

反復荷重을 받는 鐵筋 콘크리트 보의 塑性힌지 移動에 關한 實驗的 研究

An Experimental Study on the Relocating Plastic Hinging Zones of Reinforced Concrete Beams Subjected to Cyclic Loads

○ 金 潤 一* 崔 彰 植** 千 榮 洙** 徐 洙 演** 李 利 衡***
Kim, Y. I. Choi, C. S. Chun, Y. S. Seo, S. Y. Lee, L. H.

ABSTRACT

In this paper an experimental approach of the relocation plastic hinging zones of nine reinforced concrete exterior beam-column subassemblages under cyclic loads was tried. The main parameters of the testing program were location of the plastic hinge, difference of the special reinforcement, inclined or intermediate layers of longitudinal reinforcement, applied maximum shear stress. The conclusions presented herein are based on the limited tests conducted. Inclined or intermediate layers of longitudinal reinforcement and extra top and bottom steel in the beam over a specific length can be used to move the beam plastic hinging zone away from the column face. But, for the use of intermediate layers of longitudinal reinforcement, shear reinforcement detail need further investigation.

1. 序 論

보 부재가 구조물의 地震 에너지를 주로 負擔한다는 것은 결국 보에 형성되는 塑性 힌지부의 變形을 통하여 이루어져야 하지만, 이 塑性 힌지의 영역이 작아 변형과 그 피해가 한 곳에 집중되는 것은 바람직스럽지 못하므로 가능한 보의 塑性 힌지부를 넓혀 변형과 피해를 확산 시켜야 한다. 그러나 현행 기준(ACI 318-83) 등에 따라 설계된 보에서는 塑性 힌지가 보-기둥 接合面에서 형성되고, 특히 보가 높은 剪斷應力(약 $4\sqrt{f'c}$ psi 이상)을 받을 때 에는 剪斷 龜裂에 따른 隣接 현상으로 인하여 剛성과 에너지 消散 能力的 현저한 低下가 나타나며, 또한 기둥-보 接合面 부근에서 발생한 미끄러짐 剪斷 龜裂을 스테럽이나 후프와 같은 剪斷補強만으로 저항할 수 없음이 밝혀졌다. [1,2] 더욱이 보-기둥 接合面에 형성된 塑性 힌지부의 변형과 피해는 接合部內로 확장되어 접합부의 치명적 피해의 원인이 될 수 있다. 따라서, 보 塑性 힌지부의 變形과 被害를 擴散, 移動시키고 剛性的 심각한 저하를 방지하여 에너지 消散 能力을 증대시킬 수 있는 配筋設計 方法에 대한 研究가 要求된다.

이에 대한 研究로는 Bertero 와 Popov가 주근의 일부를 벤트 시키거나 절곡된 철근을 사용하여 2개의 内部 接合部를 실험한 것을 비롯하여, 城 攻, 紫田 拓二等은 일정 위치에서 구부린 철근을 상단부에 첨가시킨 4개의 内部 接合部를 實驗하였다. 또한, Park 와 Paulay는 4개의 內, 外部 接合部 實驗에서 보 主筋을 기둥과의 接合面으로부터 보춤의 1배 거리 위치에 定着시킴으로써 塑性 힌지를 移動 시키고자 하였다. 또한 Abdel-Fattah 와 Wight는 材軸方向 中間鐵筋 補強方法을 이용하여 12 개의 内部 接合部를 實驗함으로써 설계 방법을 제한하고 있으나 여전히 剪斷 스펜비, 剪斷補強筋의 間隔, 그리고 슬래브의 효과를 研究의 課題로 提示하였다.

이에 본 研究에서는 中間鐵筋을 利用한 移動 효과와 그 效用範圍를 淸明하고, 또한 主筋의 一部를 X字形으로 벤트 시켰을 때 塑性 힌지부의 移動과 그 履歷舉動의 증진 효과를 밝히고자한다.

2. 實 驗

2.1 試驗體 計劃

試驗體는 라멘 骨造 中층부의 外部 보-기둥部(T字形)를 實大 치수로 9 개의 試驗體를 製作하였으며, 주요 試驗體에 대한 配筋 狀況은 그림 2.1과 같다.

塑性 힌지를 移動 시키기 위하여, 기둥과의 接合面에 작용한 剪 力 모멘트(Ma)가 ACI 標準式에 의한 斷面의 降伏모멘트(My)를 넘지 않도록 계획 되었으며, 剪 力 強度比(Mr)값, 引張 鐵筋量과 壓縮 鐵筋量의 比, 接合部 剪斷應力度 등이 강한 기둥-弱한 보의 設計 概念으로 考慮되었다. 剪斷補強 및 定着등에 관하여서는 ACI 318-83 耐震規定에 根據 하였으며, 試驗體 計劃表는 表(2-1)과 같고, 試驗體의 變數는 다음과 같다.

