한정연성도 설계를 위한 소수 겹침이음을 갖는 주철근 상세에 관한 연구

Less amout of lap-spliced longitudinal bars as an alternative of seismic detailing for limited ductility design

김익현* 이종석** 김원섭*** 선창호****
Kim, Ick Hyun Lee, Jong Seok Kim, Won Seop Sun, Chang Ho

ABSTRACT

In present Korea Highway Bridge Standards the lap splice of longitudinal bars in a potential plastic hinge region is allowed so that large amount of transverse rebar specified in high seismicity regions is required to prevent brittle bond failure. If the brittle failure effects can be completely removed from the conventional designed piers, the amount of transverse rebar will be reduced drastically.

In this study scaled models with solid and hollow rectangular sections were tested to investigate the seismic behavior of RC piers with 50% of lap-spliced longitudinal bars in plastic hinge regions. In the tests the typical flexural failure conducting a ductile behavior were observed in both models. It is shown that the 50% of lap-spliced bars can be considered as a good alternative of seismic detailing for longitudinal bars.

1. 서 론

지진시 교량구조물의 합리적인 내진성능 확보방안은 교각의 소성힌지영역의 심부콘크리트를 충분히 횡구속함으로써 지진시 교각의 소성변위에 의한 지진에너지를 흡수하는 것으로서 이를 위하여 미국의 AASHTO의 지진구역II(중진지역)의 내진상세 규정이 적용되고 있다. 교각의 충분한 소성변형 능력을 확보하기 위한 철근의 주요한 내진상세로는 소성힌지영역에서의 주철근의 겹침이음과 심부 콘크리트를 횡구속하기 횡철근의 양(횡철근비)을 고려할 수 있다. AASHTO의 지진구

* 정회원 · 울산대학교 건설환경공학부, 조교수
** 울산대학교 건설환경공학부, 교수
*** 울산대학교 건설환경공학부, 석사과정
**** 울산대학교 건설환경공학부, 박사수료

역II의 내진상세 규정은 강진지역(지진구역 III & IV)에서 명시적으로 제한하고 있는 소성힌지영역에서의 주철근의 겹침이음을 제한하고 있지 않다. 대신에 강진지역과 동일한 횡철근비을 규정하고 있어 비록 소성힌지영역에서 주철근의 겹침이음이 있더라도 중진지역(지진구역 II)에서 요구되는 소요연성도를 확보할 수 있는 상세를 채택하고 있다. 횡철근은 강진지역과 동일한 체적비로 규정되는 횡철근 내진상세에 의하여 과다하게 배치되게 됨으로써 시공에 상당한 어려움을 겪고 있는 것이 현실이다. 본 연구에서는 소성힌지영역의 50%의 주철근 겹침이음이 향후 성능기초 내진설계를 위한 하나의 내진상세 대안으로서 가능성이 있는지 검토하기 위하여 축소모형실험과 수치해석을 수행하였다. 모델의 단면형상은 기존에 실험이 수행되지 않은 사각단면(중실 및 중공형태)을 대상으로 하였으며 모델의 비선형 거동특성과 변위연성도 특성도 함께 검토하였다.

