鐵筋콘크리트보의 剪斷疲勞擧動에 關한 硏究

A Study on Shear-Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams

張 東 一*
Chang, Dong Il
郭 桂 煥**
Kwak, Kae Hwan

Abstract

This study is intended to investigate the shear fatigue behaviour of reinforced concrete beams based on a series of experiments, and verify the test results in comparison with the analysis result obtained by using a nonlinear finite element method.

The experiments are divided into the tests under the static loading and the test under the dynamic fatigue loading. In order to investigate the shear failure behaviour under static loadings, four specimens for three different cases were made and tested.

The behaviour of stirrups with the static stress and strain variations were observed based on the results of these tests.

In the fatigue fracture tests, eleven specimens for four different cases were made and tested. Various observations on mid-span deflection of test beams and tensile strains of reinforcing steels as well as stirrups were made against various fatigue loadings.

It may be concluded that the shear fatigue strengths of R.C. specimens at one million cycles turn out to be approximately 65 percent of the static ultimate shear strength.

要 旨

철근콘크리트 보의 剪斷疲勞擧動에 關해 實驗的인 硏究를 실시하여, 數値解析 結果와 比較 검토하였다.

剪斷實驗은 靜的實驗과 疲勞破壞實驗으로 구별하였는데, 靜的實驗에서는 3가지 경우의 試驗部材 4개를 제작하여 실험한 결과, 응력과 스터럽의 변형률 관계를 관찰하였고, 疲勞破壞實驗에서는 4가지 경우의 試驗部材 11개를 제작하여 실험한 결과, 하중—중앙처짐 관계와 하중—인장철근 변형률 관계 그리고, 하중—스터럽의 변형률 관계를 관찰하였다.

100萬回에 대한 部材의 疲勞强度는 靜的極限强度의 약 65%임을 확인할 수 있었다.

* 正會員 · 漢陽大學校 工科大學 敎授
** 正會員 · 圓光大學校 工科大學 副敎授

1. 序 論

현재까지의 연구결과에 의하면 靜的狀態에 있는 철근콘크리트 보의 擧動特性은 비교적 잘 규명되어졌으나, 구조해석방법이 정밀해짐에 따라 靜的狀態보다는 그밖의 여러 상태의 擧動特性이 요구되고 있다. 한편, 土木構造物의 設計와 解析에서 받는 보의 擧動은 정적인 하중만을 받는 경우와는 달리 복잡한 거동양상을 나타낸다[7~9,11~15].

최근, 철근콘크리트 보에 있어서도 設計荷重의 증대, 교통량의 증가 등으로 인한 하중—반복횟수의 격증에 따라 반복하중에 대한 材料의 强度 즉, 疲勞强度가 중요시 되어 왔으며, 이에 관한 많은 연구가 행해져 왔다[2~6,10].

그러나, 그 동안의 硏究가 대부분 휨 피로거동에 관한 것이고, 剪斷疲勞擧動에 관한 연구는 미흡한 것으로 알려져 있다. 靜的狀態에 있는 철근콘크리트 보의 剪斷擧動도 아직 不明한 점이 많으며, 疲勞荷重狀態下의 剪斷擧動은 더욱 다양한 결과들을 나타내기 때문에 이에 대한 體系的인 연구가 필요한 背景이다.

反復變動荷重을 받는 구조부재의 疲勞現象은 반복횟수의 증가에 따라 부재의 가장 취약한 부분에 疲勞現象이 발생하고 또한, 이 現象이 반복횟수에 따라 성장하여 최종단계에 이르면 靜的인 현상에 의해 부재가 기능을 상실케 되는 것이다. 그런데, 철근콘크리트 보는 취성재료인 콘크리트와 연성을 가진 鋼材의 복합부재이므로 그 피로현상은 복잡하다. 그런데, 두 부재의 결합성 즉, 상호 부착력을 저하시키는 철근의 變形率 증가에 따르는 콘크리트의 잔존 미세균열의 合體化(micro crack coalesce)가 이루어지며, 이것으로 균열이 성장하는 피로현상은 대단히 중요한 것이다[4,5,16].

현재의 철근콘크리트 보에 대한 역학적 거동의 연구는 대부분이 휨에 관한 것이고, 剪斷에 관한 것은 등한시하는 경향이다.

이것을 고려한 본 연구의 목적은 剪斷條件에 의해 파괴가 이루어지는 짧은 철근콘크리트 보의 반복하중과 반복횟수에 따르는 스터럽의 변형률에 관한 변화거동을 실험적으로 검토하는 데 있다.

2. 實驗計劃

2.1 實驗의 槪要

本 硏究에서의 실험은 철근콘크리트 보의 剪斷擧動에 關한 연구로서 靜的實驗과 疲勞實驗으로 구분하였다. 靜的實驗에서는 철근콘크리트 보의 균열발생 과정과 하중—스터럽의 변형률 관계 및 하중과 처짐 관계를 관찰했으며, 疲勞實驗에서는 철근콘크리트 보의 균열성장 과정과 반복횟수—스터럽의 변형률 관계를 관찰했다. 全體實驗部材는 15개이며, 靜的實驗用으로 4개, 疲勞實驗用으로 11개를 제작하였다.

表 2-1. 使用部材의 數量

試驗部材의 種類	靜的實驗	疲勞實驗	部材의 명칭
Series Ⅰ	1	4	4S1-1, 4F1-1, 4F1-2, 4F1-3, 4F1-4
Series Ⅱ	2	2	4S2-1, 4S2-2, 4F2-1, 4F2-2
Series Ⅲ	0	2	4F3-1, 4F3-2
Series Ⅳ	1	3	6S4-1, 6F4-1, 6F4-2, 6F4-3
計	4	11	

註) Series Ⅱ와 Series Ⅲ의 조건이 동일하므로 Series Ⅱ의 정적실험만을 했음.

2.2 部材의 諸元 및 性質

실험에 사용된 보는 콘크리트標準示方書의 强度設計法에 준하여 설계하였으나, 보의 剪斷破壞를 보장하기 위하여 일반적인 설계시보다 복부보강을 적게 하였으며, 鐵筋比는 平衡鐵筋比의 51.7%인 1.492%이었다.

스트레인게이지의 부착위치 및 부재의 제원은 그림 2-1과 같다.

2.3 使用材料 및 實驗方法

鐵筋은 KSD 3504에 규정되어 있는 異形鐵筋 D10과 D19를 使用하였으며 剪斷補强을 위하여 U字形 수직 스터럽을 설치하였다. 사용된 철근의 斷面積, 降伏應力 및 彈性係數는 表 2-2와 같고 콘크리트의 配合表는 表 2-3과 같다.

