

變動振幅의 疲勞荷重을 받는 콘크리트의 累積損傷理論

A Cumulative Damage Theory of Concrete under Variable Amplitude Fatigue Loadings

吳 炳 煥*
Oh, Byung Hwan

Abstract

A nonlinear cumulative damage theory, which can model the effects of the magnitude and sequence of variable amplitude fatigue loadings, is proposed. The concrete beam specimens are prepared and tested in four-point flexural loading conditions. The variable-amplitude fatigue loadings in two and three stages are considered. The present experimental study indicates that the fatigue failure of concrete is greatly influenced by the magnitude and sequence of applied, variable-amplitude fatigue loadings. It is seen that the linear damage theory proposed by Palmgren and Miner is not directly applicable to the concrete under such loading cases. The sum of the cumulative damage is found to be greater than 1 when the magnitude of fatigue loading is gradually increased and less than 1 when the magnitude of fatigue loading is gradually decreased. The proposed nonlinear damage theory, which includes the effects of the magnitude and sequence of applied fatigue loadings, allows more realistic fatigue analysis of concrete structures.

要 旨

本 論文에서는 크기가 變하는 變動振幅의 반복하중이 콘크리트構造物에 作用할 경우 피로파괴를 예측할 수 있는 非線型累積損傷理論을 提案하였다. 이를 위하여 콘크리트보에 대한 피로실험이 수행되었으며, 피로하중은 2 단계 및 3 단계로 크기가 증가하는 경우와 감소하는 경우가 모두 고려되었다. 本 研究의 實驗結果 變動振幅의 반복하중을 받는 콘크리트에 발생하는 누적손상은 피로하중의 크기와 피로하중의 작용순서에 따라 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 따라서 Palmgren-Miner의 선형손상이론이 콘크리트의 경우 적합하지 않음을 보여주고 있다. 피로하중이 점진적으로 증가하는 경우 Miner의 損傷합은 1보다 크며, 피로하중이 점진적으로 감소하는 경우 이 손합은 1보다 작은 것으로 나타났다. 本 論文에서 提案된 非線型 累積損傷理論은 피로하중의 크기와 작용순서의 영향을 고려할 수 있는 보다 進歩된 손상이론으로서, 콘크리트 구조물의 피로해석 및 설계에 있어 하나의 토대가 될 것으로 사료된다.

* 正會員·서울大學校 工料大學 助教授, 土木工學科

表 1. 콘크리트의 配合成分과 強度

물 (kg/m ³)	시멘트 (kg/m ³)	잔골재 (kg/m ³)	굵은골재 (kg/m ³)	압축강도 (kg/cm ²)	휨강도 (kg/cm ²)
156.3	316.9	771.1	1093.6	273.4	46.7

1. 序 論

構造物에 作用하는 피로하중은 기계적인 진동과 같은 일정진폭의 피로하중도 작용하지만, 실제적인 자연환경하에서는 계속적으로 크기가 변하는 불규칙적인 피로하중이 작용하는 경우가 많다.

크기가 변하는 반복하중하에서의 콘크리트의 피로거동은 일정진폭의 반복하중하에서의 피로거동과 또 다른 특성을 나타낸다. 일정하중상태에서의 피로거동은 일반적으로 S-N관계로 특성지워지게 된다^(9, 10, 22~24, 28~34). 이 S-N관계는 작용되는 피로하중과 피로수명과의 관계를 나타내는 것으로서, 이러한 S-N관계의 기본특성을 크기가 변하는 피로하중의 피로거동 규명에 이용을 시도한 연구자가 Miner⁽¹⁶⁾이다. Miner는 크기가 다른 여러가지의 피로하중이 작용하는 경우에 금속의 피로특성을 규명하기 위하여 소위線型損傷累積理論을 提案하였다. 이 損傷累積理論은 여러가지 크기의 피로하중이 작용하는 경우 각 피로하중단계에서 누적된 손상의 총합은 어느 일정한 값에 도달한다는 가정하에 세워진 이론이다. 실제적으로 콘크리트의 피로파괴는 콘크리트내에 서서히 손상이 누적됨에 따라 진행되는 것으로서 손상이론의 근본 개념은 어느 정도 충분한 타당성을 가지고 있다.

本 研究에서는 變動振幅의 피로하중을 받는 콘크리트 구조물의 정확한 피로해석 및 설계를 위하여 合理的이고 진보된 疲勞損傷理論을 제안하고자 한다. 이를 위하여 먼저 Miner理論이 콘크리트피로거동 서술에 적합한지를 실험 및 이론적으로 규명하고, 이로부터 새로운 손상이론을 유도하고자 한다.

2. 크기가 변하는 피로하중 실험

2.1 시편의 제작 및 양생

本 實驗研究에서 사용된 시편은 크기가 100×100×500mm인 콘크리트보로서 80개의 보를 제작하였다. 또한, 압축강도의 측정을 위하여 직경 φ100×200mm의 실린더 48개를 함께 제작하였다. 콘크리트의 배합성분과 강도는 表1에 나타난 바와 같다. 시편은 鋼몰드를 사용하여

제작하였고, 제작후 2일째부터 수증양생하였으며 약 50일 경과후 피로실험에 들어갔다.