- 1) 塑性 힌지 移動을 위한 配筋 方法
 - i) 中間鐵筋 使用
 - ii) X字形 벤트 鐵筋 使用
- 2) 剪斷 스펜비와 最大 剪斷 應力度
- 3) 기둥 接合面에서의 剪 力 耐力比(Mn/Ma)

2.2 加力 및 測定裝置

그림 2.2에 試驗體의 設置 狀況을 나타내었다. 試驗體는 기둥 兩端部에서 수평축 회전가능할 支持狀態였으며, 反復荷重은 보 端部에 미리 埋立하여 놓은 파이프를 통하여 反力壁에 附着된 Actuator(50t)를 보에 縮結함으로써 導入되었다. 또한 기둥 軸力 導入을 위하여 기둥 한쪽 端部에 Actuator(50t)를 縮結하였고, 다른쪽 端部에는 反力 프레임을 設置하였다. 보 상단부에 變位 調節用 LVDT를 設置하고 이를 制御 시스템에서 Actuator 와 연결하였다. 主筋 및 剪斷 補強筋의 變形度는 미리 埋立해 놓은 스트레인 게이지로 測定되었으며 荷重點 變位와 塑性 힌지부의 剪 力 變位, 剪斷變位는 LVDT에 의하여 測定되었다.

* 正會員, 關東大 助教授
** 正會員, 漢陽大 大學院
*** 正會員, 漢陽大 教授, 工博

表 2.1 試驗體 計劃表

시험체명	a/d	Vmax (√fc)	Mn1 at col.f (t.cm)	Myl at col.f (t.cm)	Mn2 at hinge (t.cm)	My2 at hinge (t.cm)	Ma at col.f (t.cm)	Mc (t.cm)	MR Mc/Ma	MR Mc/Mn	기동면 비균		한치면 비균	비고 (L)
											주 균	보조균	주 균	
C 25	2.57	5.44	1687	1658	1687	1658	1687 Ma=Mn1	2133	2.5	2.5	2HD22+2HD19	-	2HD22+2HD19	A.C.I (0.9 m)
C 42	4.28	2.79	1465	1435	1465	1435	1465 Ma=Mn1	1905	2.6	2.6	3HD22	-	3HD22	A.C.I (1.5 m)
1M25	2.57	5.30	2134	1850	1003	972	1641 Ma(Myl)Mn1	2133	2.6	2.0	2HD22+2HD19 (중간철근)	2HD16	2HD22	한치이동 (0.9 m)
1M4	3.14	3.98	1917	1634	1003	972	1470 Ma(Myl)Mn1	1905	2.6	2.0	3HD22	2HD16 (중간철근)	2HD22	한치이동 (1.1 m)
1M42	4.28	2.79	1902	1619	1107	1077	1444 Ma(Myl)Mn1	1905	2.6	2.0	4HD19	2HD16 (중간철근)	3HD19	한치이동 (1.5 m)
DM25A	2.57	5.30	1966	1909	1003	972	1641 Ma(Myl)Mn1	2133	2.6	2.2	2HD22+2HD19	2D16 (X자보강)	2HD22	한치이동 (0.9 m)
DM25B	2.57	5.30	1771	1688	1003	972	1641 Ma=Myl)Mn1	2133	2.6	2.5	3HD22	2D16 (X자보강)	2HD22	한치이동 (0.9 m)
DC25	2.57	5.44	1687	1658	1687	1658	1687 Ma=Mn1	2133	2.6	2.6	2HD22+2HD19	-	2HD22+2HD19	한치보강 (0.9 m)
DM4	3.14	3.98	1771	1688	1003	972	1470 Ma(Myl)Mn1	1905	2.6	1.9	3HD22	2D16 (X자보강)	2HD22	한치이동 (1.1 m)