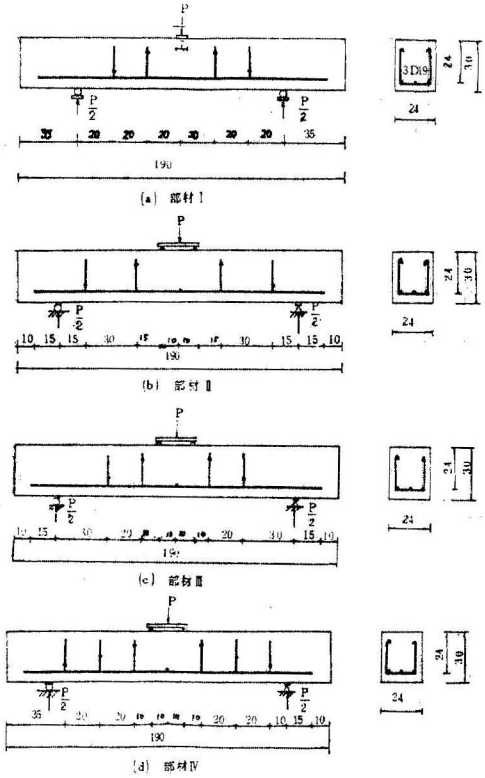
콘크리트壓縮强度 測定用으로 $\phi 10 \times 20$cm의 圓柱形供試體 40個를 제작하여 材令에 따른 强度變化를 測定하였다. 28日 强度測定 結果, 平

表 2-2. 異形鐵筋의 性質

철근의 종류	공칭단면적 A_s(cm²)	항복응력 σ_y(kg/cm²)	극한응력 σ_u(kg/cm²)	탄성계수 E_s(kg/cm²)
D 10	0.713	2777	4067	2.04×10^6
D 19	2.865	3560	5020	2.04×10^6

表 2-3. 配合콘크리트의 성분

굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	단위수량 (kg)	단위시멘트량 (kg)	물시멘트비 (%)	단위잔골재량 (kg)	단위굵은골재량 (kg)	단위 AE 제량 (kg)	잔골재율 (S/A) (%)	설계기준강도 (kg/cm²)
25	7	1	170.5	355.3	48	753.34	1105	0	41	210



註 : a는 3점재하 이하이고 b, c, d는 4점재하인 경우 단위는 cm 임

그림 2-1. 部材의 제원

均壓縮强度 $\sigma_{28}=225kg/cm^2$ 이었다.

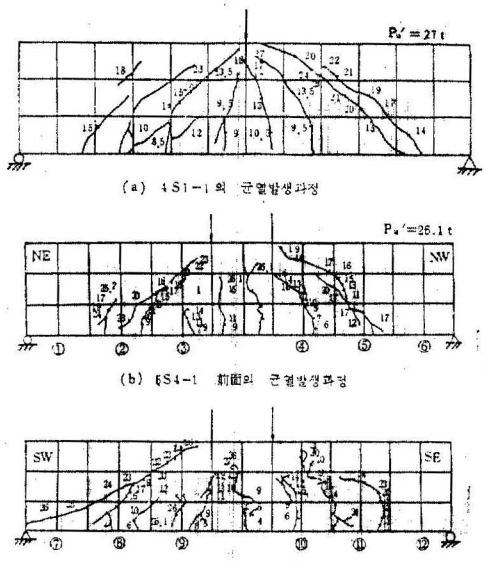
部材 Ⅰ에서는 3점하중으로, 部材 Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ에서는 4점하중으로 載荷하였으며, 유효 높이에 대한 剪斷支間의 比는 2.5로 했다.

靜的實驗에서는 部材가 파괴될 때까지 1 ton 씩 증가시켰으며 各 荷重 단계마다 중앙처짐 철근의 변형률 및 발생과정을 조사하였고 疲勞實驗時는 최소값을 4 ton 으로 일정하게 하였으며 反復荷重의 최대, 최소값을 일정하게 유지시키면서 5Hz 의 속도로 載荷하였다.

3. 靜的實驗

3.1 部材의 擧動

部材의 靜的實驗에 대한 結果는 表 3-1과 같



註 1) 그림 내부에 있는 숫자는 균열발생시의 하중(ton)을 나타냄.

2) 1, 2, 3……26 의 숫자는 균열발생시의 하중(ton)을 나타냄.

①②③④……⑫의 숫자는 스터럽의 위치를 나타냄.

그림 3-1. 균열발생과정

表 3-1. 靜 的 實 驗 結 果

試驗部材	σ_c' (kg/cm²)	파괴 P_u'(ton)	파괴 M_u'(t·m)	M_{cal} (t·m)	M_{cal}' (t·m)	M_u'/M_{cal}	M_u'/M_{cal}'	P_{fc}(t)	P_{dc}(t)
4 S1-1	240	27	8.1	5.749	2.30	1.41	3.52	5	16
4 S2-1	225	19	5.7	5.691	2.16	1.0	2.64	4	11
4 S2-2	240	17	5.1	5.749	2.30	0.887	2.22	5	9
6 S4-1	251	26.1	7.83	5.789	2.41	1.353	3.25	4	14

σ_c' : 콘크리트의 압축강도
P_u' : 부재 파괴시의 정적극한하중
M_u' : 부재 파괴시의 극한모멘트
M_{cal} : 강도 설계법에 의한 설계모멘트 강도
M_{cal}' : 허용응력 설계법에 의한 저항모멘트
P_{fc} : 초기 휨 균열 발생하중
P_{dc} : 초기 전단 균열 발생하중

$$M_{cal}=\phi A_s\sigma_y d\left(1-\frac{P}{2}\ \frac{\sigma_y}{0.85\sigma_c'}\right)$$

여기서 $\phi=0.9$

M_{cal}' : $M_{rs}=\sigma_{sa}Pjbd^2$, $M_{rc}=\frac{1}{2}\sigma_{ca}kjbd^2$ 의 둘 중에서 작은 값

다. 荷重을 증가시킴에 따라서 部材의 龜裂發生過程은 초기에는 純粹휨 區間에서 引張龜裂이 微細하게 발전하다가 계속 荷重을 증가시킴에 따라서 어느 순간에 이르러 斜引張龜裂이 發生하였다. 이러한 斜引張龜裂은 荷重의 증가에 따라서 載荷點方向으로 약 45°의 경사로 발전되어 파괴되는 전형적 剪斷破壞의 양상을 보였다[17,18].

荷重증가에 따른 부재의 龜裂發生過程은 그림 3-1과 같다.

3.2 荷重과 變形率 關係

스터럽의 變形率은 斜引張龜裂의 발생과 밀접한 관계에 있으며, 휨 균열과는 무관한 것으로 나타났다.

일반적으로 균열이 가로지르는 곳에 있는 스터럽의 변형률이 크게 나타났으며, 보의 가장자리에는 뚜렷한 균열도 발생되지 않았을 뿐 아니라 변형률의 변화도 적게 나타났다.

이들 各各의 關係가 그림 3-1의 (b)와 (c) 및 그림 3-2의 (a)와 (b)에 나타나 있으며, 그림 3-2의 (c)는 4S2-1 및 4S2-2, 6S4-1의 평균 剪斷變形率도 증가하고 있음을 나타낸다. 한편, 引張鐵筋의 變形率은 荷重의 증가에 비례하여 일정하게 증가하였으며, 선형탄성이론에 의해 구해진 變形率값과 實驗값은 잘 일치하고 있다.

