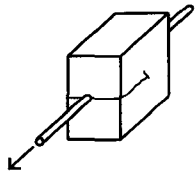
CLV13S13



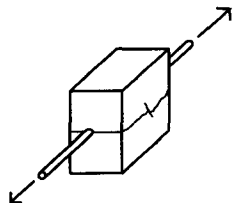
(a) Bar fabrication



(b) Non-confined specimen



(c) Confined specimen under monotonic loading



(d) Confined specimen under cyclic loading

Fig. 7 Failure mode for specimens

3. 단조가력시 부착특성

3.1 부착-슬립곡선

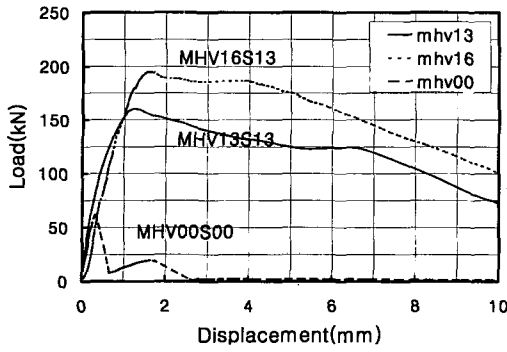
Fig. 8은 단조가력시 하중-변위 곡선을 나타낸다. Fig. 8(a)는 횡구속 변화에 따른 하중-변위곡선을, Fig. 8(b)는 마디높이 변화에 따른 하중-변위곡선을 보여주고 있다.

부착력-슬립곡선은 대체로 초기강성이 높고 이후 급격히 하중이 떨어지는 기존의 연구결과⁵⁾와 일치하는 양상을 보이고 있다.

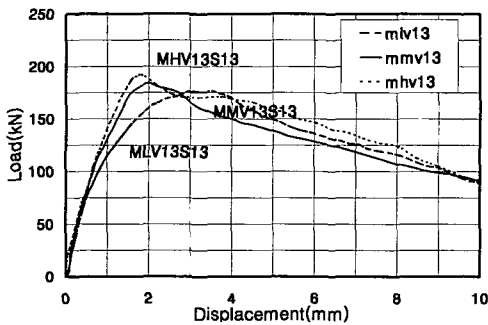
부착력-변위 부착곡선에서 알 수 있듯이 모든 시험체는 대략 슬립 1.5 mm에서 2 mm 사이의 최대강도에 이르고 있다. 부착력 상승곡선의 강성은 점점 감소하면서 최대강도에 도달한다. 이후 최대강도를 지나서는 그 부착강도는 횡구속이 없을 때는 급격히 떨어지며 반면에 횡구속철근이 있을 때는 서서히 감소되고 있어 연성 파괴를 나타내고 있다. 또한 마디높이가 증가할수록 최대강도는 더 작은 슬립에서 발생하는 것을 알 수 있다.

3.2 부착강도

부착강도는 횡구속 증가에 따라, 또한 상대마디면적에 따라 증가한다. Fig. 9은 단조가력시 횡구속과 마디높이의 변



(a) Effect of confinement



(b) Effect of rib height

Fig. 8 Load-displacement curve for monotonic loading

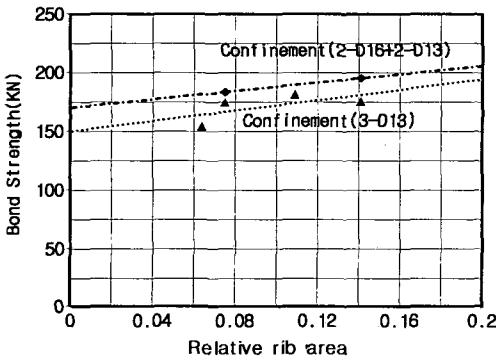


Fig. 9 Effect of relative rib area on bond strength for monotonic loading

화에 따른 부착강도의 변화를 나타낸다. 모든 시험체에서 횡구속이 증가하면서 부착강도는 증가하고 있다. 또한 상대 마디면적에 따른 부착강도 또한 증가하였다. 그러나, 횡구속철근이 없는 시험체는 상대마디면적에 따른 부착강도의 변화가 뚜렷하지 않았다.