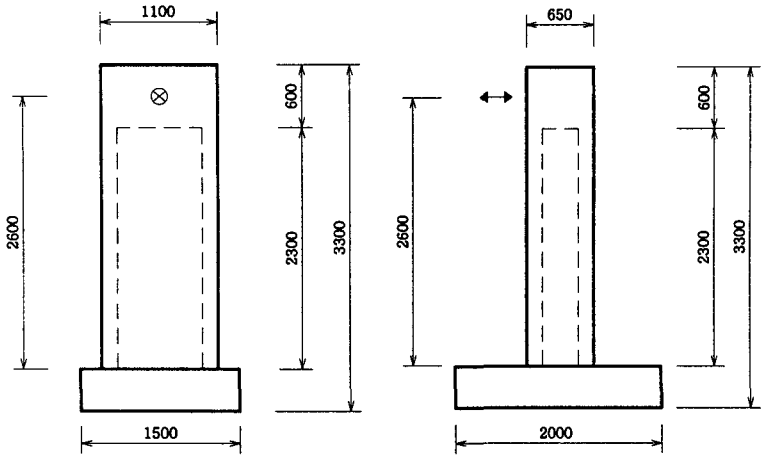
2. 실험을 통한 거동특성분석

2.1 시험체의 설계와 제작

소성힌지영역내의 50%의 주철근 겹침이음(겹침이음길이 : 인장이형철근 B급 이음, 39cm)을 갖는 교각의 휨 연성 거동특성을 살펴보기 위하여 전단파괴가 동반되지 않는 시험체를 중실단면 및 중공단면으로 하여 각각 1기씩을 제작하였다. 중공단면 시험체의 단면특성은 일반적인 중공단면 교각을 모델로 하여 1/4.2로 축소하였다. 중공단면의 외부치수는 110cm×65cm이고 내부치수는 80cm×35cm로 중공비(단면의 외측치수에 대한 내측치수의 비)는 39.2%이다. 교각의 재하점까지의 높이는 260cm로 재하방향의 단면크기(65cm)에 대한 비는 4.0이다. 중실단면의 외부치수와 교각의 높이는 중공단면 모델과 동일하다. 횡철근 상세는 D10철근을 철선으로 단순히 이어 주철근의 위치를 잡아주는 정도로 배치하여 횡철근의 구속효과를 완전히 배제시켰다. 그림 1에 중공단면 교각의 축소모델의 형상을 나타내었고 모델의 설계특성 값은 표 1에 나타내었다.

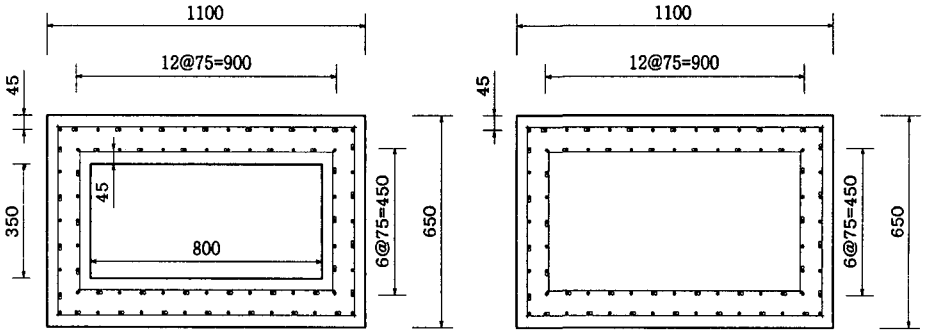
표 1. 모델의 설계 특성값

구 분		Prototype	모델	
		중공단면	중공단면	중실단면
단면치수(mm)		4600×2800(외부치수) 3400×1600(내부치수)	650×1100(외부치수) 350×800(내부치수)	650×1100
교각높이(mm)		고려 안함	2600	2600
주철근	지름(mm)	D22	D10	D10
	주철근비(%)	1.3	1.3	0.8
	설계항복강도(kgf/cm^2) 실제강도(kgf/cm^2)	3000(SD30) -	3000(SD30) 4210	3000(SD30) 4210
	겹침이음 길이(mm)	고려 안함	390 인장이형철근의 B급 겹침이음길이	390
	겹침이음비(%)	고려 안함	50	50
횡철근	지름(mm)	D16	D10	D10
	배치간격(mm)	고려 안함	200(교축방향) 100(직각방향) 횡구속효과를 배제하기 위한 단순이음	200
콘크리트 피복(mm)		100(내·외측)	45(내·외측)	45
콘크리트 설계강도(kgf/cm^2) 실제강도(kgf/cm^2)		279 -	240 230	240 230



(a) 교축방향 (b) 교축직각방향

그림 1. 축소모델의 형상(중공단면 모델), 단위(mm)



(a) 중공단면 철근배치도(단위: mm) (b) 중실단면 철근배치도(단위: mm)

- Starter bar(기초부로부터 연결되는 철근) 또는 연속철근
- ○ Column bar(Starter bar에 겹침이음된 철근)