2.2 실험방법

本 研究에서는 變動振幅荷重下에서의 콘크리트의 피로특성을 규명하기 위하여 그림 1과 같은 피로실험을 수행하였다. 피로하중은 4점 휨하중상태에서 각 응력수준에 따라 일정한 진폭으로 작용되었으며 하중속도는 250cycle/min로 하였다. 본 실험에 사용된 각 응력수준의 N_F 값은 일정진폭하중 하에서 얻은 S-N관계식으로부터 결정되었으며, 최대피로하중, f_r^{max} 은 정적 휨강도, f_r' 의 각각 85%, 75%, 65%로 하여 3종류의 응력수준을 결합하여 그림 1과 같은 4가지 경우의 실험을 수행하였다.

그림 1의 case A와 case B는 2단계로 크기가 변하는 피로하중으로서 먼저, case A는 피로하중 $S=f_r^{max}/f_r'=0.75$ 에서 피로수명 $N_{F,0.75}$ 의 20%를 가하고 난 뒤 피로하중 $S=0.85$ 에서 파괴시까지 하중을 가하는 형태를 보여 주고 있고, case B는 case A의 역순으로서 $N_{F,0.85}$ 의

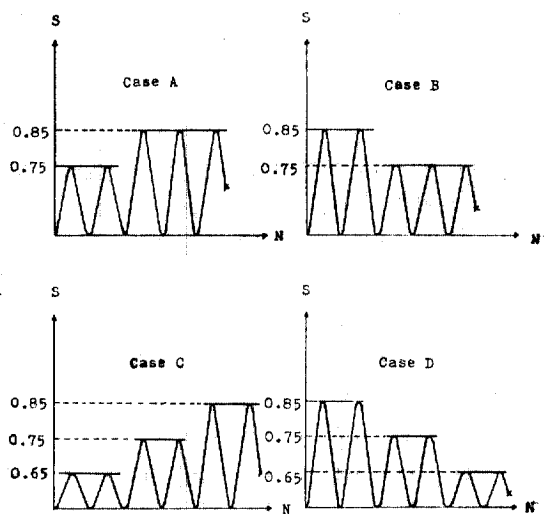


그림 1. 크기가 변하는 실험피로하중의 형태

20%를 먼저 가한 뒤 $S=0.75$ 에서 파괴시 까지 하중을 가한 경우를 보여주고 있다. case C 와 case D 는 3 단계로 변하는 피로하중 실험을 나타내며 $S=0.65$ 에서 $N_{F,0.65}$ 의 10%, $S=0.75$ 에서 $N_{F,0.75}$ 의 10%를 가하고 난 뒤 $S=0.85$ 에서 파괴까지 하중을 가한 경우이다. case D 는 case C 의 역순으로 하중을 가한 경우로서 $S=0.85$ 에서 $N_{F,0.85}$ 의 10%, $S=0.75$ 에서 $N_{F,0.75}$ 의 10%를 가하고 난 뒤 $S=0.65$ 에서 파괴시 까

表 2. 크기가 변하는 하중하에서의 피로실험 결과
(1) case A

시편번호	n_1	n_2
1	4,750	307
2	"	454
3	"	483
4	"	1,064
5	"	1,088
6	"	1,581
7	"	1,611
8	"	2,514
9	"	2,767
10	"	3,513
11	"	3,549
12	"	4,063

$N_{F1} = (N_F)_{0.75} = 23,752$
 $N_{F2} = (N_F)_{0.85} = 1,699$

(2) case B

시편번호	n_1	n_2
1	340	1,906
2	"	3,807
3	"	5,758
4	"	6,088
5	"	6,895
6	"	7,925
7	"	8,424
8	"	9,087
9	"	13,549
10	"	13,894
11	"	16,620
12	"	19,311

$N_{F1} = (N_F)_{0.85} = 1,699$
 $N_{F2} = (N_F)_{0.75} = 23,752$

(3) case C

시편번호	n_1	n_2	n_3
1	33,204	2,375	1,660
2	"	"	1,774
3	"	"	1,899
4	"	"	1,969
5	"	"	2,146
6	"	"	2,311
7	"	"	3,243
8	"	"	3,471
9	"	"	3,576
10	"	"	4,665
11	"	"	5,085
12	"	"	5,194

$N_{F1} = (N_F)_{0.65} = 332,040$
 $N_{F2} = (N_F)_{0.75} = 23,752$
 $N_{F3} = (N_F)_{0.85} = 1,699$

(4) case D

시편번호	n_1	n_2	n_3
1	170	2,375	174,443
2	"	"	196,579
3	"	"	200,679
4	"	"	223,727
5	"	"	230,207
6	"	"	234,240
7	"	"	254,062
8	"	"	269,990
9	"	"	272,104
10	"	"	295,238
11	"	"	308,017
12	"	"	385,935

$N_{F1} = (N_F)_{0.85} = 1,699$
 $N_{F2} = (N_F)_{0.75} = 23,752$
 $N_{F3} = (N_F)_{0.65} = 332,040$

지 하중을 가한 경우이다. 여기서, $N_{F,0.65}$ 는 피로하중 $S=0.65$ 에서 파괴시까지 하중을 반복하여 얻은 피로수명을 뜻한다.