3.3 荷重과 중앙처짐關係

보의 중앙처짐은 荷重에 비례하여 비교적 일정하게 증가하였으나, 파괴직전에 있어서는 하중이 증가될 때 처짐이 급격히 증가하였다.

강성감소는 부재가 파괴단계에 이르렀음을 나타내는 것이며, 荷重과 처짐의 關係를 示方書의 규준식[19]과 비교하여 그림 3-3에 나타내었다.

한편, 6S4-1은 4S2-1과 4S2-2에 비해 큰 처짐에 대해 견디어내는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 6S4-1은 4S2-2보다 휨센더 연성적임을 알 수 있었다.

4. 疲勞實驗

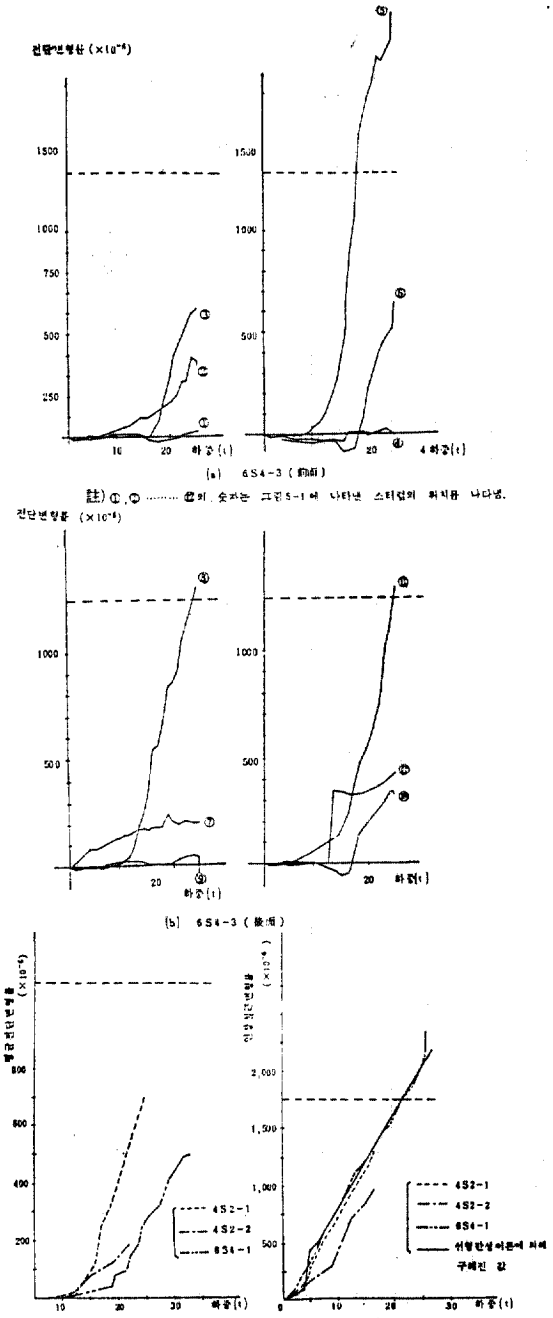
4.1 보의 擧動

疲勞實驗에 있어서 疲勞荷重係數(R)는 P_{max}/P_u'로서 나타내어진다(여기서, P_{max}는 피로실험시의 최대하중, P_u'는 정적 극한하중을 나타냄).

各 部材別로 작용시킨 疲勞荷重과 破壞時의 반복횟수는 表 4-1과 같다.

反復回數의 증가에 따라 스터럽의 변형률은 계속 변화를 보이는데, 이의 관계가 그림 4-2 (a)~(h)와 같다. 일반적으로 反復回數가 증가함에 따라서 스터럽과 引張鐵筋의 變形率은 계속 증가하는 추세를 보이지만, 斜引張龜裂이 발생하면서 일시적으로 어느 순간 스터럽의 변형률이 감소하는 경우도 있음을 알 수 있다. 이는 部材의 破壞가 진행되면서 콘크리트 內部에 발생한 균열로 인한 應力再分布現象(redistribution of stress)에 起因한다고 볼 수 있다[16-18].

反復回數의 증가에 따른 龜裂成長 擧動은 초기의 微細龜裂이 점차로 성장하여 斜引張龜裂로서 발전하게 되며 진전상황은 그림 4-1(a)~(i)에 보인 바와 같다. 또한, 反復回數의 증가에 따라 部材의 중앙처짐도 계속 증가하게 되고, 일



(c) 하중과 평균전단 변형률 관계
(d) 하중과 인장철근 변형률 관계

그림 3-2. 하중과 변형률 관계

의의 反復荷重을 받은 後 部材의 잔류변형을 알기 위하여 荷重을 加한 後, 다시 荷重을 제거했을 때의 중앙처짐 관계가 그림 4-5(a)~(g)와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 荷重을 加하고 이

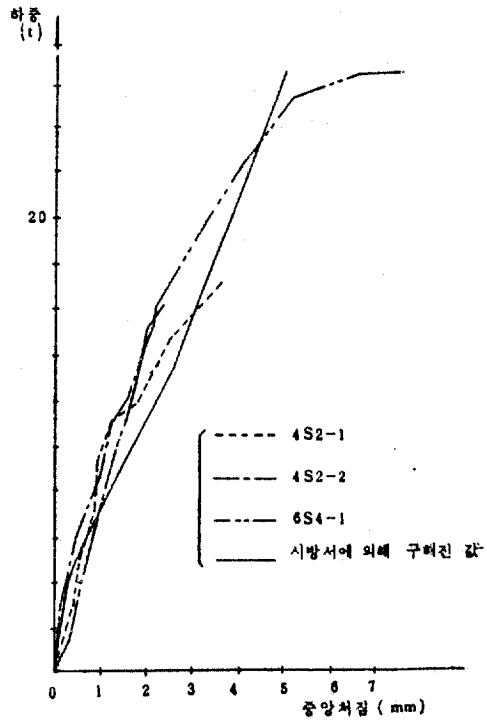


그림 3-3. 하중과 중앙처짐 관계

를 제거했을 때 分明한 잔류변형을 보임을 알 수 있다.

철근콘크리트 보에 있어서 疲勞荷重에 의한 應力값이 極限値를 넘게 되면, 보는 이에 대하여 더 이상 견디지 못하고 破壞된다. 이러한 破壞는 콘크리트의 壓縮破壞와 인장철근의 疲勞破壞로서 구분될 수 있다. 本 實驗에서는 4F1-2, 4F3-1, 4F3-2가 인장철근의 疲勞破斷에 의하여 破壞되었다.

