補強 開口部를 갖는 合成보의 擧動에 관한 硏究

金 弼 中* · 崔 山 鎬** · 梁 永 晟***
金 圭 石**** · 金 錫 中*****

A Study on the Behavior of Composite Beam With Reinforced Web Opening

Pil-Jung Kim, San-Ho Choi, Young-Sung Yang,
Kyu-Suk Kim, Suk-Jung Kim

ABSTRACT

A model for the strength of composite beams with reinforced web openings is presented. All of the models are based on the static theorem of ultimate strength of reinforced rectangular perforated composite beam and is compared to the test.

1. 序 論

오늘날 고층 철골구조물의 골조중에서 보는 합성보의 철골 웨브에 개구부를 뚫어 그것을 보강한 보강유공합성보 시스템이 많이 사용되고 있다.

이와 같은 구조시스템은 종래 보 밑으로 배치하던 설비용 덕트와 배관류등을 웨브에 개구부를 뚫어 이들을 관통시키므로서 건축물의 층고를 낮출 수 있는 장점을 가지고 있다.

철골보에 개구부를 갖는 유공보 및 보강유공보의 연구는 1953년 S.R. Heller등을 시작으로 J.E. Bower, P.B. Cooper, R.G. Redwood등에 의해 많은 연구가 되었다.

또한 합성보에 관한 연구는 1920년대를 시작으로, 1950년대 N. M. Newmark, I. M. Viest, 1977년 J. W. Fisher에 의해 합성보 거동의 중요한 지배인자로 생각되는 스터드 코넥터의 전단강도에 관한 연구가 발표되었고, 1978년 T. V. Galambos는 합성보의 종국내력 및 L. R. F. D. 방법에 의한 합성보의 저항계수에 관해서 발표하였다. 또한 R.G. Slutter, I. M. May, L. C. P. Yam등에 의해 많은 연구가 실시되었다.

유공합성보에 관한 연구는 1968년 Alabama 대학의 C . J. Granade가 장방형개구부를 가지는 합성보 실험을 처음 실시한 후

* 仁川專門大 副敎授 工博
** 全北産業大 副敎授
*** 朝鮮大 副敎授 工博
**** 東國大 敎授 工博
***** 江原大 敎授 工博

1980년 D. M. Todd와 P. B. Cooper는 Mccormick의 이론식을 무보강, 장방형유공합성보의 응력모델로 발전시켰다. 또한 1980년 Swartz와 Eliufoo는 비이렌딜 방법에 의한 유공합성보의 탄성해석방법을 개발하였다.

1982년 W. C. Clawson, D. Darwin은 실험을 통한 강도모델과 비교 연구하였다. 그러나 그의 해석 방법은 웨브의 개구부 주위에 발생하는 부가모멘트를 먼저 측정하여 유공합성보의 전단내력을 계산하기 때문에 개구부 길이가 적은 경우는 부가모멘트에 의한 전단내력이 Vierendeel 효과를 고려하지 않은 유공합성보의 전단내력을 초과하는 경우가 발생하였다. 그후 보강 유공합성보에 관한 연구는 W. C. Clawson, D. Darwin, Cho등에 의해 몇편의 연구논문이 발표되었으나 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 장방형 개구부를 가지는 유공합성보에 보강량 변화를 주요 파라미터로한 실험을 통하여 초기강성, 최대하중, 파괴성상, 개구부 변형 및 콘크리트 균열의 거동등을 해석결과와 비교 고찰하므로서 구조설계자료를 얻는데 연구목적을 둔다.

2. 理論解析

웨브에 장방형개구부를 갖는 유공합성보의 해석은 다음과 같이 가정할 수 있다.

1) 콘크리트의 압축응력도 (Fc)는 Whitney의 스트레스 브록에 의한 0.85Fc로 한다.
2) 콘크리트의 인장응력도는 무시한다.
3) 플랜지의 항복은 압축력 또는 인장력에 의해 결정된다.
4) 전단력은 웨브만이 균등하게 부담한다.
5) 철골단면의 웨브만의 항복은 Von Mises의 항복조건식에 따른다.
6) 응력반곡점은 개구부 중앙에서 발생한다.
7) 개구부 가장자리의 상하단면 파괴는 소성힌지파괴메카니즘에 의한다.