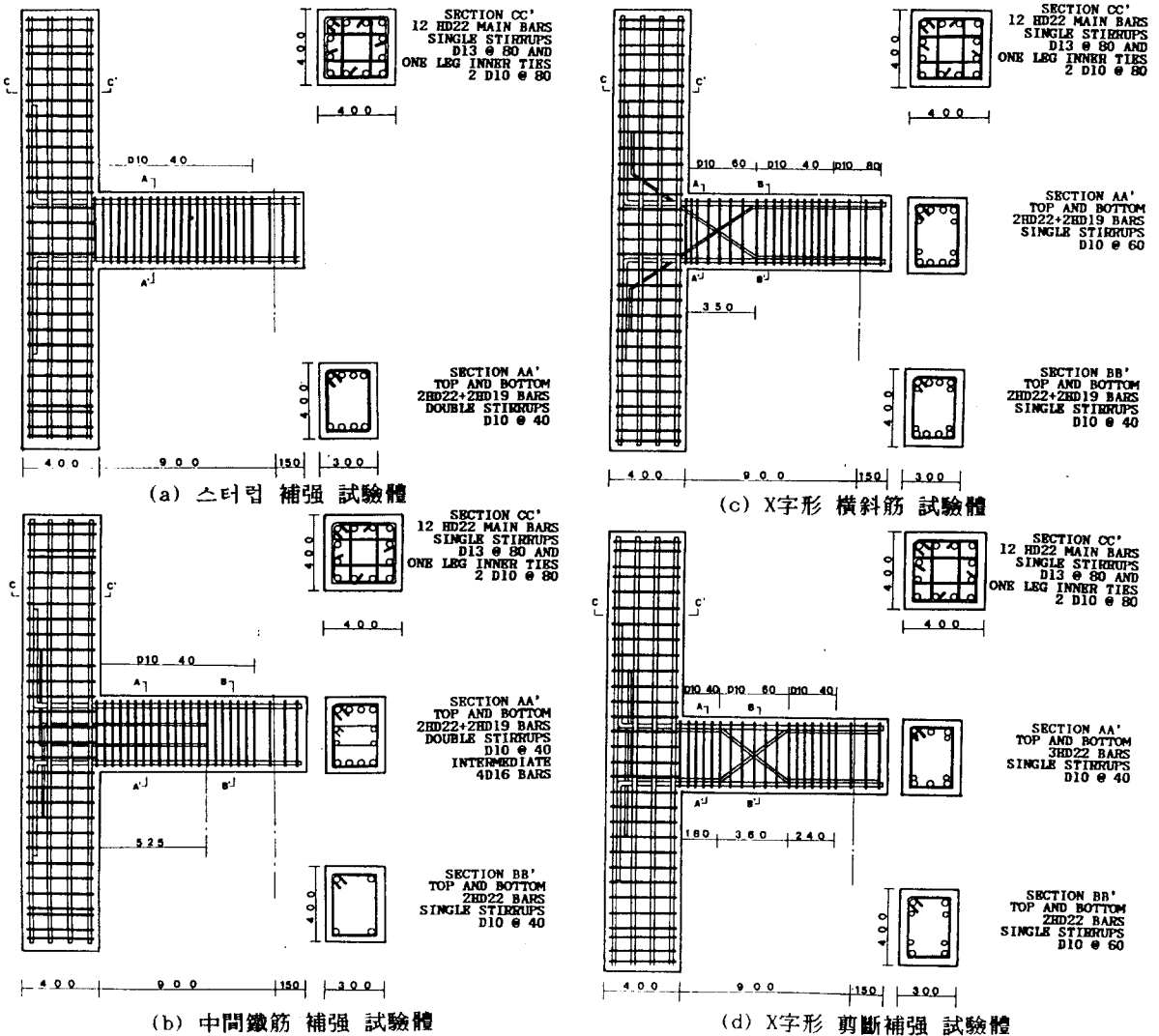


그림 2.1 試驗體 配筋狀況

2.3 荷重 및 變位履歷

보 단부의 Actuator에 의해 도입된 反復荷重은 荷重 作用點에 附着된 LVDT 의하에 荷重點 變位가 調節됨으로써 制御 되었으며, 適用된 變位履歷 프로그램은 그림 2.3과 같다. 初期 降伏 以前 4 사이클의 加力는 試驗體의 設置 狀況과 데이타 記錄 裝置의 檢査를 위한 것이고, 그 以後 사이클의 變位 스텝은 降伏 變位에 대한 比率, 즉 延性比에 따라 增加 되었다. 一定 變位에서는 4 사이클을 加力하여 剛性 및 強度 低下를 파악코자 하였다.

2.4 材料 試驗

試驗體 製作에 使用된 鐵筋 및 콘크리트의 材料 試驗 結果는 表 2.2 및 表 2.3과 같다.

3. 實驗結果 및 分析

3.1 龜裂 및 破壞狀況

表 3.1은 각 試驗體의 實驗 結果를, 사진 1은 實驗 終了時 試驗體의 破壞 狀況을 나타낸다.

塑性 힌지가 移動 되지 않는 C42 와 C25 試驗體는 대체로 初期 降伏 以後 기둥과의 接合面에서 顯著하게 進行되기 시작한 미끄러짐 剪斷 龜裂과 斜引張 龜裂의 進展과 함께 콘크리트의 壓壞로 終局 破壞에 이르렀다. 이때 接合部의 斜引張 龜裂 被害가 상당히 나타났다.