그림 2. 철근상세도

2.2. 준정적 반복재하실험

수평력은 Stroke가 ±150mm이고 용량 5000kN의 Hydraulic Actuator를 이용하여 재하하였다. 본 연구에서는 축력의 영향을 배제하기 위하여 축력을 재하하지 않았다. 변위하중제어를 위한 변위진폭(Displacement amplitude)을 결정하기 위하여 먼저 $0.75P_i$ (P_i ; 콘크리트 압축연단의 극한변형률이 0.003인 상태에서의 이론적 수평내하력)의 하중을 미는 방향(Push)과 당기는 방향(Pull)으로 각각 1회씩 하중재하방식으로 재하하여 변위(Δ_1, Δ_2)를 얻고 이를 식(1)와 같이 외삽하여 변위진폭의 크기(Δ)를 구하였다.

$$\Delta = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = \frac{\Delta^+_{0.75} + \Delta^-_{0.75}}{2\times 0.75} \tag{1}$$

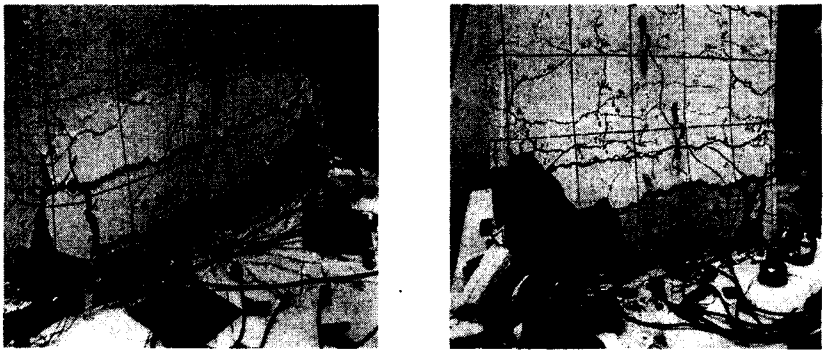
일반적으로 이렇게 얻은 값은 항복변위에 해당하지만[1] 본 연구에서는 단순히 변위진폭으로서 사용하기로 한다. 이는 재료실험 결과 철근의 실제 항복강도가 설계강도보다 훨씬 커서(표 1참조) 모델의 수평내하력이 이론적 수평내하력(P_i)보다 커져서 이로 인해 모델의 실제 항복변위가 식(1)

로부터 얻은 변위진폭(Δ)보다 커졌기 때문이다. 변위제어시의 변위증분(Displacement increment)은 50% 겹침이음에 따른 변위연성도가 비교적 작을 것으로 예상하여 4.0Δ까지는 변위진폭(Δ)의 1/2로 하였으며 이 후부터는 변위진폭으로 하였다. 하중재하 횟수는 각 하중단계에서 2회씩으로 하였다.

2.3 실험 결과 및 분석

본 실험 모델의 주철근의 항복강도는 재료실험 결과 설계강도보다 1.4배 이상 큰 것으로 나왔다. 따라서, 수평내하력도 설계강도를 이용하여 계산한 값보다 훨씬 크게 된다. 이에 본 연구에서는 모델의 실제 수평내하력을 참고로 하여 초기항복하중을 결정하고 이 하중에서의 변위를 초기항복변위(Δ_y')로 하여 식(1)과 같이 외삽하여 항복변위(Δ_y)를 새롭게 산정 하였다.

우선, 수평내하력에 대한 초기항복하중의 비를 알아보기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과 수평내하력에 대한 초기항복하중의 비는 그림 7에서 알 수 있듯이 중실단면모델과 중공단면모델이 각각 0.77, 0.75 수준이다. 따라서, 본 연구에서는 초기항복하중을 수평내하력의 75%로 하여 항복변위($\Delta_y=\Delta_y'/0.75$)를 산정하였다. 계산된 항복변위는 중실단면모델이 18mm이고 중공단면모델은 21mm이다. 소성힌지영역에 모든 주철근이 겹침이음된 경우에는 피복 콘크리트의 박리와 주철근의 좌굴없이 겹침이음부의 슬립에 의한 매우 취성적인 파괴를 나타내게 된다[2]. 그러나, 본 연구의 두 시험체는 피복콘크리트의 박리와 주철근의 국부좌굴로 파괴에 이르는 전형적인 휨파괴 모드를 나타내었다(사진 1참조). 중실 및 중공단면의 손상과정을 요약하면 표 2과 표 3와 같다.