유공 합성보의 파괴메카니즘은 여러가지가 있으나 가장 일반적으로 발생하는 4힌지 파괴메카니즘 (4 hinge mechanism)을 선택하고 있다.

따라서 그림 1은 합성보 구조의 웨브에 개구부가 보강된 유공합성보의 단면 및 기호이다. 개구부 보강 단면 및 길이는 충분히 길게 하여 이것에 의한 보강효과의 감소는 없다고 가정한다.

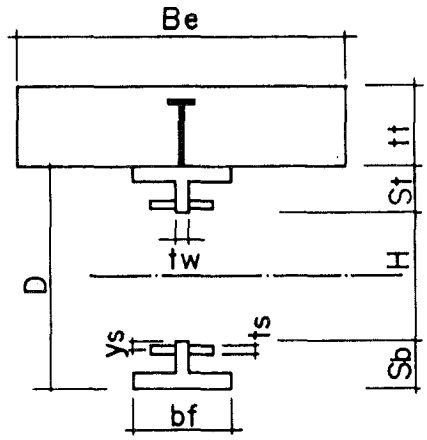

Fig. 1 Section of Composite Beam with Web Opening

그림 2는 개구부가 보강된 유공합성보에 작용하는 힘의 평형상태를 나타낸 것이다.

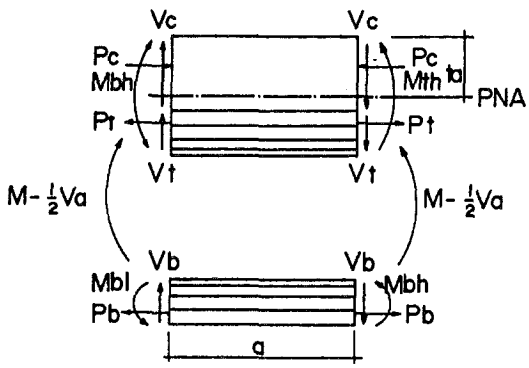

Fig. 2 Free Body Diagrams at Web Opening

그림 2에서 합성보 구조웨브에 보강 장방형 개구부를 갖는 유공합성보의 초기 모멘트는 2차부가모멘트와 축방향력에 의해 산정할 수 있다. 평형방정식을 구하면 다음과 같다.

$$Pc=Pt+Pb$$
$$V=Vt+Vb$$
$$Vb\cdot a=Mbl+Mbh \quad \cdots\cdots(1)$$
$$Vb\cdot a=Mtl+Mth$$
$$M=P\cdot z+Mth+Mbh-0.5\cdot V\cdot a$$

2-1 하부 티 (Bottom tee)

2-1-1 저모멘트부분

합성보의 개구부 하부 티에는 단면내에 전단력, 축방향력, 부가모멘트가 발생한다.

합성보의 개구부에 정휨모멘트가 발생하면, 하부 티의 저모멘트단부는 인장력과 負附加모멘트를 받게된다. 또한 티 상부부분은 인장과 티 하부부분은 압축을 받게된다. 중립축은 플랜지 또는 웨브에 존재하게 된다. 합성보에 작용되는 휨모멘트의 증가로 축방향력은 점점 증가되며 중립축은 플랜지쪽으로 내려가게 된다. 최대축방향력 (Pu)는 Vb=0일때 얻어지며, 중립축은 플랜지의 밑부분에 있다(g=Sb).

$$Pu=Fyf(bf-tw)tf+Fyw\cdot Sb\cdot tw$$
$$+Fys(bs-tw)ts \quad \cdots\cdots(2)$$

중립축이 플랜지내에 있는경우 (그림 3참조) 하부 티의 종국휨모멘트는 다음 (3)식과 같다.

$$Mbl=Fywr\cdot tw\cdot g\cdot\{(g/2)+((Sb-g)/2)\}$$
$$+Fys\cdot ts\cdot(bs-tw)\cdot\{(Sb-g)/2)+(g-ys)\}$$
$$+Fyf(bf-tw)(Sb-g)\{((Sb-g)/2)$$
$$+(tf-Sb-g/2)\} \quad \cdots\cdots(3)$$

2-1-2 고모멘트부분

합성보에 정모멘트가 부가되면, 하부 티는 인장력과 정부가모멘트를 받게 된다.