中間 鐵筋을 使用한 IM42, IM34, IM25 試驗體의 경우에는 主筋의 一部가 切斷된 位置에서 發生된 龜裂이 變位 延性比의 增加에 따라 剪斷 龜裂과 연결되면서 接合面 쪽으로 擴散되어 갔다. 그러나 接合面 미끄러짐 剪斷 龜裂과 接合部의 龜裂은 미소하게 나타났다.

X 字形 벤트筋으로 配筋된 DM34, DM25A, DM25B 試驗體의 경우 荷重의 反轉이 進行됨에 따라 接合面에서 부터 보 축의 1배 거리 떨어진 位置에

서 發生된 龜裂이 깊어지면서 剪斷 龜裂로 擴大되어 갔으나, 變位 延性比 값이 대략 3 以上에서 龜裂은 기둥 接合面 쪽으로 擴散되어 갔으며, 終局的으로는 接合面 附近에서의 剪斷 龜裂이 깊어지면서 콘크리트 壓壞가 發生하고 被服이 剝離되어 破壞에 이르렀다. 따라서 塑性 힌지部는 接合面까지 擴散되고 있음을 보여주었다.

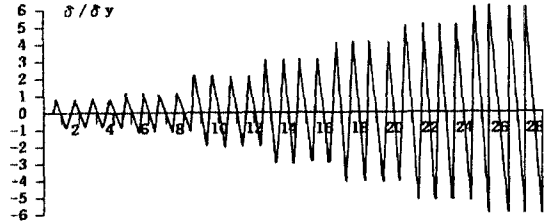


그림 2.3 變位 履歷

表 2.2 콘크리트 壓縮強度 實驗結果

구분	압축강도 (kg/cm ²)				높이 (cm)	단면적 (cm ²)	단성계수 (t/cm ²)	슬럼프 (cm)
종류	28일	30일	41일	62일				
f _{cc} '	278.4	279.8	286.2	289.4	20.5	78.6	217.3	16.5

表 2.3 鐵筋의 引張強度 實驗結果

종류	구분	단성계수 (t/cm ²)	항복응력도 (t/cm ²)	항복변형도 (x10 ⁻³)	최대응력도 (t/cm ²)	신율 (%)
MD	MD22	2117	4.122	2118	6.701	24.3
	MD19	1937	3.958	2174	6.093	23.0
	MD16	2020	3.970	2209	6.718	21.1
	D13	2018	3.140	1101	4.677	21.2
D10		1981	3.580	2327	6.770	24.7