4.2 疲勞實驗의 結果와 Okamura 式[17]의 비교

(1) 最大反復荷重에서의 反復回數와 스터럽變形率 관계

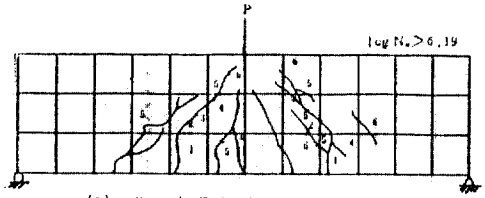
本 實驗의 자료로부터 스터럽의 平均變形率은 $\log_{10} N$과 비례함을 알 수 있고, 이들을 최소자승법에 의해서 回歸分析하여 보면 다음과 같다.

$$\varepsilon_\omega = a + b \log_{10} N \qquad \cdots(4\text{-}1)$$

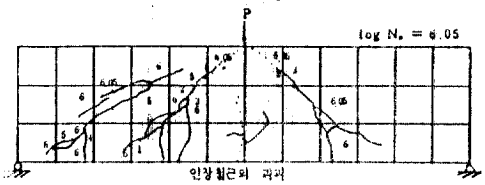
ε_ω : 스터럽의 平均變形率

a : 회귀분석에 의한 반복횟수 1회에서의 스터럽의 평균변형률

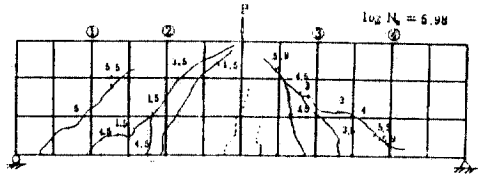
b : 회귀분석에 의한 반복횟수의 증가로 인



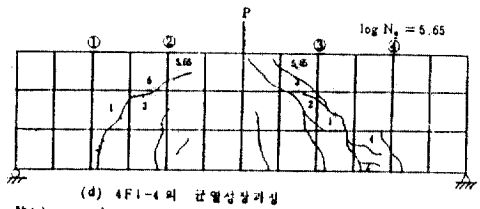
(a) 4F1-1의 균열성장과정



(b) 4F1-2의 균열성장과정

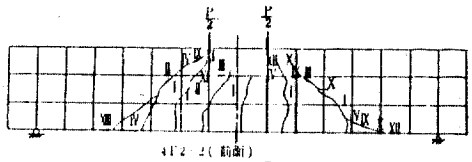


(c) 4F1-3의 균열성장과정

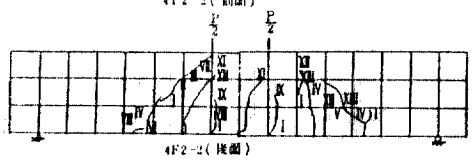


(d) 4F1-4의 균열성장과정

註1) (a)~(d)의 그림내부의 숫자는 logN을 표시함.

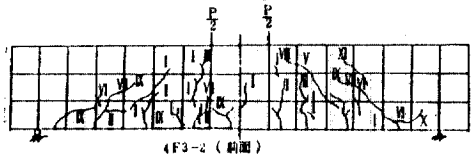


4F2-2 (前面)

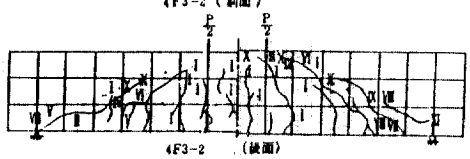


4F2-2 (後面)

(e) 4F2-2의 균열성장과정



4F3-2 (前面)

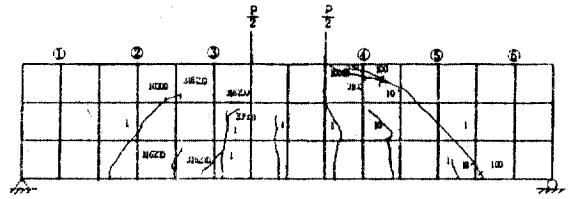


4F3-2 (後面)

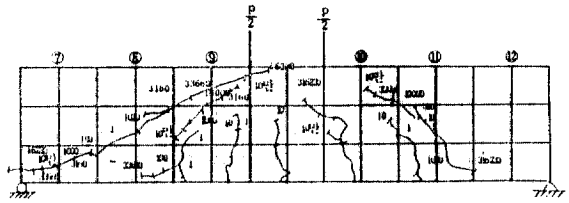
(f) 4F3-2의 균열성장과정

註2) (e),(f) 에서의 Ⅰ~ⅩⅣ는 다음을 표시한다

Number of cycle:			
Ⅰ	: 1 cycle	Ⅷ	: 10,000
Ⅱ	: 10	Ⅸ	: 32,000
Ⅲ	: 32	Ⅹ	: 100,000
Ⅳ	: 100	Ⅺ	: 320,000
Ⅴ	: 320	Ⅻ	: 1,000,000
Ⅵ	: 1,000	ⅩⅢ	: 1,500,000
Ⅶ	: 3,200	ⅩⅣ	: 2,000,000



6F4-3 (前面)

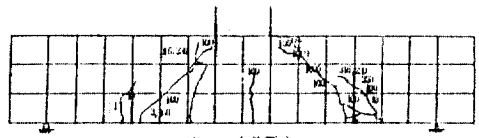


6F4-3 (後面)

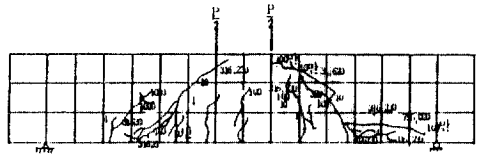
(i) 6F4-3의 균열성장과정

註3) (g)~(i)에서 그림내부의 숫자는 반복횟수를 표시함.

註4) (c)(d)(i)의 ①~⑫는 스터럽의 위치

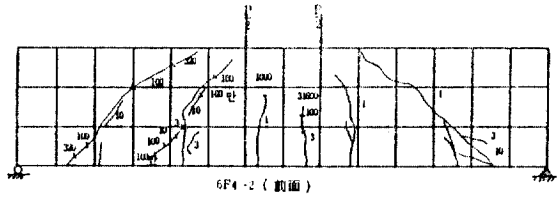


6F4-1 (前面)

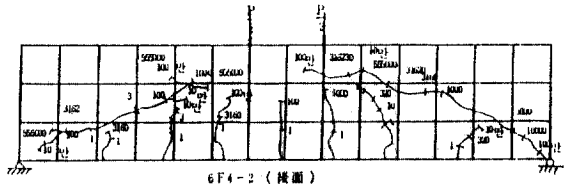


6F4-1 (後面)