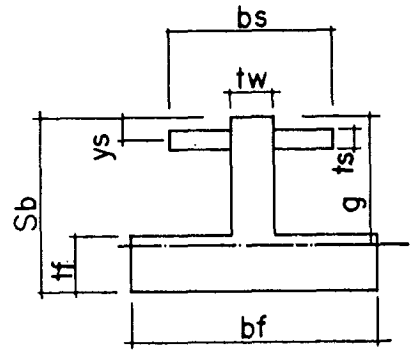

Fig. 3 Section of Bottom Tee

티의 상부분은 압축력과 티의 하부분은 인장력을 받게된다. 하부 티의 소성힌지화됨에 따라 인장력이 증가로 인해 중립축은 플랜지로부터 웨브쪽으로 이동하게 된다.

$$Mbl=Fywr\cdot g\cdot tw\cdot(g/2+yb)$$
$$+Fys\cdot ts\cdot(bs-tw)(g-ys+yb) \quad \cdots(4)$$

2-2 상부 티 (Top tee)

상부 티도 합성보에 정휨모멘트가 작용되면 하부 티와 같이 전단력, 축방향력, 부가모멘트가 작용된다.

상부 티는 서로 다른 2개의 이질 재료인 콘크리트와 철골로 구성되어 있으므로 각각 단면의 강도평가를 하여야한다(그림 4).

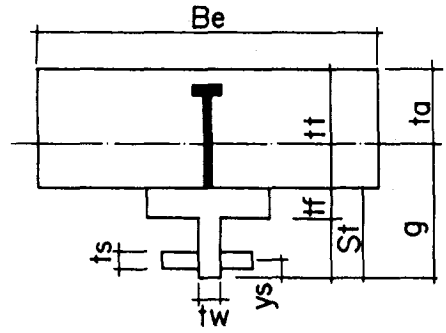

Fig. 4 Section of Top Tee

상부 철골 티와 콘크리트 슬래브에서 전단

력을 부담한다.

$$Vt = Vc + Vs \quad \cdots\cdots(5)$$

철골 티의 전단응력도는

$$Ts = Vs/St \cdot tw \quad \cdots\cdots(6)$$

콘크리트 슬래브의 전단응력도는

$$Tc = Vc/Be \cdot tt \quad \cdots\cdots(7)$$

여기서 작용전단력이 철골웨브의 소성전단내력보다 적거나 같으면 모든 전단력은 철골티가 부담하는 것으로 한다. 철골 티에서 플랜지는 웨브와 콘크리트 슬래브가 완전히 소성화 될때까지 전단력을 부담하지 않는 것으로 가정한다.

$$Vpt = St \cdot tw \cdot Fy/3^{1/2} \quad \cdots\cdots(8)$$

만약 상부 티에 순수전단력(Pure shear)만이 작용되면, 상부 티의 반곡점에서의 전단력은

$$Vt(sh)max = Fc^{1/2} \cdot Be \cdot tt^2 + Vpt \quad \cdots\cdots(9)$$

2-2-1 저모멘트부분

중립축이 웨브내에 있는경우 저모멘트구간에서 철골 티가 부담하는 종국휨모멘트는

$$\begin{aligned} Mtl = {} & Fywr \cdot (bf - tw)(St - g)\{((St - g)/2) \\ & + yt\} + Fyf(bf - tw) \cdot tf \cdot (St - g \\ & - (tf/2) + yt) - Fyr \cdot Ast \cdot (tt - dt \\ & + St - g - yt) \quad \cdots\cdots(10) \end{aligned}$$

또한 중립축이 플랜지내에 있는 경우

$$\begin{aligned} Mtl = {} & Fyf(bf - tf)(St - g)\{((St - g)/2) + yt\} \\ & + Fys \cdot Ast \cdot (tt - dt + St - g + yt) \quad \cdots(11) \end{aligned}$$

2-2-2 고모멘트부분

상부 티의 고모멘트부분은 압축력과 정부가모멘트가 발생한다.

상부 티에는 정부가모멘트가, 콘크리트슬래브와 상부 티의 상부에는 압축력, 상부 티의 하부분은 압축력이 발생한다.