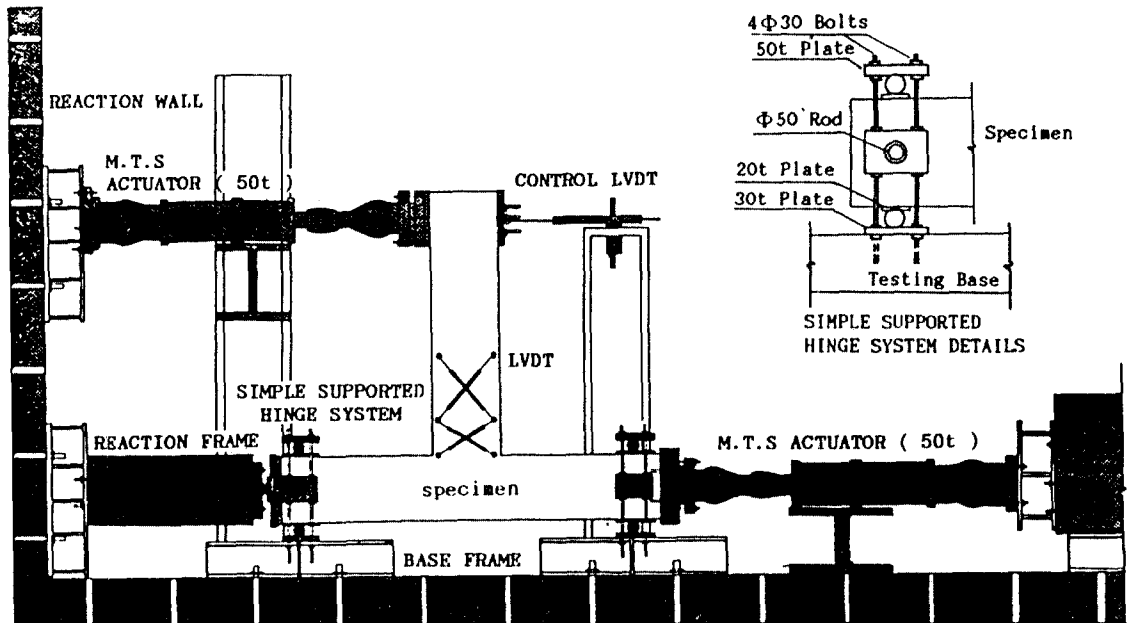


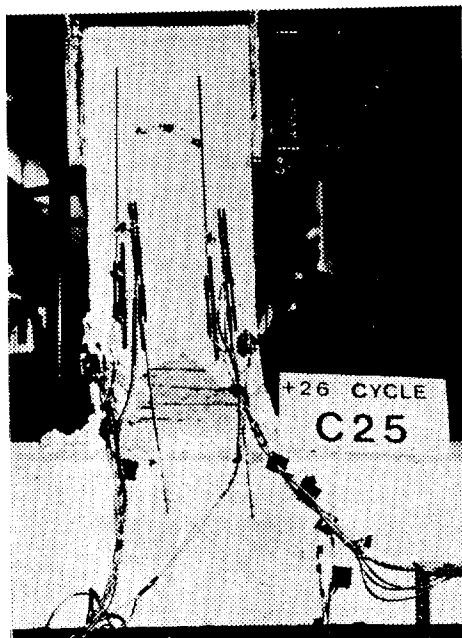
그림 2.2 試驗體 設置狀況

表 3.1 實驗結果表

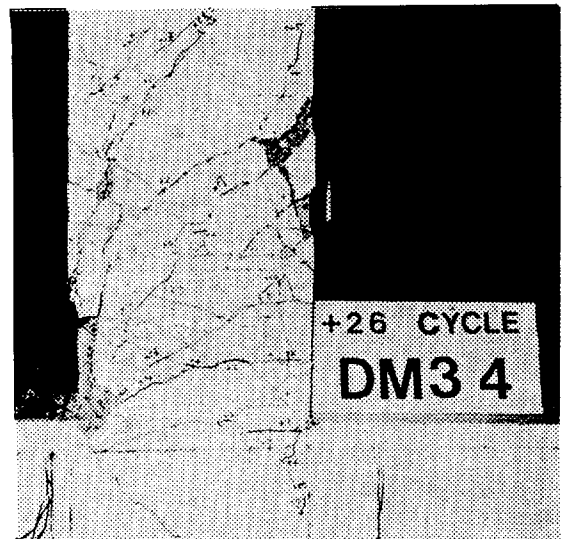
시험체명	(1) a/d	(2) nPm (ton)	(3) Vm ($\sqrt{fc'}$)			(4) My (at Col.)			(5) My (at ID)			(6) Mm (at Col.)			(7) Mm (ID)			(8) R ($\mu=3$)
			eVm	aVm	a/e	eMy	aMy	a/e	eMy	aMy	a/e	eMn	aMn	a/e	eMn	aMn	a/e	
C 25	2.57	23.07	5.44	5.05	0.93	1658	1848	1.11	1013	1129	1.11	1687	2076	1.23	1031	1268	1.23	406.6
C 42	4.28	11.93	2.79	2.61	0.94	1435	1560	1.08	1100	1196	1.08	1465	1789	1.22	1123	1372	1.22	485.2
IM25	2.57	26.36	5.30	5.77	1.09	1850	2137	1.15	972	1306	1.34	2134	2372	1.11	1003	1449	1.44	421.1
IM34	3.14	17.02	3.98	3.72	0.93	1634	1738	1.06	972	1185	1.22	1917	1872	0.97	1003	1276	1.27	477.2
IM42	4.28	12.31	2.79	2.69	0.96	1619	1581	0.97	1077	1212	1.12	1902	1845	0.97	1107	1414	1.27	326.6
DM25A	2.57	24.78	5.30	5.42	1.02	1909	2110	1.10	972	1289	1.32	1966	2230	1.13	1003	1363	1.35	608.8
DM25B	2.57	23.98	5.30	5.23	0.99	1688	2026	1.20	972	1238	1.27	1771	2158	1.22	1003	1319	1.31	631.0
DC25	2.57	26.72	5.44	5.84	1.07	1658	2232	1.34	1013	1364	1.34	1687	2403	1.42	1031	1472	1.42	514.7
DM34	3.14	17.53	3.98	3.84	0.96	1688	1827	1.08	972	1245	1.28	1771	1928	1.08	1003	1315	1.31	754.6

(1) 전단스팬비; (2) 측정된 최대각응하중; (3) 경험최대전단응력도 (eVm: 예상값, aVm: 측정값, a/e: 측정값과 예상값의 비교)
 (4)(5) 항복모멘트 (eMy: 예상값, aMy: 측정값, a/e: 측정값과 예상값과의 비교); (6)(7) 최대 각응모멘트 (eMm: 예상값, aMm: 측정값, a/e: 예상값과 측정값의 비교); (8) 소산된 에너지 (연성비(μ)3 까지, t: mm)