2.3 實驗結果

上記 第 2.2 節에 서술된 실험방법에 따라 그림 1 의 4 가지 경우에 대하여 피로수명을 측정 한 결과 다음 表 2 와 같은 결과를 얻었다.

3. 累積損傷理論

3.1 Palmgren-Miner 理論

피로하중에 의한 累積損傷理論을 처음으로 제안한 연구자는 1924년의 Palmgren 이었으며 그 후 이 理論을 진전시킨 연구자가 바로 1945년의 Miner 였다^(6,16). 이 Palmgren-Miner 理論은 지금까지도 널리 사용되고 있는 損傷理論으로서 線型損傷 法則을 근거로 하고 있다.

이 Palmgren-Miner 의 線型損傷理論은 S-N 曲線을 利用하여 설명될 수 있다. 주어진 피로 응력수준 (fatigue stress level) S_1 에서 피로 파괴까지의 하중 반복수, 즉 피로수명을 N_{F_1} 이라고 할 때 같은 응력수준에서 실제로 가해진 하중 반복수 n_1 과의 比를 部分損傷 (damage fraction) D_1 이라고 정의한다. 이 部分損傷은 여러가지 다른 응력수준에서도 같은 方法으로 表示되며 이 部分損傷의 合이 1 보다 크거나 같을 때 파괴가 일어난다고 정의한다. 즉,

$$D_1 + D_2 + \dots + D_i + \dots + D_k \geq 1 \quad (1)$$

또는,

$$\frac{n_1}{N_{F_1}} + \frac{n_2}{N_{F_2}} + \dots + \frac{n_i}{N_{F_i}} + \dots + \frac{n_k}{N_{F_k}} \geq 1 \quad (2)$$

上記의 손상이론은 현재단계의 피로손상이 과거의 피로하중이력에 영향을 받지 않고 있음을 보여주고 있으며, 또한 하중의 작용순서에 대한 영향도 고려하지 못하고 있음을 알 수 있다.

3.2 實驗結果의 分析

이제 본 연구에서 수행된 실험결과를 이용하여 Palmgren-Miner 理論에 적용시켜 보기로 한다. 本 研究의 실험결과가 表 2 에 기술되어 있으며 表 2 의 값은 이용하여 누적손상량 D 를 구하고 이것을 表 3 에 요약하였다. 이 表 3 에서 보는 바와 같이 Miner 의 누적손상평균치가 1 과 다름을 알 수 있으며, Palmgren-Miner 의 理論이 콘크리트의 경우 合理的인 結果를 주지 못하고 있음을 알 수 있다. 특히, case A 나 case C 와 같이 피로하중의 크기가 점진적으로 증가하는 경우 Miner 의 누적손상평균은 1 보다 크게 나타나고 있고, case B 나 case D 와 같이 피로하중의 크기가 점진적으로 감소하는 경우에

는 누적손상평균이 1 보다 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 같은 형태의 변동피로하중이라도 작용하는 순서에 따라 그 누적손상이 다르게 나타남을 알 수 있으며, 콘크리트 피로의 경우 이 작용순서의 영향이 존재함을 알 수 있다. 이러한 結果는 최근에 연구된 참고문헌 29 의 실험결과와도 그 경향이 일치하고 있으며 금속의 경우에도 유사한 결과를 보여주고 있다⁽⁶⁾.

이러한 研究結果로부터 분석해 볼 때 Palmgren-Miner 의 線型損傷理論은 수정이 불가피하

表 3. Palmgren-Miner Theory 에 의한 총누적손상량 D

(1) case A

시편번호	n_1/N_{F_1}	n_2/N_{F_2}	$D = \sum \frac{n_i}{N_{F_i}}$
1	0.2	0.18	0.38
2	"	0.27	0.47
3	"	0.28	0.48
4	"	0.63	0.83
5	"	0.64	0.84
6	"	0.93	1.13
7	"	0.95	1.15
8	"	1.48	1.68
9	"	1.63	1.83
10	"	2.06	2.26
11	"	2.09	2.29
12	"	2.39	2.59

$\bar{D} = 1.33$

(2) case B

시편번호	n_1/N_{F_1}	n_2/N_{F_2}	$D = \sum \frac{n_i}{N_{F_i}}$
1	0.2	0.24	0.44
2	"	0.26	0.46
3	"	0.29	0.49
4	"	0.33	0.53
5	"	0.35	0.55
6	"	0.38	0.58
7	"	0.57	0.77
8	"	0.58	0.78
9	"	0.70	0.90
10	"	0.81	1.01
11	"	0.94	1.14
12	"	1.32	1.52

$\bar{D} = 0.76$

(3) case C

시편번호	n_1/N_{F1}	n_2/N_{F2}	n_3/N_{F3}	$D = \sum \frac{n_i}{N_{Fi}}$
1	0.1	0.1	0.98	1.18
2	"	"	1.04	1.24
3	"	"	1.11	1.31
4	"	"	1.16	1.36
5	"	"	1.26	1.46
6	"	"	1.35	1.55
7	"	"	1.91	2.11
8	"	"	2.04	2.24
9	"	"	2.10	2.30
10	"	"	2.74	2.94
11	"	"	2.99	3.19
12	"	"	3.06	3.26