중립축이 웨브내에 있을 때 종국휨모멘트는 (12)식과 같다.

$$\begin{aligned} Mth = {} & Fyf \cdot Af(bf - tw)\{(St - g - (tf/2) + yt\} \\ & + Fywr \cdot tw(St - g)\{((St - g)/2) + yt)\} \\ & + Fyr \cdot Ast(St - g - Dt + tt + yt) \\ & + 0.85 \cdot Fc \cdot Be \cdot ta\{St - g + tt - (ta/2) \\ & + yt\}/n \cdot nl \quad \cdots\cdots(12) \end{aligned}$$

중립축이 플랜지내에 있는경우 종국휨모멘트는 (13)식과 같다.

$$\begin{aligned} Mth = {} & Fyf(bf - tw)(St - g)\{((St - g)/2) + yt\} \\ & + Fywr \cdot tw \cdot (St - g)\{((St - g)/2 + yt\} \\ & Fys \cdot Ast \cdot (tt - Dt + St - g + yt) \\ & + 0.85 \cdot fc \cdot Be \cdot ta\{St - g + tt \\ & - (ta/2) + yt) \quad \cdots\cdots(13) \end{aligned}$$

중립축이 콘크리트 슬래브속에 있는경우 종국휨모멘트는 (14)식과 같다.

$$\begin{aligned} Mth = {} & Fys \cdot Ast \cdot (St + tt - Dt - g + yt) \\ & + 0.85 \cdot Fc \cdot Be \cdot ta \cdot \{tt + St - g \\ & - (ta/2) + yt\}/n \cdot n1 \quad \cdots\cdots(14) \end{aligned}$$

3. 試驗體

3-1 시험체 계획

시험체에 사용된 철골보는 압연 H 형강 H-200×100×5.5×8, L-2400mm를 사용하였다. 재하점 및 지점에는 보강스티프너를 6mm 플레이트로 용접하였다.

시험체는 모멘트에 대한 전단력비(M/V)가 80이 되게 제작하였다.

철골보 웨브에 배치한 개구부의 높이 및 폭

은 철골보 높이의 70%인 140mm와 개구부 높이의 2배인 280mm로 철골보 높이의 중앙에 오도록 산소로 절단하고, 4모서리에는 응력집중현상을 방지하기 위하여 5mm의 곡율을 두었다.

또한 개구부 보강은 수평보강판 두께를 3, 6, 8mm로 변화를 주어 모살용접하였으며, 3시리즈 시험체는 수평 및 수직보강판의 두께를 모두 8mm로 모살용접하였다.

쉬어 코넥터는 16×80mm스터드 코넥터를 철골보 플랜지에 용접 접착하고, 스터드 코넥터 소요수량은 강구조계산규준 및 해설에 준하여 구했다.

합성보의 합성율은 완전합성보(100%)와 불완전합성보(50%)로 설계하였다.

콘크리트 슬래브에 사용된 콘크리트의 설계기준 강도(Fc)는 210kg/cm²인 레이디 믹스트 콘크리트를 사용하며, 슬래브 두께는 9cm, 폭은 460mm로 하였다.

보강철근은 SD30로 철근콘크리트 슬래브 구조규준의 최소철근비에 적합하게 장변방향에 D13을 4개, 단변방향에 D13을 200mm 간격으로 설계하였다.

그림 5는 보강 유공 합성보 단면 및 치수를 나타낸 것이다.

표 1은 재료의 기계적 성질을 나타낸 것이다.

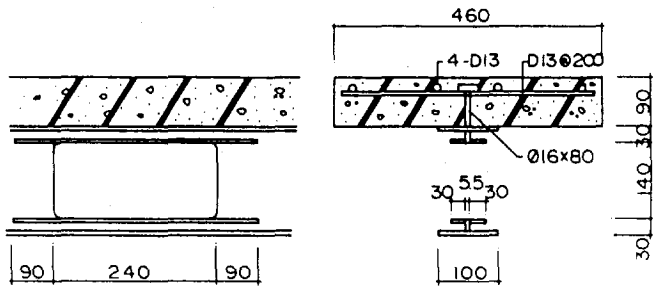

Fig. 5 Cross Section at Web Opening

Table 1. Material Properties

시험편	σ_y (t/cm²)	σ_b (t/cm²)	E(×10³) (t/cm²)	신율 (%)
FI-8 mm	3.15	4.98	2.021	27.50
W-5.5 mm	3.53	5.16	1.993	29.85
3, 6, 8 mm	3.35	5.05	2.035	32.93
SD30 D13	3.52	4.86	2.15	24.6
STUD 16	3.95	5.23	2.05	24.6
콘크리트	—	0.202*	—	—

주) *는 콘크리트의 압축강도임.