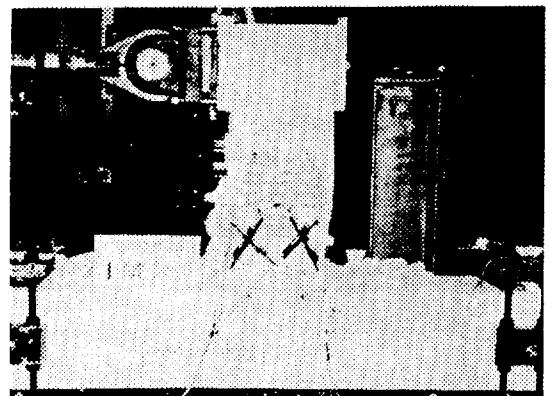
기둥과의 接合面에서 부터 보 축의 1배 거리 사이에서 X 字形의 橫斜筋으로 剪斷 補強 되어 있는 DC25 試驗體는 接合面 附近에서 初期 亀裂이 폭 넓게 增加되고 擴張되어 갔으나 斜引張 龜裂은 두텁하지 않았다. 延性比가 3 以上에서 부터는 대략 보 축의 1배 ~ 2배 거리 사이에서 斜引張 龜裂이 상당히 두드러지게 나타났다. 이로 인하여 試驗體는 終局破壞에 이르렀으며, 接合面의 미끄러짐 剪斷 龜裂 被害는 아주 미소 하였으나 接合部에서 심각한 斜引張 龜裂 피해가 나타났다.



(a) C25



(b) DM34



(c) IM25

사진 1. 試驗體 破壞狀況

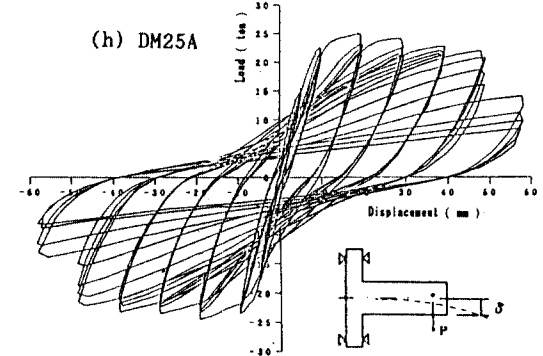
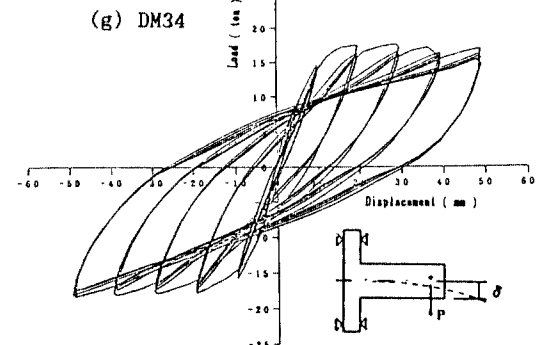
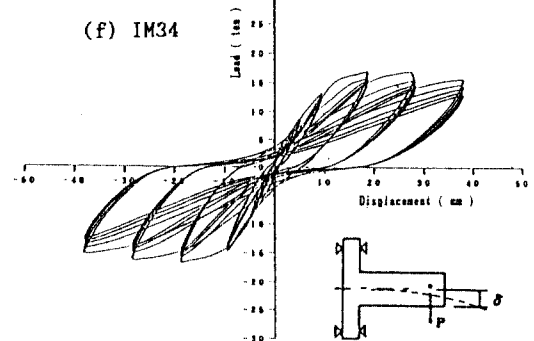
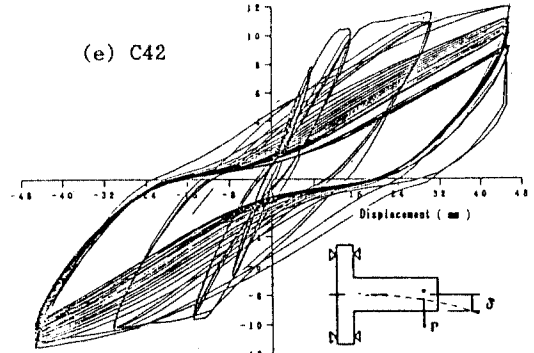
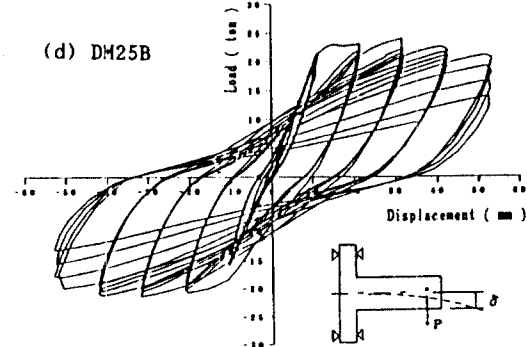
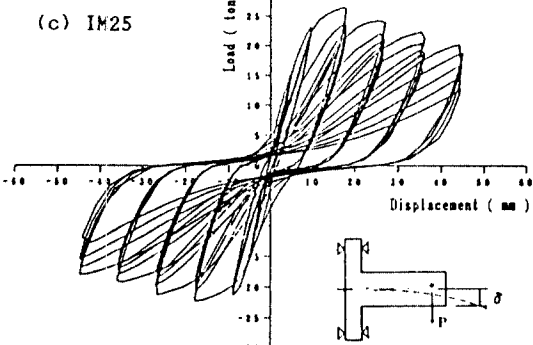
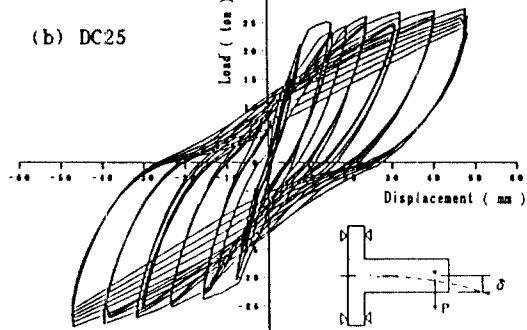
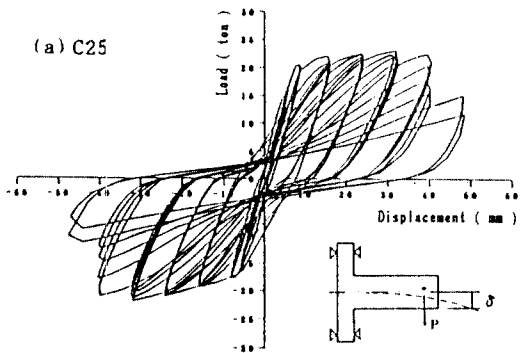