(g) 6F4-1의 균열성장 과정



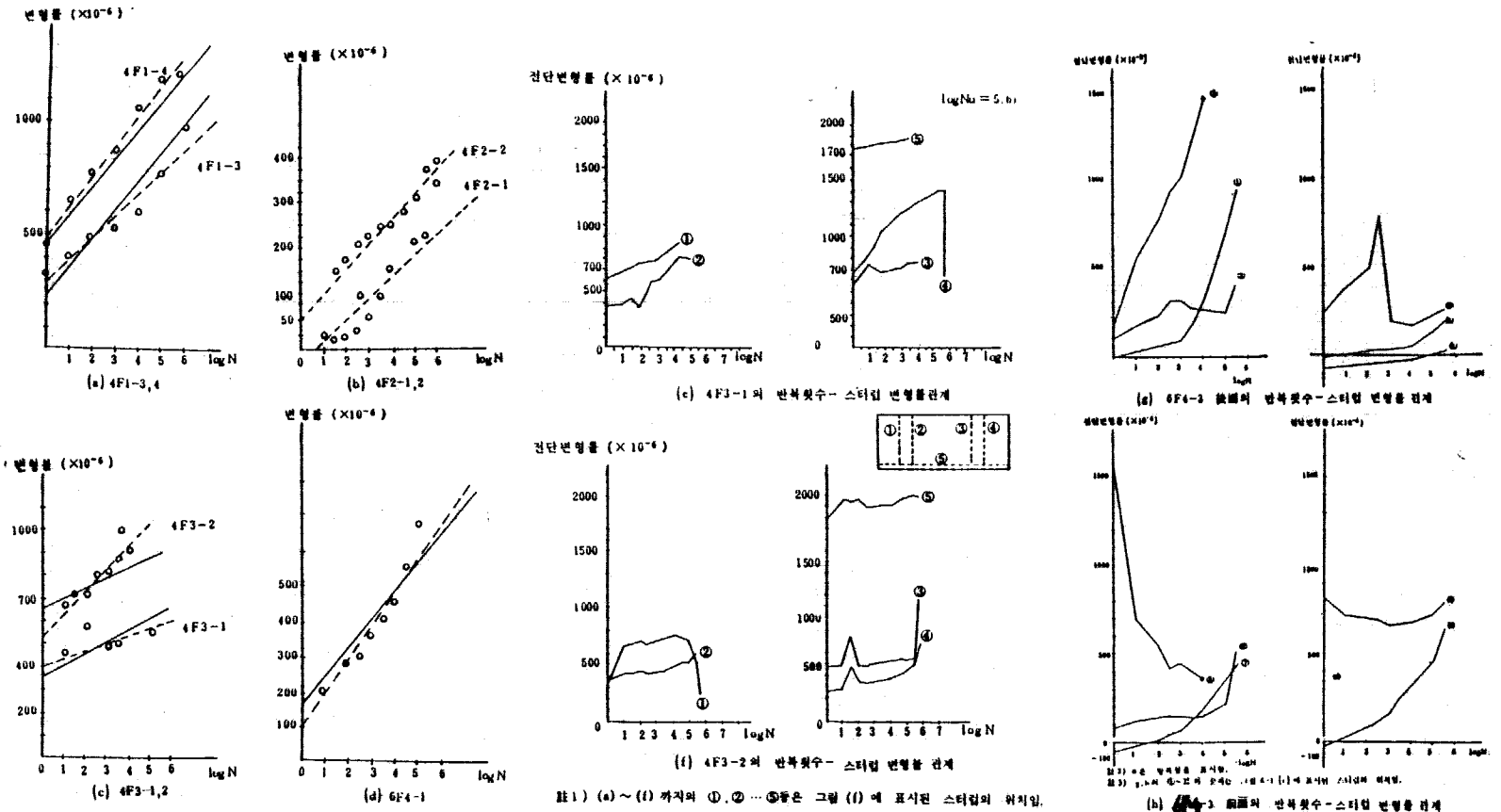
6F4-2 (前面)



6F4-2 (後面)

(h) 6F4-2의 균열성장 과정

그림 4-1. 균열 성장 과정



註1) (a)～(f) 까지의 ①, ②…⑤등은 그림 (f) 에 표시된 스터럽의 위치임.

그림 4-2. 반복횟수—스터럽 변형률 관계

表 4-1. 피 로 시 험 결 과

번호	부 재	P_{min} (ton)	P_{max} (ton)	$R^{1)}$	$P_u'^{2)}$ (ton)	$P_u''^{3)}$ (ton)	N_u	파괴양식	V_{co} (ton)	P_{fc} (ton)	P_{dc} (ton)
I	4F1-1	4	13.5	0.50	27	21.5	—	전단파괴	9		18
	4F1-2	4	17	0.63	27	—	1,110,400	(인장철근의 피로파괴)	9		18
	4F1-3	4	18	0.67	27	—	955,000	전단파괴	8		16
	4F1-4	4	20	0.74	27	—	448,220	〃	8		16
II	4F2-1	4	11	0.55	20	19	200 . . .	전단파괴	3.5		7
	4F2-2	4	16	0.80	20	—	1,570,900	〃	4.5		9
III	4F3-1	4	20	0.74	27	—	386100	(인장철근의 피로파괴)	6		12
	4F3-2	4	19	0.70	27	—	407600	〃	4.5		9
IV	6F4-1	4	17	0.65	26.1	21	150 . . .	전단파괴	7.5	5	15
	6F4-2	4	15.25	0.58	26.1	24	133 . . .	〃	6.5	4	13
	6F4-3	4	18.5	0.71	26.1	—	465000	〃	7.5	4	15

1) : 정적 극한하중에 대한 최대 반복하중의 백분율.
2) : 정적 극한하중
3) : 반복횟수 130萬 이상의 경우 정적파괴 강도
$V_{co} : P_{dc}/2$

한 변형률의 증가율

그림 4-3에 실험식과 회귀분석식과의 관계를 도식화하여 나타내었다. 실험식과 회귀분석식은 비교적 잘 일치되고 있으며, 表 4-2에 실험식과 회귀분석식의 a, b를 비교하여 나타내었다.

表 4-2. Okamura의 제안식과 회귀분석식

部 材	Okamura의 제안식		회귀분석식	
	a	b	a	b
4F1-1	0	134	—	—
4F1-2	0	134	104	34
4F1-3	229	128	271	121
4F1-4	457	128	476	137
4F3-1	370.5	38.9	515.63	56.73
4F3-2	651	19.8	544.2	96.6
6F4-1	155.5	81.6	83.6	98.2
6F4-2	174.9	70.8	127.4	113.9
6F4-3	272.1	81.6	219.0	70.3

(2) 실험에 의한 스터럽의 應力範圍

그림 4-4에 측정된 應力範圍와 提案式에 의해 계산된 응력범위 사이의 관계가 나타나 있다. 전반적으로 측정값은 계산값보다 작은 범위의 값을 보여주고 있는데 이것은, 임의 回數의 載荷後 殘留變形率이 零이라는 Okamura의 假定에 起因되어진다.

그림 4-5에서 측정값은 平均剪斷變形率값으로 나타내었다.

4.3 引張鐵筋의 疲勞强度

異形鐵筋의 疲勞應力範圍는 疲勞實驗時 引張鐵筋이 疲勞破壞되었던 部材로부터 다음과 같은 表 4-3의 測定値를 얻을 수 있었다.

本 測定값에 대한 통계적 해석 결과, 다음과 같은 회귀분석식을 얻을 수 있었다[16~18].

$$\log_{10}\sigma_{sr}=4.288-0.142\log_{10}N \quad \cdots(4\text{-}2)$$

4.4 反復回數와 中央처짐關係

反復回數의 증가에 따라 部材의 中央처짐도 증가하였으며, 反復回數의 증가에 따른 荷重—처짐關係는 그림 4-4와 같다.

4.5 S-N 線圖의 作成

疲勞實驗 결과 各各의 部材에 대한 疲勞壽命과 疲勞强度와의 관계식은 다음과 같은 指數形態의 함수로써 나타낼 수 있다[16].

$$R=ke^{-c\log_{10}N} \quad \cdots(4\text{-}3)$$

여기서, k와 c는 실험에 의해 결정되는 常數이다.