$\bar{D} = 2.01$

(4) case D

시편번호	n_1/N_{F1}	n_2/N_{F2}	n_3/N_{F3}	$D = \sum \frac{n_i}{N_{Fi}}$
1	0.1	0.1	0.53	0.73
2	"	"	0.59	0.79
3	"	"	0.60	0.80
4	"	"	0.67	0.87
5	"	"	0.69	0.89
6	"	"	0.71	0.91
7	"	"	0.76	0.96
8	"	"	0.81	1.01
9	"	"	0.82	1.02
10	"	"	0.89	1.09
11	"	"	0.93	1.13
12	"	"	1.16	1.36

$\bar{D} = 0.96$

게 되며, 콘크리트 구조물의 정확하고 合理的인 疲勞解析 및 設計를 위해서는 진보된 비선형손상이론이 필요함을 알 수 있다. 따라서, 本研究에서는 變動疲勞荷重의 작용순서 등의 영향을 고려할 수 있는 合理的인 피로손상이론을 다음節에서 유도하여 제안하고자 한다.

3.3 콘크리트에 대한 非線型 疲勞損傷理論의 提案

前節에서 토의된 바와 같이 크기가 변하는 피로하중상태에서 발생하는 콘크리트의 누적손상은 Palmgren-Miner 가정과는 다른 結果를 주고 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 먼저 콘

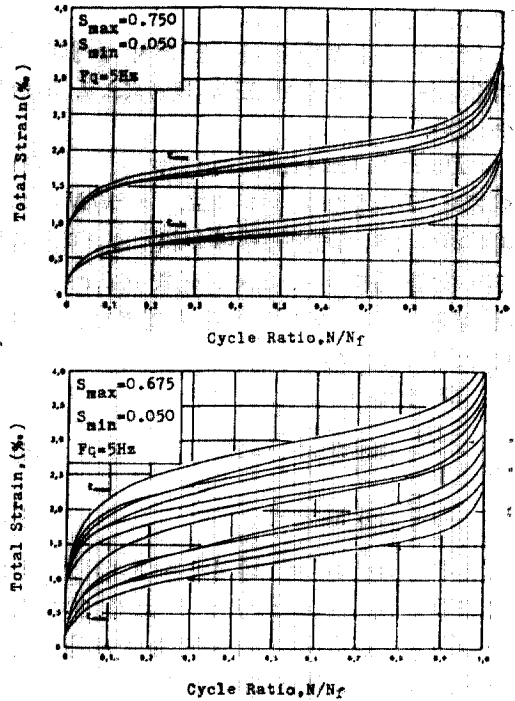


그림 2. 반복피로하중에 따른 콘크리트의 변형량의 누적현상

크리트의 피로손상이 어떤 양상으로 누적되는가를 검토한 뒤 이로부터 피로손상이론을 유도하고자 한다.

그림 2는 Holmen⁽¹⁴⁾의 실험결과로서 일정피로하중하에서 피로하중이 반복됨에 따라 콘크리트에 누적되는 變形量의 증가현상을 그래프로 그린 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 피로하중으로 인하여 콘크리트내에 발생하는 변형량은 계속해서 증가하고 있다. 특히, 이 그림 2를 자세히 살펴보면 반복하중이 시작되는 초기에는 변형량은 증가하나 변형의 증가율(rate of increase)은 둔화되는 현상을 보이고 있고, 피로하중의 중반에는 손상의 증가율이 거의 일정하며, 피로하중의 중반기 즉, 피로파괴가 일어나기 얼마전 동안은 변형의 증가율이 급속히 커지는 3개의 구간으로 구별되고 있음을 알 수 있다. Holmen 이 지적하였듯이 피로하중이 반복됨에 따라 누적되는 변형량의 증가는 콘크리트내의 손상증가를 의미하며, 따라서 그림 2는 피로로 인하여 콘크리트내에 누적되는 損傷의 증가현상

을 잘 표현해 주고 있다.

上記와 같이 3 단계 과정을 거쳐 발생하는 누적손상은 다음과 같이 三次 損傷式으로 表示할 수 있다.

$$D = ax^3 + bx^2 + cx \quad (3)$$

여기서, D =손상을 나타내고, $x = n/N_f$ =피로 파괴까지의 하중반복수에 대한 실제하중반복수의 比를 나타낸다. 또한, 係數 a, b, c 는 다음과 같은 세가지 조건에 의하여 결정되는 상수이다(그림 3 참조).

$$D = 1 \text{ at } x = 1 \quad (4)$$

$$\frac{dD}{dx} = \tan\theta \text{ at } x = x_0 \quad (5)$$

$$\frac{d^2D}{dx^2} = 0 \text{ at } x = x_0 \quad (6)$$

上記의 식 (4)는 피로파괴점을 표시하고 있고, 式 (5)와 式 (6)은 그림 2와 그림 3과 같은 손상곡선의 변곡점에서의 角度 등에 대한 조건을 表示한다. 이에 대한 좀더 자세한 내용이 그림 3에 그려져 있다. 따라서, 이 損傷曲線은 θ 와 x_0 값에 의해 결정됨을 알 수 있다. 그림 3의 피로손상곡선이 모든 피로응력수준에 대하여 같은 경우, 여러가지 크기의 피로하중이 작용하는 경우에 하중작용 순서의 영향을 고려할 수 없게 된다. 따라서, 매개변수 θ 는 피로하중에 따라 변화되는 값으로 고려될 수 있다. 이 사실은 그