D16 횡구속철근을 가진 시험체가 D13 횡구속 철근을 가진 시험체보다 최대 부착강도는 약 15% 정도 높게 나오고 있다. 0.064에서 0.141로 상대 마디면적이 증가함에 따라 부착강도는 약 11.5% 증가하고 있다.

3.3 부착강성

단조가력시 최대강도에 따른 최대슬립으로부터 시험체의 부착강성을 평가할 수 있다. Fig. 10은 각각 상대마디면적

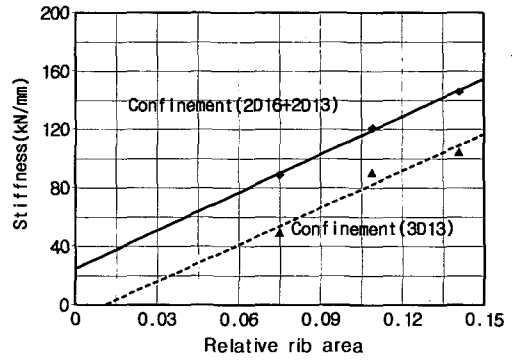


Fig. 10 Effect of relative rib area on bond stiffness for monotonic loading

과 횡구속의 변화에 따른 강성의 변화를 나타내고 있다. 모든 시험체는 상대마디면적이 높아질수록 부착강성이 증가함을 알 수 있다. 또한 횡구속양이 증가하면서 부착강성이 커지고 있다. 이것은 횡구속양과 상대마디면적이 커질수록 더 작은 슬립에서 더 큰 강도를 발휘하였고 구조물에 더욱 안정적임을 보여준다.

4. 반복가력시 부착특성

4.1 부착-슬립곡선

반복하중의 특성상 일정한 슬립사이클에 부착력은 사이클이 거듭될수록 감소했으며, 또한 부착강도를 지나서부터는 그 슬립량은 사이클이 반복될수록 급격히 증가됨을 알 수 있다.

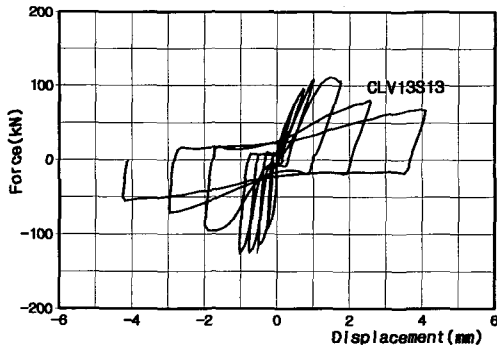
단조가력시 부착강성과 반복가력시 초기부착강성이 거의 일치되고 있으며, 반복가력시의 최대점을 연결한(envelope) 곡선은 단조하중곡선을 따라간다.

반복가력시 최대강도에 도달한 후 강도감소가 크게 나타나고 있다. 사이클이 반복할수록 일정한 슬립까지 다음 사이클에서의 부착력은 상대적으로 이전 사이클보다 더 작은 부착력을 나타내는데 이는 이전 사이클에서 발생한 균열을 더욱 크게 만들기 때문으로, 사이클이 반복될수록 더욱 부착력의 차는 커지고 있으며(Fig. 11 a, b, c), 반복가력시 매 사이클마다 마찰력의 영향이 커짐을 알 수 있다.

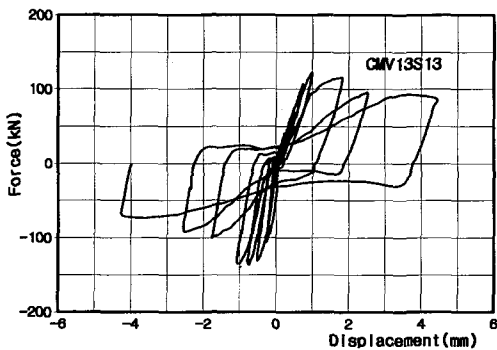
4.2 부착강도

반복가력시에 상대마디면적이 증가함에 따라 부착강도가 증가하고 있다. 횡구속 철근이 있을 때의 이러한 증가는 단조가력시와 마찬가지로 현상이지만, 부착강도 증가폭이 단조가력시에 비해 더욱 커지고 있다.

상대마디면적이 0.064에서 0.141로 증가함에 따라 부착강도는 약 32% 증가되고 있으며 이는 정적하중시 부착강도 증가율의 약 3배이다. 또한 횡구속이 증가에 따른 부착강도는 증가하고 있다(Fig. 12).