3-2 재하 및 측정방법

재하방법은 유압식 만능시험기에 설치하여 시험체에 집중하중이 작용하도록 가력하였다. 또한 만능시험기의 하중—처짐 자기기록계와 하중속도계를 참고로 탄성역에서는 하중속도를 일정하게, 항복후에는 시험체의 변형상태를 기준하여 재하하였다.

변위 측정은 변위 변환계를 시험체의 중앙부와 개구부 하부에 설치하여 측정하였다.

사진 1은 시험체 설치전경이다.

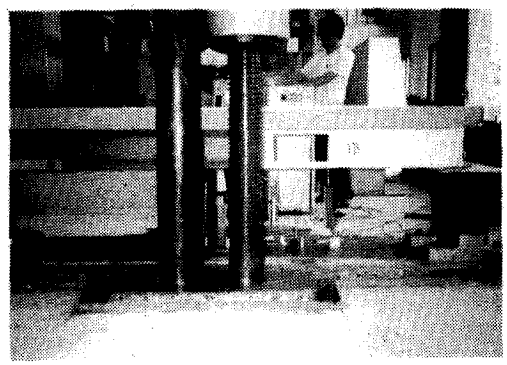

Photo. 1 General Test Arrangement.

4. 實驗結果 및 考察

그림 6은 9개 시험체의 하중－처짐곡선을 나타낸 것이다.

표 2는 각 시험체의 실험결과 값을 나타낸 것이다. 각 시험체의 초기 강성 및 초기균열, 최대하중, 파괴성상, 개구부 변형 및 콘크리트 균열의 거동등을 고찰한다.

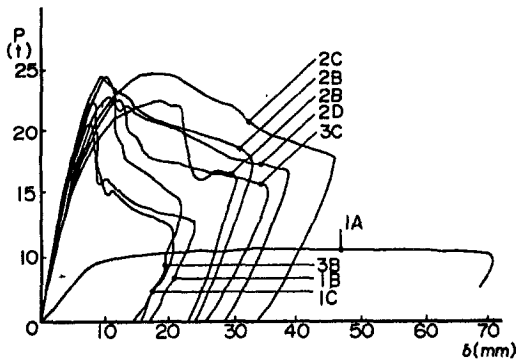

Fig. 6 Load-Deflection Characteristics of Composite Beams

4-1 초기강성 및 초기균열

1시리즈 시험체의 완전합성보인 1B시험체와 불완전합성보인 1C시험체의 강성은 1B시험체에 비해 1C시험체가 약 85%의 초기강성을 나타내고 있다.

그러나 보강한 2시리즈 시험체는 2B시험체에 비해 97～98%의 초기강성을 나타냈다.

초기균열은 각 시리즈별로 완전합성보와 불완전합성보에 관계없이 최대하중의 43～74%에서 초기균열을 일으켰다.

4-2 최대하중 및 파괴성상

완전합성보인 1B시험체와 2B시험체에서 수평보강인 2B시험체가 무보강인 1B시험체에 비해 1.2배의 내력상승을 나타냈다.

불완전합성보인 경우에 무보강 1C시험체와 수평보강인 2C, 2D, 2E시험체의 비교에서 1.21, 1.13, 1.11배로 수평보강량이 많을수록 내력 상승을 나타냈다.

무보강인 1B시험체와 1C시험체의 비교에

Table 2 Test Results

시험체명		초기 균열 (t)	최대 하중 (t)	실험결과		Vmax — V (t)	Mmax — M (tcm)
				Vmax (t)	Mmax (tcm)		
1시리즈	1A	–	5.65	2.825	225.718	–	–
	1B	8	16.5	8.25	651.75	1.22	0.85
	1C	6.5	15.5	7.75	613.8	1.15	1.14
2시리즈	2B	11	19.8	9.9	789.03	0.96	0.81
	2C	8	18.8	9.4	745.42	0.91	1.02
	2D	10.8	17.5	8.75	691.25	0.92	1.01
	2E	11.2	17.25	8.625	688.275	1.08	1.11
3시리즈	3B	14	18.8	9.4	743.544	1.02	0.91
	3C	9	17.49	8.745	691.73	0.85	0.95

1A
- A(철골보), B(100%), C(50%)
- 1(무보강), 2(수평보강)
- 3(수직 수평보강)

서 불완전합성보인 1C시험체는 완전합성보인 1B시험체의 약 94%의 내력을, 수평보강인 경우 2B시험체와 2C시험체의 비교에서 불완전합성보인 2C시험체가 완전합성보인 2B시험체의 약 95%의 내력을 나타냈다.