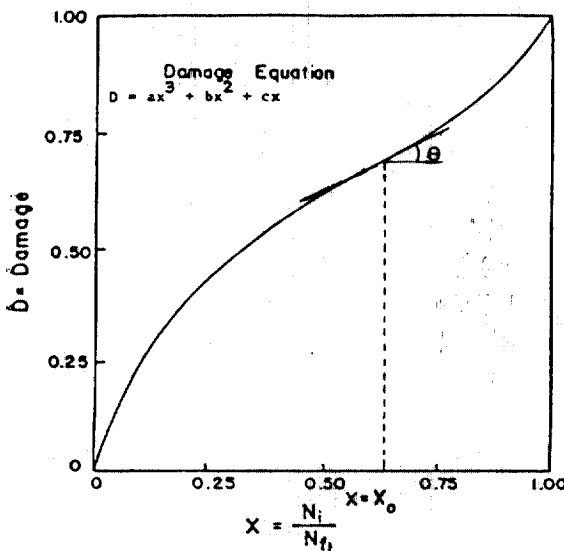


그림 3. 非線型 疲勞損傷曲線

림 2의 실험결과를 상세히 조사함으로써 규명될 수 있으며, 피로하중이 작아짐에 따라 변곡점에서의 θ 값이 커짐을 알 수 있다. 그림 2에서 보는바와 같이 누적손상곡선의 변곡점은 대략 $x=0.7$ 에서 존재함을 알 수 있으며 이 변곡점에서의 평균 θ 값은 피로응력수준 $S=0.75$ 에서 $\theta=35.8^\circ$, $S=0.675$ 에서 $\theta=47.7^\circ$ 로 나타났다. 이 값들을 보간하여 본 연구에서 수행된 피로하중 $S=0.85$, $S=0.75$, $S=0.65$ 에 대하여 피로손상곡선을 구하면 다음과 같다.

$$S = 0.85 ; D = 1.727x^3 - 3.625x^2 + 2.898x \quad (7)$$

$$S = 0.75 ; D = 0.757x^3 - 1.589x^2 + 1.832x \quad (8)$$

$$S = 0.65 ; D = -0.712x^3 + 1.495x^2 + 0.217x \quad (9)$$

上記 式 (7)~(9)를 그림으로 표시한 것이 그림 4이며, 각 피로응력수준에 따라 상이한 손상경로를 따름을 알 수 있다.

이제 본 연구에서 수행된 실험연구 결과를 본節에서 제안된 損傷理論에 적용해 보기로 한다. 그림 5는 2 단계 피로하중으로 실험된 case A와 case B를 적용시킬 수 있는 경우로서, 피로하중 $S=0.85$ 와 $S=0.75$ 의 두가지 크기의 피로하중에 대한 경우이다. 그림 5에서 굵은 점선

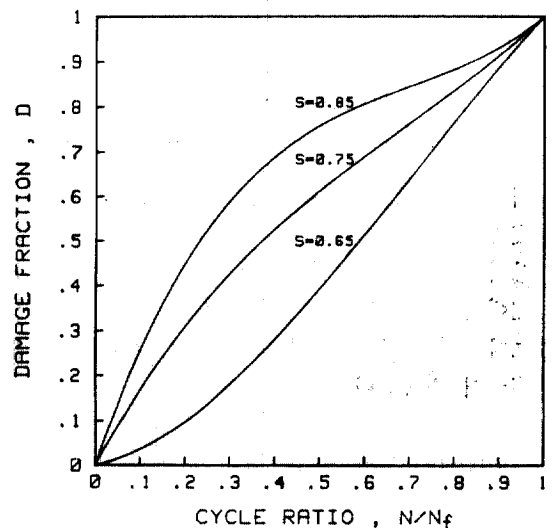


그림 4. Holmen의 실험결과로부터 얻어진 각 피로응력수준에 대한 손상곡선

은 낮은 피로하중 $S=0.75$ 에서 높은 피로하중 $S=0.85$ 로 이동되는 변동진폭의 피로하중을 나타내며 이 경우 총누적손상량은 $\bar{D} = \sum n_i / N_{Fi} = 0.2 + (1 - 0.12) = 1.08$ 이 된다. 피로하중의 경로가 높은 하중에서 낮은 하중으로 이동된 경우 즉, case B는 그림 5에서 가늘고 작은 점선으로 표시되어 있으며 이 경우 총누적손상량은 $\bar{D} = \sum n_i / N_{Fi} = 0.88$ 로 나타나고 있다.