(a) Low relative area



(b) Medium relative area



(c) High relative area

Fig. 11 Force-slip curve

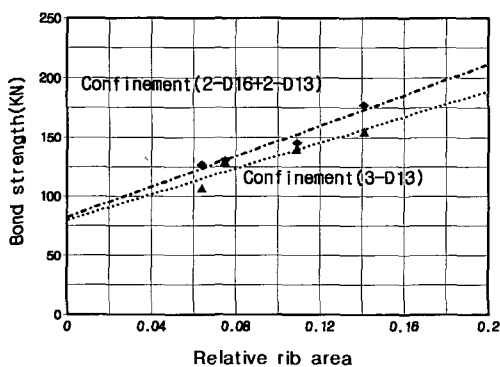


Fig. 12 Effect of relative rib area on bond strength

철근과 콘크리트 두 이질재료 사이의 부착 슬립은 반복 하중이 작용되는 지진 하중시에 연성골구조물의 이력거동에 미치는 영향이 크다. 부착강도 15% 감소는 보 기둥 골구조물에서 에너지 소산능력을 30% 까지 감소시키는

원인이 되고 있다.

본 연구의 결과로부터 이러한 부착강도의 증가는 횡구속이 큰 보기둥 접합부에서 상대마디면적이 큰 철근을 사용함으로써 개선된 내진 성능을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

4.3 부착강성

반복가력시 상대마디면적의 증가는 부착강성을 증가시키고 있다. 이는 상대마디가 증가시키고 있다. 이는 상대마디가 증가함에 따라 슬립량이 줄어들고 있음을 알 수 있으며 정적하중의 경우와 동일한 현상이다. 횡구속이 있을 때는 그 횡구속의 증가에 따른 강성변화가 크다.

즉, 횡구속이 증가할수록 부착강성이 증가하고 있다(Fig. 13).

부착강성은 단조가력시와 비교시 횡구속이 없을 때에는 상당한 편차가 있으며, 이는 초기 부착강성을 나타내는 접착력에 상당한 차이가 있기 때문으로 사료된다.

지진하중과 같은 반복하중이 작용될 때, 구조물의 변형은 부착슬립이 크에 따라 변형량이 증가되고 있는 것으로 알려져 있다. 상대마디 면적이 큰 철근의 사용은 이러한 슬립 발생량을 줄이어 변형량을 감소시킬 수 있을 것이다.

5. 결과 고찰

부착성능은 콘크리트와 철근 계면의 재료적 특성과, 철근을 둘러싸고 있는 피복 콘크리트와 횡구속철근에 의한 구조특성에 의해 결정된다^{6,7,8}. 계면의 특성 중에서 철근 마디형태의 영향에 대해서는 횡구속이 큰 경우에만 상대마디면적이 증가함에 따라 부착강도가 증가되는 것으로 알려져 있다¹.

횡구속이 증가하면 부착파괴는 쪼갬파괴보다 뽑힘파괴에 의해 영향을 받게될 가능성이 증가한다. 상대마디면적이 증가될 경우, 마디돌기에 의한 콘크리트 돌출부의 국부손상은 줄어들게 될 것이다. 마디돌기에 의한 국부부착 파괴는 단조가력보다 반복가력에서 더욱 심하여 진다. 즉, 반복가력시에 상대마디 증가는 뽑힘파괴에 대한 저항력을 더욱 높게 할 것이며 따라서 부착성능이 증가하게 될 것이다.