수평보강량을 변화시킨 2시리즈시험체에서 보강판의 판폭-두께비가 5이상인 보강판 두께가 6mm이상인 2D, 2E시험체에서 개구부 단부의 고모멘트부근 상부 보강 플레이트가 최대하중이후에 좌굴현상을 나타내면서 파괴되었다(사진 2참조).

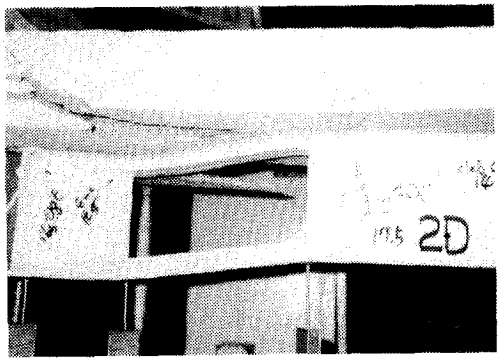

Photo. 2 Stiffener Buckling of 2D Specimen

무보강시험과 수평보강시험체의 파괴는 모두 비이랜딜적 파괴모드를 나타냈다.

수평 및 수직보강인 3시리즈 시험체의 경우, 불완전 합성보인 3C시험체가 완전합성보인 3B시험체의 93% 내력을 나타냈다.

수평보강한 2시리즈 시험체와 수평, 수직보강한 3시리즈 시험체에서 비슷한 합성율인 경우 보강량에 관계없이 비슷한 내력에서 파괴되는 것으로 나타났다.

이상으로부터 수평보강 또는 무보강인 모든 불완전합성보의 시험체는 완전합성보시험체의 93~95%의 내력에서 최대하중에 도달하는 것으로 나타났다.

또한 모든 시험체의 파괴성상은 콘크리트가 합성효과를 발휘할때까지는 내력의 상승을 나타냈으나 최대하중 이후 콘크리트의 붕괴와 개구부의 상하부 티에 2차부가모멘트에 의한 급격한 내력 감소현상을 나타냈다.

4-3 개구부의 변형

철골 유공보인 경우는 최대하중이후 개구부 4모서리에서 소성힌지 발생과 함께 비이랜딜적 파괴모드를 나타내면서 개구부 모서리의 균열후 횡좌굴에 도달, 파괴되었다(사진 3참조).

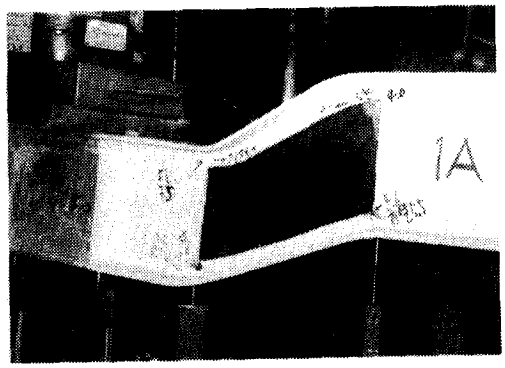

Photo. 3 Failure in Steel Beam No.1

무보강인 1시리즈의 시험체인 1B, 1C의 개구부 모서리에서의 소성힌지는 개구부의 폭이 철골보 높이 보다 큰 경우에 대략 철골보 높이와 비슷한 길이에서 소성힌지가 나타나는 것으로 관찰됐다.

유공합성보의 개구부 변형은 전단력이 증가함에 따라 하부의 티에 2차부가모멘트가 발생하여 인장력에 의한 항복과 더불어 소성힌지가 발생되며, 상부 티에 개구부 단부의 고모멘트부분에서 소성힌지가 발생하면서 초기 휨에 의한 중립축이 상부 티에 있는 동안 하부 티는 인장부재로서 작용하면서 뚜렷한 비이렌딜효과를 나타냈다. 이러한 개구부 상부 하부 티에 의해 2차부가모멘트는 전단력의 전달에 의해 4모서리의 소성힌지와 비이렌딜적 파괴에 도달했다(사진 4참조).