그림 3.1 荷重-變位 曲線

3.2 荷重 - 變位 曲線

각 試驗體에 대한 荷重-變位 曲線은 그림 3.1과 같다. 낮은 剪斷應力(約 $3.5 \sqrt{f'c}$ psi 以下)을 받는 試驗體 C42와 IM42는 安定된 履歷 舉動을 보여 주고 있다.

또한, X字形 벤트근으로 配筋된 DC34, M25A, DM25B 試驗體의 경우 剛性의 심각한 손실 없이 많은 양의 에너지를 消散함으로써 安定된 履歷 루프를 형성하고 있다.

그러나, 스테럽만으로 補強된 C25 試驗體와 中間鐵筋을 사용한 IM25 試驗體에서는 높은 剪斷應力을 받는 보에서 나타나는 전형적인 핀칭 현상을 보임으로써 심각한 剛性 및 強度의 低下가 나타났다.

특히, X字形 橫斜筋으로 補強된 DC25 試驗體는 補強되지 않는 C25 試驗體와 比較할 때 매우 우수한 履歷 舉動을 보여 주었다.

3.3 塑性 힌지 移動

IM42, IM34, DM34 試驗體는 延性비가 4 以上에서 接合面에 附着된 스트레인 게이지의 變形度가 降伏 變形度를 넘지 않았으며, 接合部의 龜裂 피해가 미소하게 나타났다.

IM25, DM25A 試驗體에서도 延性비가 3 以下에서는 동일 위치 接合面에 附着된 게이지의 變形度가 降伏 變形度를 넘지 않은 것으로 나타났다. 따라서 龜裂狀況과 스트레인 게이지의 結果로 볼 때, 試驗體들의 塑性 힌지는 接合面에서 內側으로 보춤의 약 1 배거리 位置로 移動하는 것을 알 수 있다.

中間鐵筋을 사용한 IM42, IM34, IM25 試驗體들은 塑性 힌지가 移動된 位置에서 終局破壞를 하지만, X字形 벤트 鐵筋으로 配筋된 DM34, DM25A, DM25B 試驗體들은 塑性 힌지가 처음 移動된 位置에서 延性비의 增加에 따라 接合面 쪽으로 擴大되어 終局破壞는 接合面 근방에서 나타났다. 이는 移動된 塑性 힌지에서 X字形 벤트 철근이 斜引張力에 직접 대응되어 抵抗하기 때문이다. 즉, 코아 콘크리트의 剪斷 破壞가 크게 지연 됨으로써 塑性 힌지부의 모멘트 抵抗能力의 低下가 상당히 緩和된다. 따라서 힘 철근의 降伏 範圍는 점차적으로 크게 擴大되고, 接合面에서 힘 철근이 降伏된 以後는 壓縮側 콘크리트의 壓壞가 나타나게 된다. X字形 벤트 철근으로 配筋된 試驗體의 이와 같은 履歷 舉動은 接合部 被害를 減少하면서 에너지 消散能力을 크게 向上 시킨다.