(a) 중실단면 교각 모델 (b) 중공단면 교각 모델

사진 1. 모델의 최종파괴 모습

표 2. 중실단면 교각의 손상과정의 요약

하중단계	Drift Ratio	변위 연성도	손상상태	수평하중 (tonf)	수평변위 (mm)
$0.75P_i$	0.27%	0.39	수평균열 발생(50cm, 70cm)	14.5	7.0
1.0Δ	0.36%	0.52	기존 수평균열의 점진적 확대 추가균열 발생(10cm, 35cm, 90cm, 110cm)	18.83	9.33
2.0Δ	0.72%	1.04	기존 균열 수평으로 진전, 기초접합부 균열	25.75	18.66
3.5Δ	1.26%	1.81	기존균열 진전, 기초 접합부 균열 진전	27.73	32.66
4.0Δ	1.44%	2.07	10cm~20cm 수직균열 발생	27.84	37.32
5.0Δ	1.79%	2.59	0cm~20cm 수직균열 발생, 최대내하력(P_{max})	29.08	46.65
6.0Δ	2.15%	3.11	모서리부 손상 진행	28.16	55.98
7.0Δ	2.44%	3.63	모서리부 피복 박리, 주철근 노출 및 좌굴	21.57	65.31

표 3. 중공단면 교각의 손상과정 요약

하중단계	Drift Ratio	변위 연성도	손상상태	수평하중 (tonf)	수평변위 (mm)
0.75P_i	0.24%	0.30	수평균열 발생(25cm, 50cm)	11.4	6.25
1.5△	0.48%	0.50	경사 균열 발생(80cm)	18.78	12.50
2.5△	0.8%	0.99	측면부 경사균열 발생, 진전, 기존수평균열 확대	23.88	20.83
3.5△	1.12%	1.39	기초 접합부 균열 진전	27.1	29.16
6.0△	1.92%	2.38	수직균열 발생(0cm~20cm), 최대내하력(P_{max})	29.36	49.98
7.0△	2.24%	2.78	모서리부 손상 진행	27.43	58.31
9.0△	2.88%	3.57	피복박리(0cm~10cm), 주철근 좌굴 및 파단	21.65	74.97

2.4 하중변위 이력곡선

중실단면 모델 및 중공단면 모델의 하중-변위 이력곡선은 각각 그림 3, 그림 4과 같다. 중실단면 모델에서는 변위 47mm(Drift Ratio 1.79%, 변위연성도 2.59)까지는 매우 안정적인 이력곡선 특성을 나타내고 있으며 그 후 피복콘크리트의 박리와 주철근의 좌굴에 의한 수평내하력 저하가 진행되었다. 파괴유형이 전형적인 휨파괴 형태로 나타나 우려되었던 겹침이음부의 부착파괴는 발생하지 않았다. 중공단면 모델에서도 매우 유사한 거동특성을 나타내고 있다. 변위 50mm(Drift Ratio 1.92%, 변위연성도 2.38)까지는 매우 안정적인 이력곡선 특성을 나타내었으며 그 후 수평내하력이 감소되었다.

두 모델의 하중-변위 이력곡선의 포락곡선(Envelop Curve)을 그림 5에 함께 나타내었다. 중실단면과 중공단면 모델의 수평내하력은 거의 같다. 이는 중공단면 모델의 극한시의 중립축의 위치가 압축측 플랜지에 위치하게 되어 중실단면의 중립축 위치와 거의 같기 때문이다(표 5 참조). 변형성능(Drift Ratio) 측면에서 보면 중공단면이 내부중공에 의하여 다소 유연하고 큰 변형성능을 나타내고 있다. 그러나 항복시의 변위가 중실단면에 비하여 크기 때문에 최대내하력시의 변위연성도를 비교하면 중실단면 모델에서 2.59, 중공단면 모델에서 2.38로서 오히려 중공단면이 작은 값을 나타내고 있다.

실험결과를 정리하면 표 4와 같다.