윗式의 양변에 대수를 취하여 정리하면,

$$\log_{10}R+C\cdot\log_{10}e\cdot\log_{10}N=\log_{10}k \quad \cdots(4\text{-}4)$$

여기서, $\log_{10}k=Y$, $\log_{10}R=\alpha$, $c\log_{10}e=\beta$라 하면, 윗式은 다음과 같은 형태로 置換할 수 있

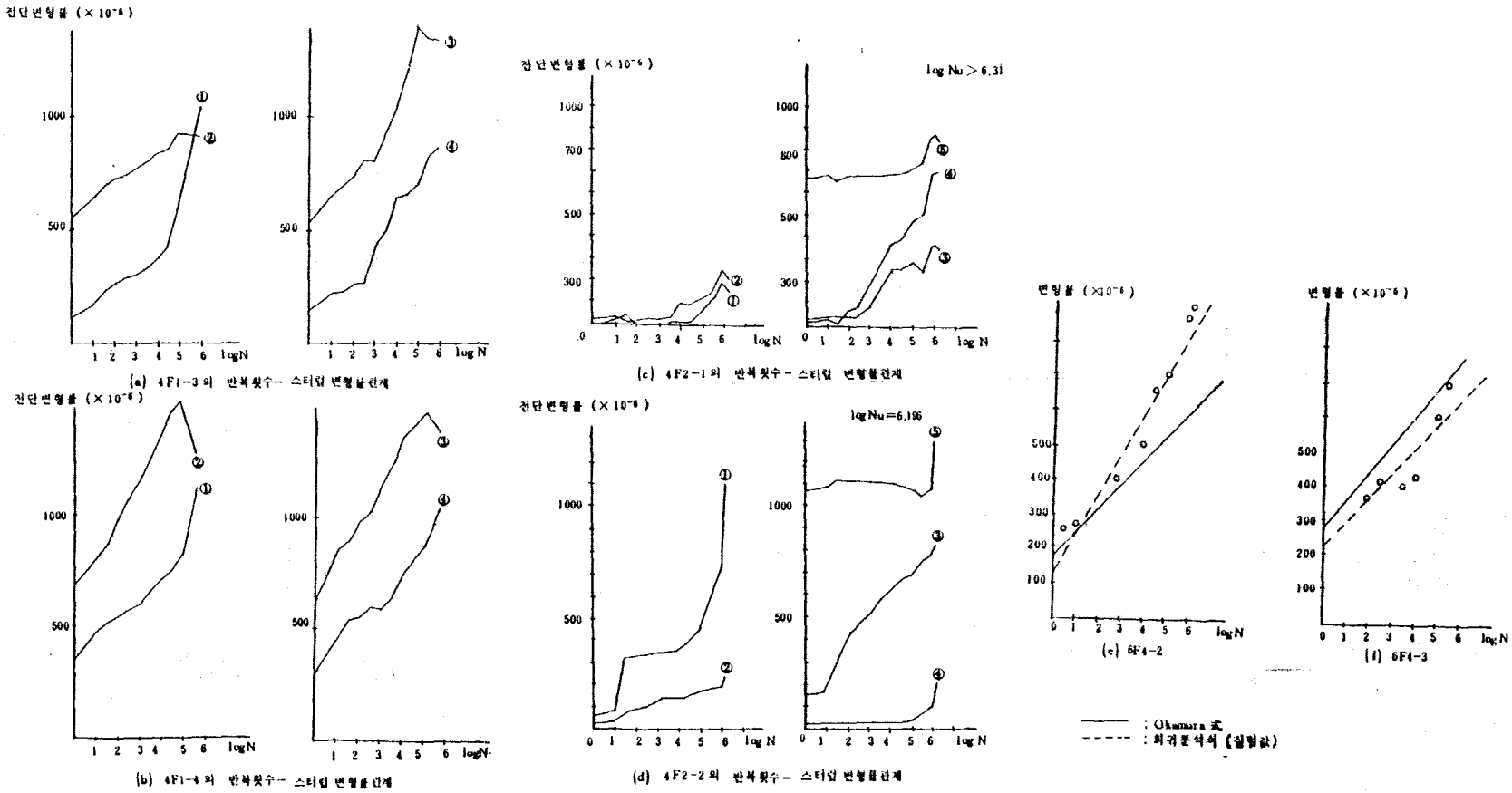


그림 -3. 회귀분석식과 Okamura 式과의 비교

表 4-3. 引張鐵筋의 疲勞破壞가 발생하였던 部材

部 材	σ_c' (kg/cm²)	P_{min} (ton)	P_{max} (ton)	N_u	σ_{min} (kg/cm²)	σ_{max} (kg/cm²)	破 壞 樣 相
4F1-2	234	4	17	1,110,400	150.17	2853.7	인장철근의 피로파괴
4F3-1	245	4	20	386,100	150.17	3357.3	〃
4F3-2	245	4	19	407,600	150.17	3189.5	〃

P_{min} : 最小反復荷重
P_{max} : 最大反復荷重
σ_{min}, σ_{max} : P_{min}, P_{max} 에서 線形彈性理論에 의하여 얻어진 引張鐵筋의 應力
N_u : 部材 破壞時의 載荷回數