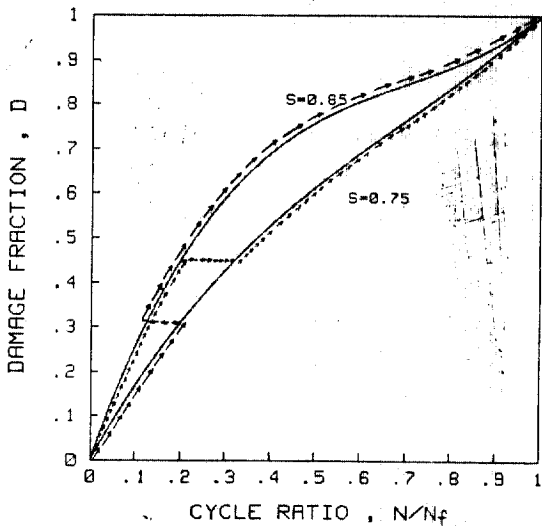


그림 5. 2단계로 크기가 변하는 피로하중에 대한 누적손상의 경로

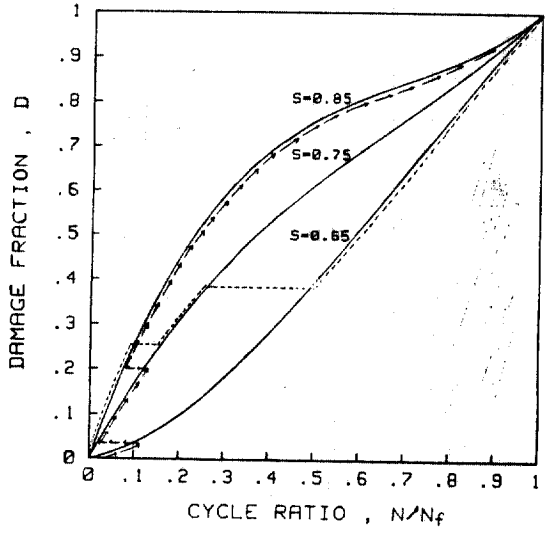


그림 6. 3단계로 크기가 변하는 피로하중에 대한 누적손상의 경로

그림 6은 3단계로 변하는 피로하중의 경우를 표시하고 있으며 낮은 피로하중에서 높은 피로하중으로 가는 경로가 굵은 점선으로 표시되어 있으며 이때 누적손상량 $\bar{D} = 1.13$ 이 된다. 또한, 높은 피로하중에서 낮은 피로하중 즉, $S=0.85$ 에서 $S=0.75$ 그리고 $S=0.65$ 로 이동되는 경우가 작은 점선으로 표시되어 있으며 이때의 누적손상량은 $\bar{D} = 0.71$ 을 얻게 된다.

위에서 설명한 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안된 非線型損傷理論은 피로하중의 크기와 작용순서에 대한 영향을 고려하고 있으며, 그 결과도 실험결과와 근사함을 보여주고 있다. 즉, 변동진폭피로하중을 받는 콘크리트에는 Palmgren-Miner의 손상이론이 직접 적용될 수 없음을 아울러 시사해 주고 있다. 그림 5와 그림 6은 피로하중의 크기가 어떻게 변하는 피로 파괴시 까지의 손상량 \bar{D} 를 구할 수 있게 하며, 잔존수명 n_i 도 계산할 수 있게 해 준다. 또한, 그림 4-6에서 표시된 것 이외의 피로응력수준은 θ 값의 보간(interpolation)에 의해 피로손상곡선을 얻을 수 있으므로 일반적인 형태의 피로하중도 고려가 가능해진다.

3.4 等價累積損傷理論

前節에서는 크기가 변하는 피로하중이 작용하는 경우 피로하중의 크기와 그 작용순서의 영향을 고려할 수 있는 合理的인 非線型損傷理論을 제안하였다. 이제 本節에서는 等價損傷의 개념을 근거로하는 좀더 간편한 이론에 대해 연구하고자 한다.

이제 크기가 서로 다른 피로하중이 작용하는 경우를 생각하기로 한다. 피로응력수준 S_i 에서 n_i 만큼 하중을 반복했을 때, 이것이 어느 기준 피로응력수준 S_1 에서 똑같은 양의 손상을 주게 하는 하중반복수를 n_{ie} 로 정의하기로 한다. 이러한 관계를 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$n_{ie} = n_i \left(\frac{S_i}{S_1} \right)^P \tag{10}$$

여기서 P = 指數이다. 上記 式 (10)의 관계는 Marin⁽⁸⁶⁾에 의해 금속피로에서 연구된 관계식이며 이제 콘크리트에 적용시켜 보기로 한다. 이제 손상비를 $D_i = n_{ie} / N_1$ 이라고 정의하면 다음식을 成立시킬 수 있다.

$$\sum D_i = D_1 + D_2 + \dots + D_i = 1 \quad (11)$$

式 (11)에 式 (10)을 代入하면 다음을 얻는다.

$$\left(\frac{n_{1e}}{N_1}\right) + \left(\frac{n_{2e}}{N_1}\right) + \dots + \left(\frac{n_{ie}}{N_1}\right) = 1 \quad (12)$$

式 (12)을 다시쓰면,

$$\left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \left(\frac{n_2}{N_1}\right) \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^p + \dots + \left(\frac{n_i}{N_1}\right) \left(\frac{S_i}{S_1}\right)^p = 1 \quad (13)$$