기둥과의 接合面에서 보춤의 1 배 거리 사이에 X字形 橫斜筋으로 剪斷補強된 DC25 試驗體가 매우 우수한 에너지 消散能力을 갖고 있지만, 接合部의 심각한 斜引張 龜裂被害를 받는 것과 비교하여 볼 때, 接合面에서 塑性 힌지가 發生하여 이를 보 內側으로 擴張시키는 방법보다는 塑性 힌지를 일정거리 만큼 移動시킨후 接合面 쪽으로 擴張시키는 방법이 더 效果的인 것으로 판단된다.

3.4 剛性 및 強度 低下.

中間鐵筋을 사용하여 塑性 힌지를 移動시킨 試驗體들은 荷重 反轉後의 初期 剛性 低下를 개시할 수 없고 있다. 현행 방법이라 塑性 힌지가 接合面 附近에서 形成될 때 미끄러짐 剪斷 龜裂이 履歷 舉動과 破壞에 큰 영향을 주어 中間鐵筋

補強이 상당한 效果가 있었다. 그러나 塑性 힌지가 移動 되므로써 미끄러짐 剪斷 龜裂의 被害가 크게 감소되고 被害에 대한 斜引張 龜裂의 影響이 相對적으로 增加되었다. 따라서 中間鐵筋으로는 初期剛性의 핀칭을 막을 수 없다고 판단된다.

한편, X자형 벤트 鐵筋으로 配筋된 試驗體에서는 이를 效果的으로 해결할 수는 있으나, 補強量이 過多할 경우에는 塑性 힌지를 接合部 內까지 擴張시켜 接合部의 被害를 가중시키게 된다. 그러므로 適습한 剪斷補強量, 스테럽 補強筋과 X字形 벤트근의 剪斷力 負擔 比率 등에 대하여 세심한 고려가 요구되며, 이는 기둥, 보의 抵抗 모멘트比와 관계되는 것으로 思料된다.

VI 結 論

이상의 研究로 부터 얻어진 結論을 요약하면 다음과 같다.

1) 中間鐵筋을 이용하였을 때는 塑性 힌지부가 분명히 移動되어 接合部 보호에 有用한 것으로 판단된다. 그러나 높은 剪斷力을 받아 나타나는 핀칭 현상을 제거하지 못하여 에너지 消散能力을 향상시키지는 못한다. 그러므로 中間鐵筋 補強은 최대 전단응력도가 대략 $3.5 \sqrt{f'c}$ psi 以下の 보에서 効果적인 것으로 사료된다.

2) 斜引張力에 직접 대응되면서 塑性 힌지를 移動시키고자 고안된 X字形 벤트 철근을 사용하였을 때는 延性비가 3 以下에서 소성 힌지가 분명히 移動되는 것으로 판단된다. 보가 큰 변위를 할 때는 소성 힌지가 접합면 쪽으로 확장되어 광범위하게 균열피해가 확산되고, 履歷 루프의 핀칭 현상이 거의 제거 되므로써 에너지 消散能力이 상당히 향상되는 것으로 사료된다. 그러므로 X 자형 벤트 철근 방법은 높은 剪斷應力을 받는 보에서 有用한 것으로 판단된다.

3) 中間鐵筋을 사용하였을 때는 塑性 힌지가 移動되므로 요구되는 延性비의 증가를 해결하는 것이 미흡하다고 사료된다. 그러나 X字形 벤트 철근을 사용하였을 때는 塑性 힌지가 接合面까지 확대 되므로써 이를 충분히 만족시키는 것으로 판단된다.

끝으로 本 研究는 韓國科學財團의 研究費 支援下에 이루어진 研究의 一部로서 關係官 諸位께 感謝를 표하며, 實驗중 物心兩面으로 도와주신 船舶研究所 이호선실장님, 신병천선생님 이하 研究員 여러분께 感謝의 뜻을 표합니다.

參 考 文 獻

1. Gosain, N.K., Brown, R.H., and Jirsa, J.O., "Shear Requirements for Load Reversals on R/C Members," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 103, No. ST7, Proc. Paper 13090, July, 1977, pp. 1461-1476.

2. Ma, S.M., Bertero, V.V., & Popov, E.P., "Experimental and Analytical Studies on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams," Report No. EERC 76 - 2 Earthquake Eng'g. Center, Univ. of California, Berkeley, Calif. May, 1976.