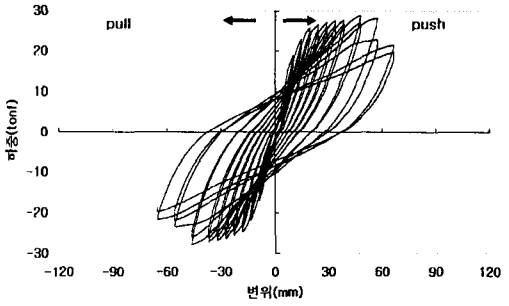


그림 3. 중실단면모델의 하중-변위이력곡선

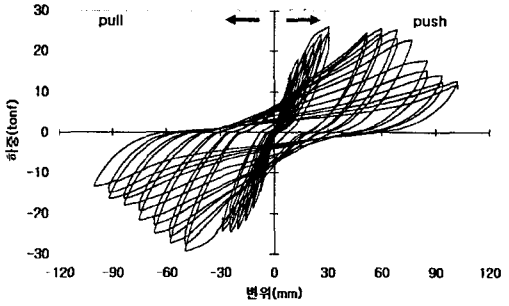


그림 4. 중공단면모델의 하중-변위이력곡선

표 4. 실험결과의 정리

구 분	중실단면	중공단면
Δ_y (Yield Displacement)	18.0(mm)	21.0(mm)
Δ_m(Displacement at P_{max})	46.7(mm)	50.0(mm)
μ_m(μ_Δ at P_{max})	2.59	2.38
Δ_m/H(Drift Ratio)	1.79%	1.92%

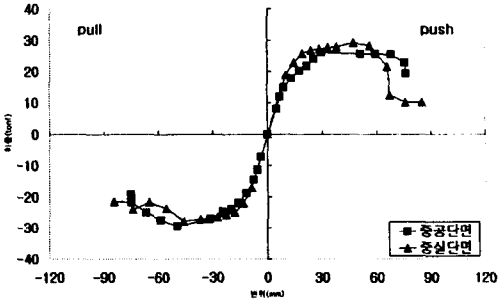


그림 5. 하중-변위 이력곡선의 포락곡선 비교

3. 수치해석을 통한 거동특성분석

3.1 거동특성 분석

본 연구에서는 비선형 해석을 수행하여 다른 하중조건에서 교각의 거동특성을 분석하고 축하중 재하에 따른 변위연성도의 변화특성을 분석하였다. 해석에 있어서 교각은 파이버요소를 도입한 프레임요소로 모델링하여 비선형해석을 수행하였다.[3] 그림 6은 콘크리트의 극한변형률을 변화시켜 해석을 수행하고 그 결과를 실험값과 비교한 것이며, 그림7은 이를 초기항복상태를 기준으로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 해석에서 주철근의 항복이 최초로 발생하는 하중의 크기는 중실단면 모델과 중공단면모델에서 각각 최대하중(P_{max})의 77%, 75%로 대략 75%수준이다. 중실단면과 중공단면 모델에서 실험에서의 변위연성도와 유사한 값을 주는 콘크리트의 극한변형률은 0.0025수준이다. 따라서, 본 연구에서는 극한변형률을 0.0025로 가정하여 하중재하 조건의 변화에 따른 변위연성도의 변화 특성을 분석하였다.

3.2 축력에 따른 변위 연성도의 변화

본 실험에서와 같이 동일한 외형치수를 갖는 중실단면과 중공단면 교각을 고려하는 경우 중공단면은 내부중공에 의하여 단면적이 감소되므로 동일한 상부구조를 지지한다면 중실단면에 비하여 축력비는 상대적으로 커지게 된다. 우리나라 교각에 작용하는 축하중은 대략 축강도($f_{ck}A_g$)의 5-10% 정도로 낮은 수준이다[4]. 본 연구에서는 축력비를 중실단면을 기준으로 5-20%까지 변화시켜 두 실험모델에 있어서의 변위연성도의 특성을 분석하였다. 그림 8은 축력비 변화에 따른 중실 및 중공단면의 변위연성도의 변화를 나타낸 것이다. 축하중의 변화에 따른 이들 모델의 연성도 및 변형특성을 정리하면 표 5과 같다. 그림 8로부터 축하중이 증가하면 모델의 변위연성도는 감소하고 특히 축력비가 작은 하중상태(축력비 10% 이하)에서 축력비 증가에 따른 변위연성도의 감소율은 축력비가 큰 상태에서의 감소율보다 커진다는 것을 알 수 있다. 축하중이 증가하면 파괴시의 중립축이 내려오게 되고 이로 인하여 인장주철근은 변형경화영역에 이르지 못하여 주철근의 Pull-out량이 감소하기 때문이다. 즉, 주철근의 Pull-out에 의한 변위의 감소로 총변위량이 작아지기 때문이다(표 5 참조). 축력비가 매우 작은 상태(5% 이하 수준)에서는 중실단면의 변위연성도가 중공단면에 비하여 크게 나타난다. 이것은 중공단면의 항복변위가 중실단면보다 큰 것에 기인한다. 그러나 절대변위값은 중공단면이 중실단면에 비해 다소 크다. 축력비가 5% 이상이 되면 중공단면의 변위연성도가 중실단면의 변위연성도 보다 크게 나타난다. 그러나, 동일한 축하중크기에

대한 변위연성도의 크기는 두 모델에서 유사한 값을 나타낸다.