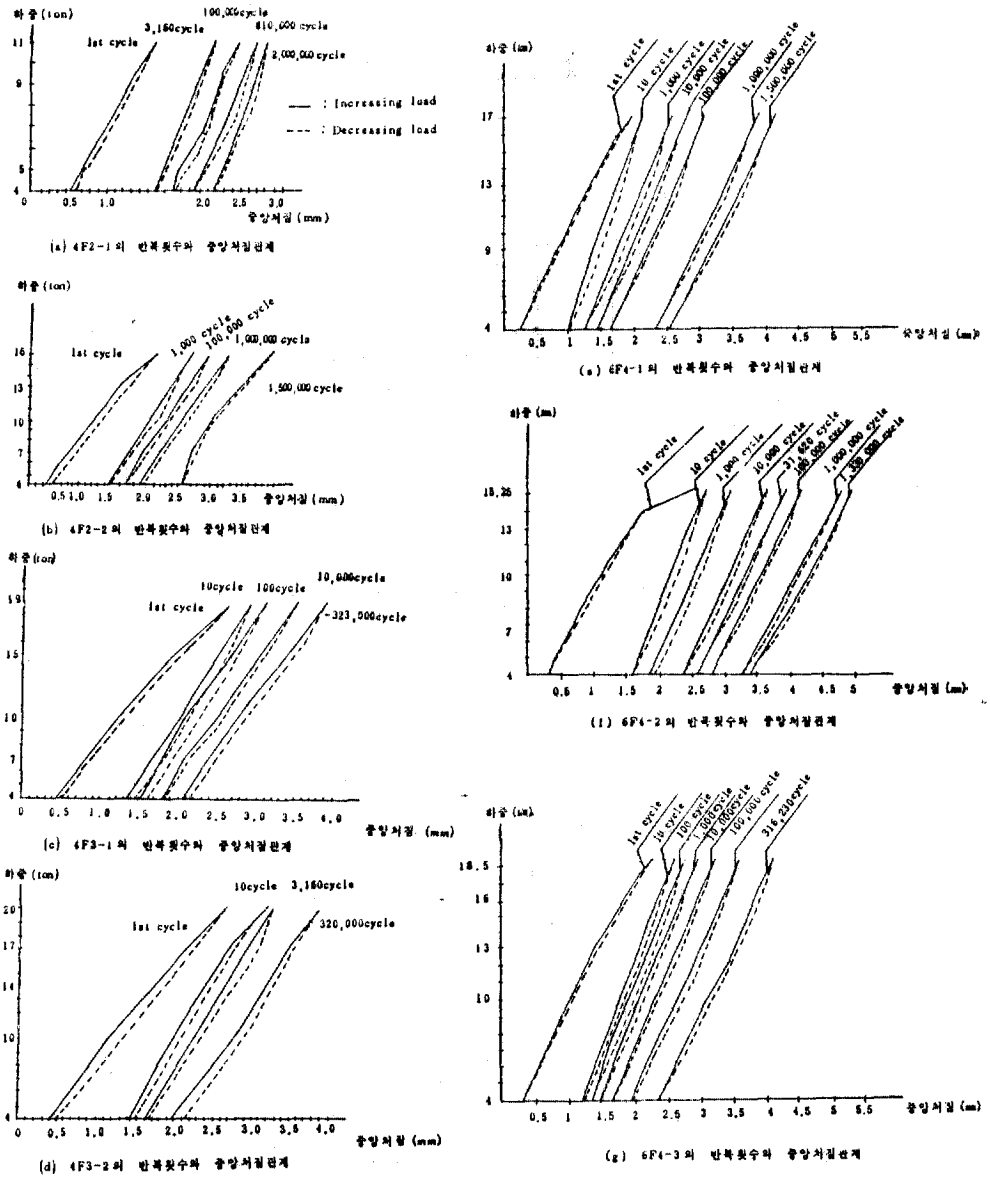


그림 4-4. 반복횟수와 중앙처짐 관계

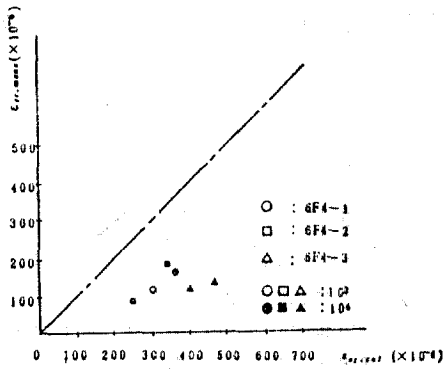


그림 4-5. 스터럽의 응력범위

다.

$$Y=\alpha+\beta \log_{10}N$$

일반적인 경우의 스터럽 변화에 대한 고찰을 위해서 실시한 本 實驗으로부터 各 部材에 대한 疲勞壽命과 疲勞强度와의 關係는 그림 4-6과 같이 나타낼 수 있고, 이들을 회귀분석하면 다음과 같은 직선식을 얻을 수 있다.

$$R=182.35-19.561 \log_{10}N \qquad \cdots(4\text{-}5)$$

윗 式의 관계로부터 百萬回에 대한 부재의 疲勞强度는 靜的極限强度의 65%임을 알 수 있었고, 이 값은 기존의 硏究結果와 잘 符合되었다.

5. 數値解析과 實驗結果의 比較

철근콘크리트 보의 靜荷重 상태하의 剪斷擧動을 알기 위하여 스터럽의 갯수를 變數로 하여 實驗部材를 제작하였으며, 이에 대한 靜的實驗結果는 3章에 보인 바와 같다.

여기서, 이의 정확도 및 타당성 검토를 위하여 數値解析을 수행하였다. 이를 위하여 그림 5-1과 같은 요소로서 분할하였으며, 콘크리트는 평면응력상태 그리고, 철근은 트러스요소로서 모형화하였다. 각 재료상수는 표 5-1과 같다.

本 實驗部材는 4點 荷重의 제하상태로서 대칭상태이므로 部材의 반쪽만 고려하였으며, 콘

表 5-1. 재료상수

철 근	
탄성계수	2.04×10^6kg/cm²
초기항복응력	3,560kg/cm²
변형경화계수	2.04×10^4kg/cm²
콘크리트	
초기탄성계수	232,379kg/cm²
포아송비	0.2kg/cm²
일축인장강도	18.46kg/cm²
최대압축응력(σ_c)	−240kg/cm²
σ_c에서의 변형률	−0.002
일축극한압축응력	−204kg/cm²
일축극한압축변형률	−0.003

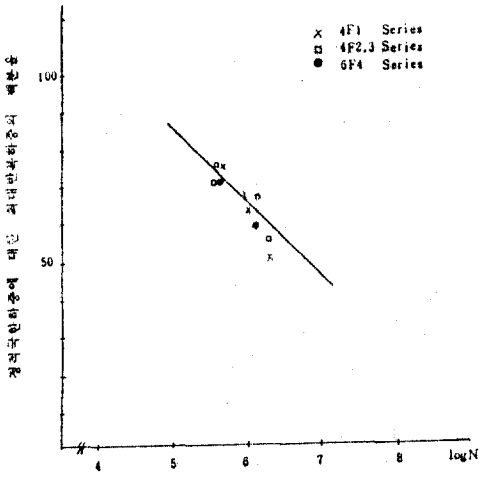
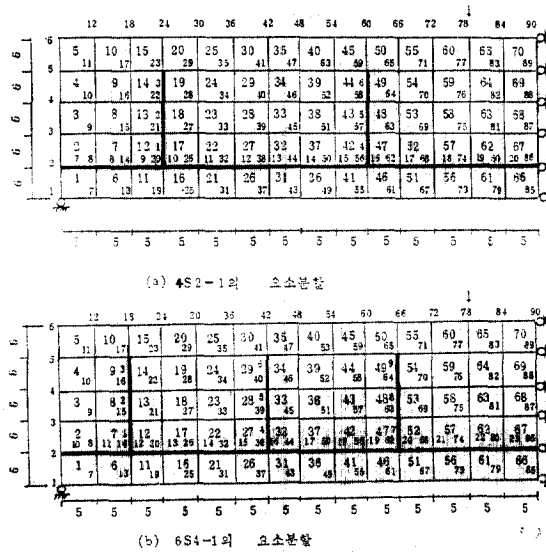