式 (13)을 다시 정리하면 i 번째 응력수준에서의 잔존수명 n_{ir} 을 구할 수 있다. 즉,

$$n_{ir} = (N_1 - n_1) \left(\frac{S_1}{S_i}\right)^p - n_2 \left(\frac{S_2}{S_i}\right)^p - n_3 \left(\frac{S_3}{S_i}\right)^p - \dots - n_{i-1} \left(\frac{S_{i-1}}{S_i}\right)^p \quad (14)$$

또는

$$n_{ir} = kN_1 \quad (15)$$

여기서

$$k = \left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right) \left(\frac{S_1}{S_i}\right)^p - \frac{n_2}{N_1} \left(\frac{S_2}{S_i}\right)^p - \frac{n_3}{N_1} \left(\frac{S_3}{S_i}\right)^p - \dots - \left(\frac{n_{i-1}}{N_1}\right) \left(\frac{S_{i-1}}{S_i}\right)^p \quad (16)$$

上記式 (15), (16)에서 係數 k 의 의미는 피로응력수준 S_i 에서의 잔존수명(remaining life) n_{ir} 을 구하기 위한 계수로서, 이 잔존수명은 기준응력 S_1 에서의 피로수명 N_1 에 k 를 곱함으로써 얻어질 수 있다는 의미를 갖고 있다.

이제 본 연구에서 수행한 실험결과를 이용하여 式 (13)의 지수 p 를 구하면 表 4와 같다.

表 4에서 알 수 있듯이 등가손상모델의 지수 p 의 값은 어느정도 균일함을 알 수 있으며 평균치를 사용하여 잔존수명을 계산할 수 있다.

表 5는 등가누적손상이론에 의해 계산된 잔존수명과 본 실험에서의 n_{ir} 값을 비교하고 있다. 이 表 5에서 보듯이 본 등가누적손상모델은 간단하면서도 비교적 만족스런 결과를 주고 있음을 알 수 있다.

表 4. 각 피로하중별 지수 p 의 값

case A	case B	case C	case D	평 균
18.44	18.15	16.72	19.55	18.21

表 5. 등가누적손상 모델에 의한 잔존수명과 실험결과와의 비교

피로하중구분		잔존수명	
		등가누적손상이론	실험결과
2 단계하중 (n_{2r})	case A	1,945	1,920
	case B	13,276	13,301
3 단계하중 (n_{3r})	case C	2,015	3,075
	case D	170,124	252,350

4. 結 論

本 研究에서는 크기가 변하는 변동진폭의 疲勞荷重이 콘크리트에 작용할 때 피로파괴를 合理的으로 예측할 수 있는 非線型損傷理論에 대하여 研究하였다. 이를 위하여 콘크리트보에 대한 피로실험을 수행하였으며 本 실험결과가 손상이론유도에 사용되었다. 피로하중은 크기와 작용순서의 영향을 분석하기 위하여 2 단계 및 3 단계로 변하는 변동하중을 고려하였다. 本 研究에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 크기가 변하는 피로하중에 대한 콘크리트의 실험결과 하중의 크기와 작용순서에 대한 영향이 큰 것으로 나타났다.

(2) Palmgren-Miner가 제안한 線型累積損傷理論은 변동진폭의 피로하중을 받는 콘크리트의 경우 잘 맞지 않는 것으로 나타났다.

(3) 콘크리트 구조물에 크기가 점진적으로 증가하는 피로하중이 작용하는 경우 Miner의 損傷합은 1보다 크게 나타나고, 처음에 큰 하중이 작용하고 점진적으로 그 크기가 감소하는 피로하중인 경우는 損傷합이 1보다 작은 것으로 실험결과 나타났다.

(4) 本 論文에서는 콘크리트에 변동진폭의 피로하중이 작용하는 경우, 피로하중의 크기와 그 작용순서의 영향을 고려할 수 있는 진보된 非線型累積損傷理論을 提案하였다.

本 研究의 結果는 변동진폭의 반복하중을 받는 콘크리트구조물의 合理的인 피로해석 및 설계에 하나의 토대가 될 수 있을 것으로 사료된다.

謝 辭

本 研 究 은 한국과학기술연구원의 1985년도 일반기연구과
제 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드린다.