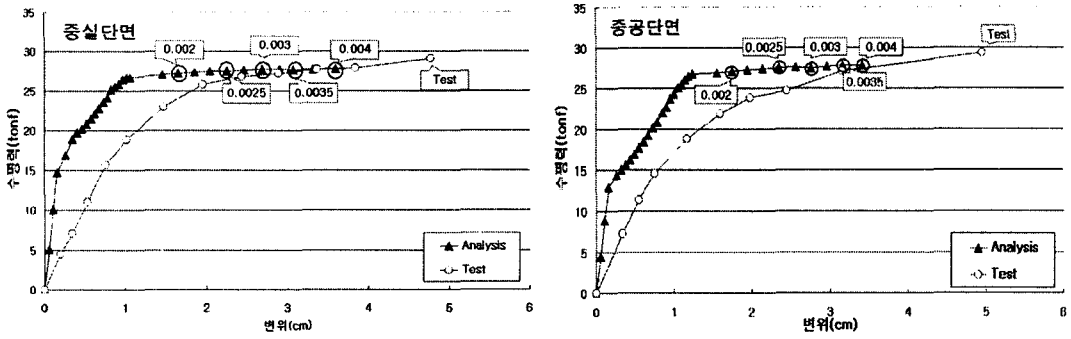


그림 6. 수평력-변위의 비교(실험과 해석)

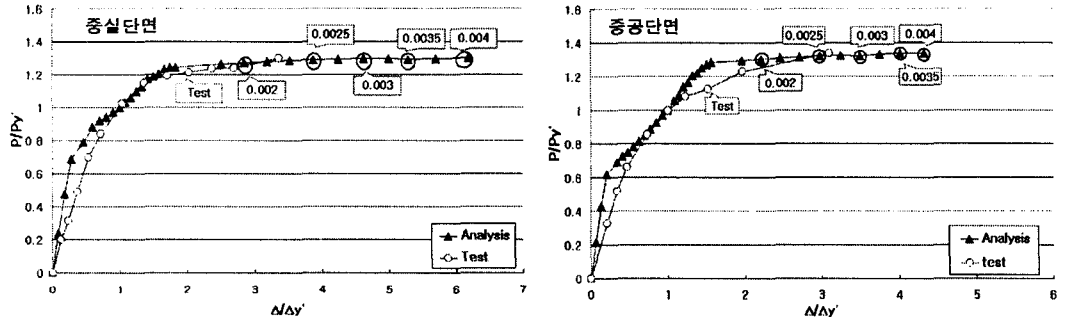


그림 7. 무차원화된 수평력-변위의 비교(초기항복이 기준)

표 5. 축하중 변화에 따른 중실 및 중공단면의 변화 특성(해석결과)

축하중 (tonf)	축력비(%)		연성도 최대하중시		$\frac{Pull-out\text{변위}}{\text{종변위}}$ (%)		중립축 위치 (압축단길이cm)		내하력비(1)		변위비(2)		주철근의 변화경화	
	중실	중공	중실	중공	중실	중공	중실	중공	중실	중공	중실	중공	중실	중공
0 (실험)	0	0	3.00 (2.59)	2.55 (2.38)	48.51	43.45	7.54	7.63	1.0	1.0	1.00	1.00	O	O
85.8	5	8.2	1.96	1.84	37.84	32.05	10.45	10.73	1.3	1.3	0.56	0.76	O	O
171.6	10	16.4	1.32	1.30	13.68	12.29	14.32	13.86	1.6	1.6	0.55	0.52	×	×
257.4	15	24.7	1.26	1.21	14.07	13.56	18.12	18.63	1.8	1.8	0.53	0.52	×	×
343.2	20	32.9	1.16	1.13	15.98	15.27	22.24	24.51	2.2	2.1	0.54	0.53	×	×

