

一定振幅의 反復荷重을 받는 無筋콘크리트의 疲勞特性

邊 根 周

〈延世大 工科大学 土木工學科 教授 · 工學博士〉

邊 潤 周

〈三友技術團 道路部 課長〉

1. 서 론

모든 구조물은 계속되는 반복하중을 받게 되면 어떤 형태이든간에 대응되는 反應作用을 하게 되고 이로 인하여 靜的破壞荷重以下에서도 파괴상태에 이르게 된다.⁽¹⁾ 이런 현상은 疲勞라는 用語로 說明될 수 있다. 道路나 飛行場 鋪裝, 橋梁, 海洋構造物 等에서는 이 材料의 疲勞挙動이 設計나 維持管理에서 重要한 位置를 차지하는 것으로 알려져 있다. 特히 콘크리트는 材料의 非線形性, 非均質性 및 非異方性의 性質을 가지고 있기 때문에 그 疲勞挙動을 정확히 定립시키기가 매우 어렵다. 최근에 와서 콘크리트구조물의 피로에 관한 實驗的 研究가 많이 研究發表되고 있으나, 國內에서는 거의 찾아보기 힘들다.

이와같은 材料의 疲勞研究는 主로 實驗室內에서 수행되는데, 實驗材料의 性質, 實驗裝備, 環境條件, 實驗變數 等이 現場과 상당한 차이를 가지고 있기 때문에, 實際의 疲勞現象을 그대로 밝혀주지는 못한다.

現在까지의 疲勞研究는 크게 나누어 一定振幅이나 變動振幅의 反復作用荷重下에서 荷重(f) - 疲勞壽命(N) - 應力比(R) - 載荷振動數(T) 사이의 相關關係,⁽²⁾ 變形率, 彈性係數의 分析, 累加損傷解析에 關한 研究에 집중되어 왔다. 그러므로 本 研究에서는 今年부터 建設되는 本格的인 콘크리트 鋪裝構造의 設計에 반드시 필요한 우리나라 콘크리트 材料의 疲勞挙動을 究明하고자 한다. 適用可能한 變數들을 實驗條件으로 取하고, 國內의 材料들로 製作한 供試體에 대한 疲勞實驗을 실시하여 $f - N - R - \frac{1}{T}$ 사이의 相關關係의 導出, 骨材치수가 피로강도에 미치는 영향, 피로강도해석을 위한 修正 GOODMAN DIAGRAM을 導出하여 콘크리트 道路鋪裝設計의 基本資料를 제공하고자 한다.

1-2. 제한사항

- (I) KSF 규정에 따라 배합된 원극형 공시체를 사용하며, 압축강도는 210kg/cm^2 에 국한한다.
- (II) 굵은 골재는 한강産 쇄석(#57, (25mm), #8 (10mm))를 사용하며, 시멘트는 쌍용시멘트

를 사용한다

(Ⅲ) 최대응력(하중)은 정적 압축강도의 95%, 90%, 80%, 70%에 해당되는 강도를 응력(하중)으로 환산하여 사용한다.

(Ⅳ) 응력비(R)* 는 0.2, 0.5, 0.8을 취한다.

* 應力比 = $\frac{\text{最小作用應力}}{\text{最大作用應力}}$

(Ⅴ) 주파수($\frac{1}{T}$)* 는 250, 400, 600cycles/min 으로 한다.

(Ⅵ) 공시체의 정적압축강도는 40일 이상 수중 양생 후의 강도를 기준으로 한다.

(Ⅶ) 정적실험 및 동적실험은 Servohydraulic System인 미국산 피로실험기 Instron Model 1333을 사용하였다.

(Ⅷ) 공시체 파괴는 변형율이 0.006~0.008 의 범위에 있을 때 완전파괴를 일으키는 것으로 간주하며 기계를 자동제어시킨다.

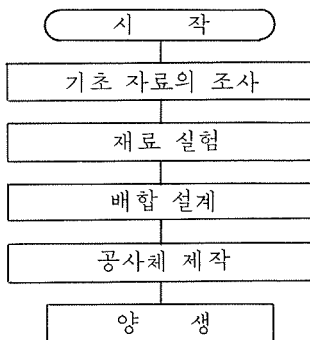
* 주파수는 1 分間에 作用되는 荷重의 反復 作用回數를 의미함.

(Ⅸ) 진동파형은 Heversine파형* 을 이용한다.

(Ⅹ) 진동수가 10⁷ 을 초과할 때는 피로한계에 도달한 것으로 한다.

2. 피로 실험

2-1. 실험방법



(A)

2-2. 실험재료

본 실험은 비중 3.15인 쌍용 시멘트, 한강산 모래와 최대입경이 25mm 및 10mm인 부순자갈을 사용하였으며, 그 물리적 특성은 표2-1과 같다. 잔골재와 굵은 골재의 입도곡선은 그림 2-1에 제시한다.