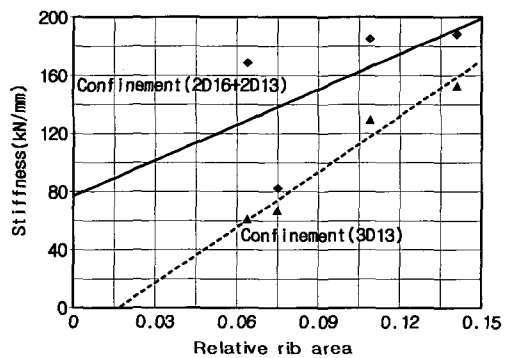


Fig. 13 Effect of relative rib area on bond stiffness

상대마디면적의 증가에 따라 부착강성도 증가하였고 슬립량이 감소하였다. 즉, 상대마디면적이 큰 철근은 기존의 철근에 비해 국부손상을 적게 할 것이고 따라서 국부손상을 많이 받게되는 지진하중시에 개발된 철근은 부착성능을 향상시켜 전체적으로 콘크리트구조물의 내진성능을 보다 좋게 할 것이다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 단조가력시 횡구속이 증가할수록 부착력도 증가하며 상대마디면적의 증가에 따라서도 약간의 강도변화가 발생하였다. 상대마디면적이 증가할수록 최대강도에 이르는 슬립은 감소하는 현상으로 나타났다.
- 2) 상대마디면적이 증가할수록 단조가력시에 비해서 반복가력시에 부착력 증가가 더욱 커지는 것으로 관찰되었다.
- 3) 반복가력시 상대마디면적의 증가에 따른 부착강도의 증가가 횡구속 철근이 클 때 더욱 뚜렷하게 나타났다.
- 4) 반복가력시에 횡구속이 클 때 상대마디면적 증가로부터 부착강성이 증가되어 나타나고 있다.
- 5) 개발된 철근을 사용함에 따라 철근콘크리트 구조물의 내진 성능을 향상시킬 것으로 기대 된다.

참고문헌

1. Choi, O. C., Hadje-Ghaffari, H., Darwin, D., and McCabe, S. L., "Bond of Epoxy-Coated Reinforcement to Concrete: Bar Parameters," *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.2, 1991, pp. 207~217.
2. Choi, O. C., Darwin, D., and McCabe, S. L., "Interface Characteristics for Bond of Reinforcing Steel to Concrete," *The Fourth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, Seoul, Korea, Sep., 1993, pp.751~756.
3. Darwin, D. and Graham, E. K., "Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars," *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.6, 1993, pp.646~657.
4. Darwin, D., Tholen, M. L., Idun, E. K., and Zuo, J., "Splice Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars," *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.1, 1996, pp.95~107.
5. Eligehausen, R. Popov, E. P., and Bertero, V. V., "Local Bond Stress-slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations," *Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-83/23*, University of California, Berkeley, Oct., 1983, pp.169.
6. Hamad, B. S., "Bond Strength Improvement of Reinforcing Bars with Specially Designed Rib Geometries," *ACI Structural Journal*, Vol.92, No. 1, 1995, pp.3~13.
7. Lutz, L. A., and Gergely, P., "Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete," *ACI Journal, Proceedings* Vol.64, No.11, 1967, pp. 711~721.
8. Skorbogotov, S. M., and Edwards, A. D., "The Influence of Geometry of Deformed Steel Bars on Their Bond Strength in Concrete," *Proceedings, Institute of Civil Engineers*, Vol. 67, Part 2, June, 1979, pp.327~339.

요 약

지진하중이 작용할 때, 철근콘크리트 구조물에서 취성파괴의 원인은 철근과 콘크리트사이의 과도한 부착손실에 기인한다. 본 연구에서는 반복하중 작용시에 철근의 마디형태에 따른 부착성능의 영향을 평가하고자 하였다. 철근의 마디높이에 변화를 주어 상대마디면적에 변화를 주었고, 횡구속철근양에 변화를 주었다. 단조가력시 횡구속이 증가할수록 부착력도 증가하며 상대마디면적의 증가에 따라서도 약간의 강도변화가 발생하였다. 단조가력시에 비해서 반복가력시에 상대마디면적이 증가할수록 부착력 증가가 더욱 커지는 것으로 관찰되었다. 반복가력시 상대마디면적의 증가에 따른 부착강도의 증가가 횡구속 철근이 있을 때 더욱 뚜렷하게 나타났다. 반복가력시 일정한 슬립에서 반복횟수가 증가할수록 강성은 떨어졌으나, 상대마디면적 증가에 따라 부착슬립량의 감소도 크게 발생했다. 따라서 지진과 같은 반복가력시 상대마디면적이 큰 철근을 사용함으로써 더 작은 슬립으로 더 큰 부착강도를 발휘하게 되어 구조물의 내진성능을 개선시킬 수 있겠다.

핵심용어 : 부착, 횡구속, 반복하중, 철근의 마디형태, 상대마디면적