그러나 휨모멘트와 전단력이 큰 구간에서의 개구부의 높이 및 길이는 최대하중후 급격한 내력 저하를 방지하기 위하여 세심한 설계를 하여야 한다.

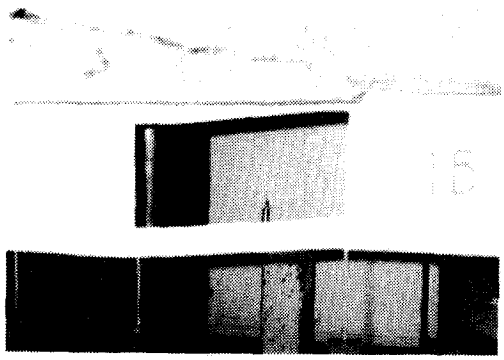

Photo. 4 Plastic Hinge of 4 Corner

4-4 콘크리트 균열

콘크리트 슬래브의 균열은 개구부 단부의 고모멘트부근의 하중점과 개구부부부근 사이에서 일어났다.

초기 개구부 단부의 고모멘트부근 콘크리트 슬래브의 균열은 초기 휨모멘트에 의한 것이다. 콘크리트 슬래브 균열의 범위는 고모멘트부근의 개구부 단부에서 저모멘트 개구부부근의 슬래브 하부까지 경사지게 나타났다. 이러한 현상은 개구부 사이에서 전단력의 증가로 인한 2차부가모멘트증가에 의한 현상으로 생각된다.

하부 티의 중립축은 항복의 시작으로 상승하고, 상부 티의 인장응력이 콘크리트 슬래브 인장강도를 초과하므로 콘크리트 슬래브의 인장균열이 발생하게 된다. 이러한 콘크리트 슬래브 인장균열은 개구부 단부의 고모멘트부근의 슬래브 하부면에서 먼저 발생한다.

콘크리트 슬래브속의 보강철근이 압축력에 대한 저항능력을 발휘하므로 급진적인 균열의 진전은 발생하지 않았으나, 콘크리트 슬래브와 철골보의 슬립이 발생한 최대하중의 약 50~60%에서 콘크리트 균열의 진전이 빨리 진전되었다.

최대하중 이후에서 콘크리트 슬래브 상부면은 철골보와 분리, 들뜨는 현상을 나타냈다. 균열의 상태는 개구부 전 구간에 걸쳐서 고모멘트부근의 콘크리트 슬래브 상부면에서 저모멘트부근의 콘크리트슬래브 하부쪽으로 진전되었다.

4. 結　　論

이상의 실험으로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 무보강 시험체에 비해 수평보강 시험체가 1.1~1.2배의 내력상승을 나타냈으며, 합성율 변화에 따른 내력변화는 불완전합성보인 경우가 완전합성보에 비해 93~95%의 내력을 나타냈다.

2. 수평, 수직보강한 시험체는 수평보강만을 한 시험체와 합성율이 같은 경우에 비슷한 내력을 나타냈다.

3. 무보강 시험체의 개구부 소성힌지는 철골보 높이에 해당 만큼의 길이로 발생하는 것으로 나타났다.

4. 휨모멘트와 전단력을 크게 부담하는 구간의 개구부는 최대하중후 2차부가모멘트에 의한 급격한 내력저하방지를 위한 적절한 설계가 필요하다.

5. 본 이론식에 의한 해석결과와 비교적 양호하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

REFERENCES

1. N. M. Newmark, C. P. Siess, I. M. Viest : Test and analysis of Composite Beams with Incomplete Interaction, Proceeding of the society for Experimental Stress Analysis, Vol. 9, No. 1, 1951
2. J.W.Fisher : Design of composite Beams with Formed Metal Deck, AISC Engineering Journal, May. 1970
3. T.V. Galambos : Composite Beam Criteria in LRFD, Journal of the Structural Division, ASCE. Vol. 104, No. St. 9, September, 1978
4. D.M. Todd, P.B. Cooper : Strength of

Composite Beams with Web Opening, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. St2, February, 1980
5. W.C. Clawson, D. Darwin : Tests of Composite Beams with Web Opening, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. St1, January, 1982
6. W.C. Clawson, D. Darwin : Strength of Composite Beams with Web Openings, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. St3 March, 1982