(1) 축하중 0시의 내하력에 대한 비율, (2) 축하중 0시의 변위에 대한 비율

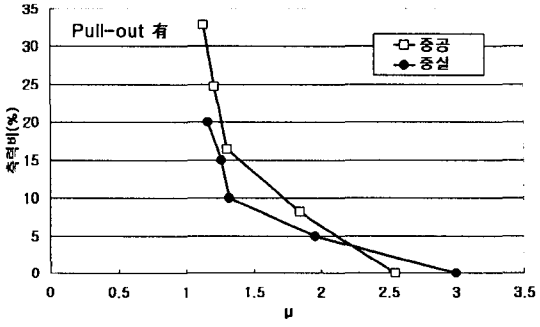


그림 8. 축력비와 변위연성도의 관계

4. 결론

본 연구에서는 현행 도로교설계기준의 내진상세 규정을 개선할 수 있는 하나의 대안으로서 교각의 소성힌지영역에 50%의 주철근의 겹침이음을 두는 것이 타당한지를 검토하기 위하여 축소모델 실험과 수치해석을 수행하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 중실 및 중공단면 두 모델에서는 콘크리트의 박리, 주철근의 좌굴로 이어지는 전형적인 휨파괴를 보였다. 이러한 파괴특성은 내진상세의 대안으로서 매우 중요한 의미를 지니게 된다. 횡철근의 중요한 역할은 압축콘크리트의 횡구속에 의한 교각의 변위연성도의 증가와 주철근 겹침이음부의 횡구속 제공에 따른 부착파괴의 방지이다. 따라서, 주철근 겹침이음부에 부착파괴가 발생하는 경우 이를 방지하기 위해서는 상당한 양의 횡철근이 요구되고 이는 중약진지역에서 요구되는 소요연성도를 확보하는데 필요한 횡철근을 상회 하게 된다. 50%의 겹침이음을 갖는 교각은 연성적인 파괴를 나타냄으로써 소요연성도를 확보하는데 필요한 횡철근의 양을 크게 감소시킬 수 있어 현행 내진상세의 대안으로서 충분히 고려할 가치가 있다.

(2) 축하중이 재하되지 않은 상태의 실험에서 변위연성도(최대하중 기준)의 크기는 중실단면 모델이 2.59, 중공단면 모델이 2.38로 중실단면이 다소 크다. 이는 중공단면의 항복변위가 중실단면에 비하여 상대적으로 크기 때문이다. 축력비를 파라메타로 한 해석적 연구에서도 축력비가 작은 수준(축강도의 0-5%)에서는 유사한 경향을 나타내었다. 그러나, 축력비가 커지면서(축강도의 10% 이상) 중공단면의 연성도가 중실단면의 변위연성도 보다 크게 나타났다.

(3) 축력비가 10% 수준에서의 변위연성도는 중공단면이 중실단면에 비하여 다소 큰 값을 나타내지만 동일한 축하중에 대해서는 두 모델에서 매우 유사한 연성도의 값을 나타내었다. 따라서, 외형치수가 동일한 중실단면과 중공단면 교각이 동일한 교량에 적용되면 기대되는 연성도 값은 유사하게 된다.

(4) 해석에서는 축하중의 증가와 함께 변위연성도는 감소하였다. 이는 축하중에 의한 주철근의 Pull-out 감소로 변위증가에 대한 기여도가 크게 감소하기 때문이다. 이러한 경향은 축하중이 작은 하중상태(축력비 10% 이하)에서 두드러지게 나타난다.

참고문헌

1. Priestley, M.J.N., and Park, R., "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading," *ACI Structural Journal*, V. 84, No. 1, Jan.-Feb. 1987, pp. 61-76.
2. 김재관, 김익현, 임현우, 전귀현, "수평반복하중을 받는 비내진상세 RC 중실원형교각의 거동특성", 한국지진공학회 논문집, 제5권 제4호, 2001.8, pp.83-95.
3. 김익현, "3차원 비선형 동적해석을 이용한 입체라멘교의 지진거동특성에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제6권 제5호, 2002. 10, pp. 45-51
4. 시설안전기술공단, 기존교량의 내진보강방안 연구 보고서, 1999.7