參 考 文 獻

1. Aas-Jakobsen, K., "Fatigue of Concrete Beams and Columns", *Trondheim, NTH Institute for Betongkonstruksjoner*, September, 1970, *Bulletin* No. 70-1, pp. 148.
2. Ang, A.H.S., and Munse, W.H., "Practical Reliability Bases for Structural Fatigue", *ASCE, National Structural Engineering Conference, Preprint* 2494, New Orleans, La., Apr., 1975.
3. Balaguru, P., and Shah, S.P., "A Method of Predicting Crack Widths and Deflections for Fatigue Loading", *Publication SP-75, ACI*, 1982, pp. 153~176.
4. Benjamin, J.R., and Cornell, C.A., "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers", McGraw Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1970.
5. Bennett, E.W., and Muir, S.E., "Some Fatigue Tests of High Strength Concrete in Axial Compression", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 19, No. 59, June, 1967, pp. 113~117.
6. Collins, J.A., "Failure of Materials in Mechanical Design", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1981.
7. Corten, H.T., Sinclair, G., and Dolan, T.J., "On Fatigue Life of Aluminum", *Proceedings, American Society for Testing and Materials*, Vol. 54, 1954, pp. 753.
8. Cudney, G.R., "Stress Histories of Highway Bridges", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 94, No. ST12, Dec., 1968, pp. 2725~2738.
9. "Fatigue Reliability: Introduction", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 108, No. ST1, Jan., 1982, pp. 3~23.
10. "Fatigue Reliability: Variable Amplitude Loading", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 108, No. ST1, Jan., 1982, pp. 47~69.
11. Freudenthal, A.M., "Prediction of Fatigue Failure", *Journal of the Applied Physics*, Vol. 31, No. 12, Dec., 1968, pp. 2196~2198.
12. Hasofer, A.M., and Lind, N.C., "Exact and Invariant Second-Moment Code Format", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 100, No. EM1, Feb., 1978, pp. 111~121.
13. Hanson, J.M., "Design for Fatigue", *Handbook of Structural Concrete*, edited by F.K. Kong et al., Pitman Advanced Publishing Program, 1983, pp. 16-1~16-35.
14. Holmen, J.O., "Fatigue of Concrete of Constant and Variable Amplitude Loading", *Publication SP-75, ACI*, 1982, pp. 71~110.
15. Hsu, T.T.C., "Fatigue of Plain Concrete", *Journal of ACI*, Vol. 78, July-Aug, 1981, pp. 292~305.
16. Miner, M.A., "Cumulative Damage in Fatigue", *Journal of the Applied Mechanics, Transactions of the ASME*, Vol. 67, Sept., 1945, pp. 159~164.
17. Nolte, K.G., and Hansford, J.E., "Closed Form Expressions for Determining the Fatigue Damage of Structures Due to Ocean Waves", *Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC*, paper 2606, May., 1976.
18. Rolfe, S.T., and Barsom, J.M., "Fracture and Fatigue Control in Structures", Prentice-Hall, Englewood cliffs, N.J., 1977.
19. Shah, S.P., and Chandra, S., "Fracture of concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading", *Journal of the ACI*, Vol. 67, No. 10, Oct., 1970, pp. 816~824.
20. Shah, S.P., "Predictions of Cumulative Damage for Concrete and Reinforced Concrete", *Matériaux et Constructions*, Vol. 17, No. 97, pp. 65~68.
21. Sparks, P.R., "The Influence of Rate of Loading and Material Variability on the Fatigue Characteristics of Concrete", *Publication SP-75, ACI*, 1982, pp. 331~342.
22. Tepfers, R., "Fatigue of Plain Concrete Subjected to Stress Reversals", *Publication SP-75, ACI*, 1982, pp. 195~216.
23. Tepfers, R., and Kutti, T., "Fatigue Strength

- of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete”, *Journal of the ACI*, May., 19119, Vol. 76, pp. 635~652.
24. Tefpers, R., “Tensile Fatigue Strength of Plain Concrete”, *Journal of the ACI*, Aug., 1979, Vol. 76, pp. 919~933.
 25. Weibull, W., “Fatigue-Testing and Analysis of Results”, Pergamon Press, Oxford, England, 1961.
 26. Wirsching, P.H., and Yao, J.T.P., “Statistical Methods in Structural Fatigue”, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 96, No. ST6, June., 1970, pp. 1201~1219.
 27. Yao, J.T.P., “Fatigue Reliability and Design”, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 100, ST9, Sept., 1974.
 28. 변근주, 최홍식, 이호범, “일정진폭의 반복하중을 받는 무근콘크리트의 피로거동” 대한토목학회, 1985년도 학술발표회 개요집, pp. 141~149.
 29. 천성관, 유재원, 한상훈, 변근주, “반복하중을 받는 콘크리트의 누가손상특성” 대한토목학회 1986년도 학술발표회 개요집, pp. 5~10.
 30. 오병환, “콘크리트의 피로강도 및 피로신뢰성 해석에 관한 이론 및 실험연구”, 대한토목학회 논문집, 제 5 권 제 4 호 1985. 12, pp. 113~119.
 31. 오병환, 이회택, “콘크리트 휨피로수명의 확률분포” 대한토목학회 논문집, 제 6 권 제 2 호 1986. 6, pp. 103~109.
 32. 오병환, 이회택, “일정 및 변동하중하에서의 콘크리트의 피로특성연구”, 대한토목학회, 1986년도 학술발표회 개요집, pp. 11~17.
 33. 오병환, 김지상, “콘크리트 해양구조물의 확률론적 피로해석” 대한토목학회, 1986년도 학술발표회 개요집, pp. 214~220.
 34. 오병환, 신영기, “Flexural Fatigue Strength and Reliability of Concrete”, *Proceeding of the 1st East Asian Conf. on Structural Engineering and Construction*, Jan., 1986, pp. 509~520.
 35. 오병환, 이회택, “Fatigue Characteristics of Concrete”, *Proceedings of the 2nd APCS*, July., 1986, pp. 97~100.
 36. Marin, J., “*Mechanical Behavior of Engineering Materials*”, Prentice Hall., 1962.

(接受 : 1986. 10. 31)