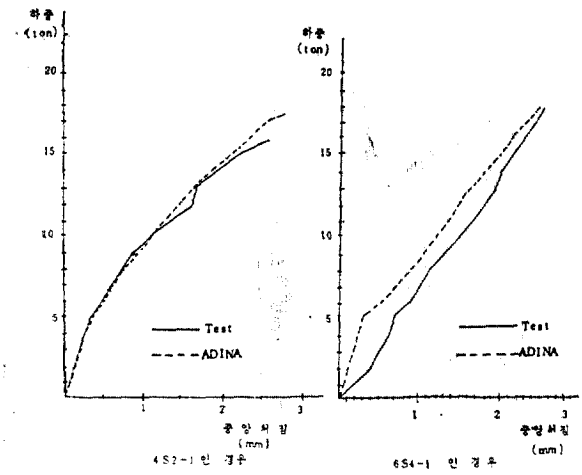
그림 4-6. S-N線圖



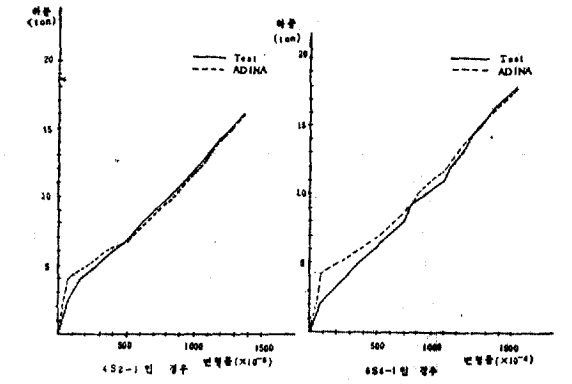
(a) 4S2-1의 요소분할

(b) 6S4-1의 요소분할

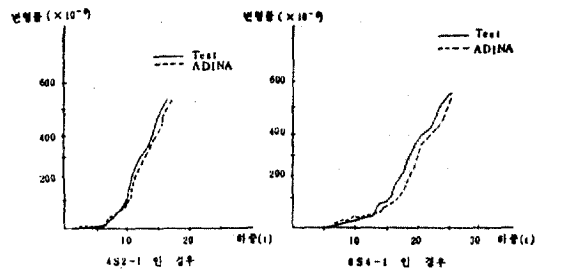
그림 5-1. 요소분할



(a) 하중—중앙 처짐 관계



(b) 하중—인장철근 변형률 관계



(c) 하중—스터럽 변형률 관계

그림 5-2. 실험결과와 수치해석의 비교

크리트의 모형은 90개 절점과 70개의 요소로서 나누고, 철근은 6S4-1의 경우 引張側과 스터럽을 합하여 모두 23개의 요소로서 분할하였고, 4S2-1의 경우는 20개로서 분할하였다.

要素분할에 관한 사항을 그림 5-1과 같이 나타냈다[1].

數値解析 結果, 荷重 증가에 따른 부재의 중앙처짐과 引張側 鐵筋의 變形率, 그리고 主剪斷龜裂部의 스터럽變形率 관계를 알 수 있었고, 이로부터 實驗値와 비교한 결과는 그림 5-2와 같다.

6. 結 論

疲勞荷重을 받는 철근콘크리트 보의 擧動은 복잡하고 특히, 材料 자체의 非均質性으로 인하여 各各의 部材는 疲勞荷重에 대하여 어느 정도 서로 다른 反應을 보이는 바, 本 硏究結果 다음과 같은 몇가지 結論을 얻을 수 있다.

1) 스터럽의 變形率은 斜引張龜裂과 밀접한 관계가 있으며, 휨龜裂과는 무관한 것임을 관측할 수 있다.

2) 反復回數가 증가함에 따라서 스터럽의 平均變形率과 反復回數와의 관계는 비례하므로 앞으로 剪斷强度를 구할 때 스터럽에 의한 영향을 고려해야 한다고 본다.

3) 本 實驗 結果, 반복횟수 100萬回에 대한 疲勞强度는 靜的 極限强度의 대략 65%임을 확인할 수 있었다.

4) 靜荷重을 받는 철근콘크리트 보의 중앙처짐 및 인장철근의 변형률을 실험적으로 측정하였으며, 이들 측정값을 유한 요소법을 이용한 ADINA 프로그램[1]에 의하여 해석한 결과와 비교 검토한 결과가 거의 일치함을 알 수 있었다.

參 考 文 獻

1. Adina Engineering, "*Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*", Watertown, Mass. 02172. U.S.A. September, 1981, June, 1983.
2. Carpinter, A., "Application of Fracture Mechanics to Concrete Structures", *Journal. of Structual Division ASCE*, Vol. 108, No. ST4, April, 1982, pp. 833~848.
3. Carpinter, A., and Ingraffea. A.R., "*Fracture Mechanics of Concrete*", Martinus Nijhoff Publishers, 1984, pp. 34~42.
4. Chang, T.S., and Kesler, C.E., "Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams," *Journal of ACI*, Vol. 55, Aug. 1958, pp. 245~254.
5. Chang, T.S., and Kesler, C.E., "Static and

Fatigue Strength in Shear of Beams with Tensile Reinforcement", *Journal of ACI*, Vol. 54, June, 1958.

6. Chen, A.C.T., and Chen, W.F., "Consitutive Relations for Concrete," *J. Engr. Mech. Div., ASCE* 101 (EM4), Aug., 1975, pp. 463~481.
7. Darwin, D., and Pecknold, D.A., "Analysis of Cycle loading of Plane R/C Structures," *Computers and structures*, Vol. 7, 1977, pp. 137~147.
8. Darwin, D., and Pecknold, D., "*Inelastion Model for Cyclic biaxial Loading of Reinforced Concrete*," SRS No. 409, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois, July, 1974.
9. Darwin, D., and percknold, D., "Analysis of Reinforced Concrete Shear Panels under Cyclic Loading," *Journal of the Structural Division ASCE*, Vol. 102, No. ST2, February. 1976, pp. 355~369.
10. Gilbert, R.I., and Warner, R.F., "*Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Slabs with Tension Stiffening*," UNICIV Report No. R-167, University of New South Wales, kensington, N.S.W., Australlia, January, 1977.
11. Hawkins, N.H., "*Fatigue Characteristics in Bond and Shear of R.C. Beams*," ACI Publication SP, 411~10, pp. 221~222, 1974.
12. Kang, Y.J., "*Nonlinear Geometric, Material and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames*," Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley, UC-SESM Report No. 77-1, January, 1977.
13. Karsan, I.D., and Jirsa, JO., "Behavior of Concrete under Compressive Loadigs", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 95, No. ST12, December, 1969, pp. 2543~2563.
14. Kupfer, H., Hilsdorf, H.K., and Rusch, H., "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses," *Journal of ACI* Vol. 66, No. 8, Aug., 1969, pp. 656~666.
15. Nordby, G.M., "Fatigue of Concerte-A Review of Research", *Journal of ACI*, August, 1958, pp. 191~219.
16. Okamura, H., Farghaly, S.A., and Ueda. T. "Behaviors of Reinforced Concret Beams with Stirrups Failing in Shear under Fatigue Loading," *Proc. of JSCE*, No. 308, April, 1981, pp. 109~122.
17. 장동일, 곽계환, "철근콘크리트 구조물의 전단거동에 관한 연구" 대한토목학회논문집, 제 7 권 제 1 호, 1987 년 3 월, pp. 83~92.
18. 장동일, 곽계환, "철근콘크리트 구조물의 비선형 해석에 관한 연구" 대한토목학회논문집, 제 7 권, 제 2 호, 1987 년 6 월, pp. 69~77.
19. 콘크리트 標準示方書, 대한민국 건설부, 1984, pp. 57~72.

(接受 : 1988. 1. 23)