표 2-1 골재의 물리적 특성

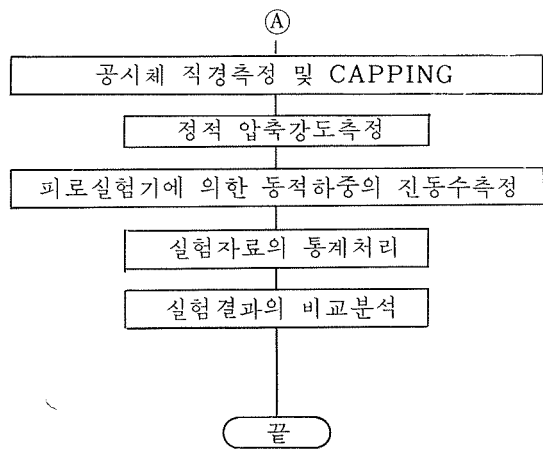
종 류	비 중	흡수율(%)
잔 골 재	2.62	1.01
굵은골재	25mm	2.70
	10mm	2.66

2-3. 공시체 제작, 양생 및 강도실험

공시체의 제작 및 양생은 아래와 같은 KSF 규정을 따랐다.

○KSF2403 <실험실에서 콘크리트의 압축 및 휨강도 실험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법>

○KSF2502-70 <체가름 실험방법>



* Haversine은 시간에 따라 하중의 크기가 sine curve로 주어지는 載荷形態임.

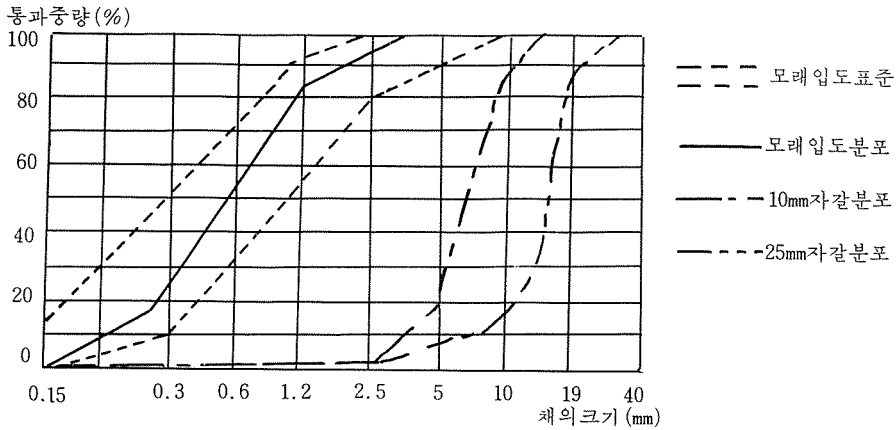


그림 2-1. 골재 세가름 곡선

○KSF2503-70 <굵은 골재 비중 및 흡수량 실험방법> 합하였고, 1일 간 공기중 양생한 다음, 공시체로 실험하는 중에 강도 변화를 최소화하기 위

○KSF2505-70 <잔골재의 비중 및 흡수량 실험방법> 하여 약 40일 간의 수중양생을 하였다. 표 2-2에 각 변수에 따른 공시체 수, 표 2-3에 배합

배합설계에 따라 표 2-2를 근거로 한 가지 배 설계표가 제시되어 있다.
합비에 대하여 한번에 8개씩의 공시체량을 배

표 2-2 각 변수에 따른 공시체수

fmax	$R = \frac{f_{min}}{f_{max}}$	진동수 (cycle/min)	골재최대치수 (mm)	공시체 갯 수	총공시체수
측정시의 정적 압축강도에 대해 주어지는 백분율 95% 90% 80% 70%	0.2	250	25	3	실험용 216개 강도측정용 60개
			10	3	
		600	25	3	
			10	3	
	0.5	250	25	3	
			10	3	
		600	25	3	
			10	3	
	0.8	250	25	3	
			10	3	
		400	25	3	
			10	3	
600	25	3			
	15	3			

표 2-3 배합설계표

설계기준 강도(kg/cm ²)	굵은골재 최대치수 (cm)	슬럼프값 (cm)	W/C (%)	S/a (%)	중량배합비		
					C	S	G
210	25mm	7	51.2	44.70	1	2.40	3.00
	10mm	7	51.0	43.73	1	1.82	2.43

2-4. 實驗裝置

피로실험기는 最大荷重을 $\pm 50+0n$, 最大變形量을 $\pm 75mm$ 까지 加할 수 있고, 周波數가 1~100Hz의 범위에 있는 美國 INSTRON社의 model 1333이며, Servohydraulic system 으로 되어있다. 이 피로시험차의 구조를 도시하면 그림 2.2와 같다.

2-5. 정적압축강도 및 피로강도 실험

40일간 수중양생을한 공시체를 Copping한 다음, 자동화된 피로실험기와 만능실험기에 의한 정적압축강도실험을 하였다. 이때 두 기계에 의

한 정적압축강도가 같은 값을 나타내는 것을 확인하고, 피로실험기에 의한 정적압축강도를 계속적으로 측정하였다.

실험하기 직전의 정적압축강도를 측정하여 피로실험에 필요한 f_{max} 을 산정하는데 기초자료로 하였다. 입력자료는 이 f_{max} 와 함께 f_{min} , 주파수, Hoversine파형 등이 그 자료가 되며 표 2-2에 따라 해당되는 공시체 수량만큼 실험을 하였다.

3. 피로실험 및 자료분석

3-1. 통계처리

본 실험적 연구를 통하여 얻어진 하중(f), 피로수명(N), 재하진동수($\frac{1}{T}$) 사이의 상관관계를 통계적으로 도출하고자 한다.

f 와 N 의 대수치인 $\log N$ 사이의 관계는 1차 선형적 관계이며 $\log N$ 은 정규분포를 이루고 있

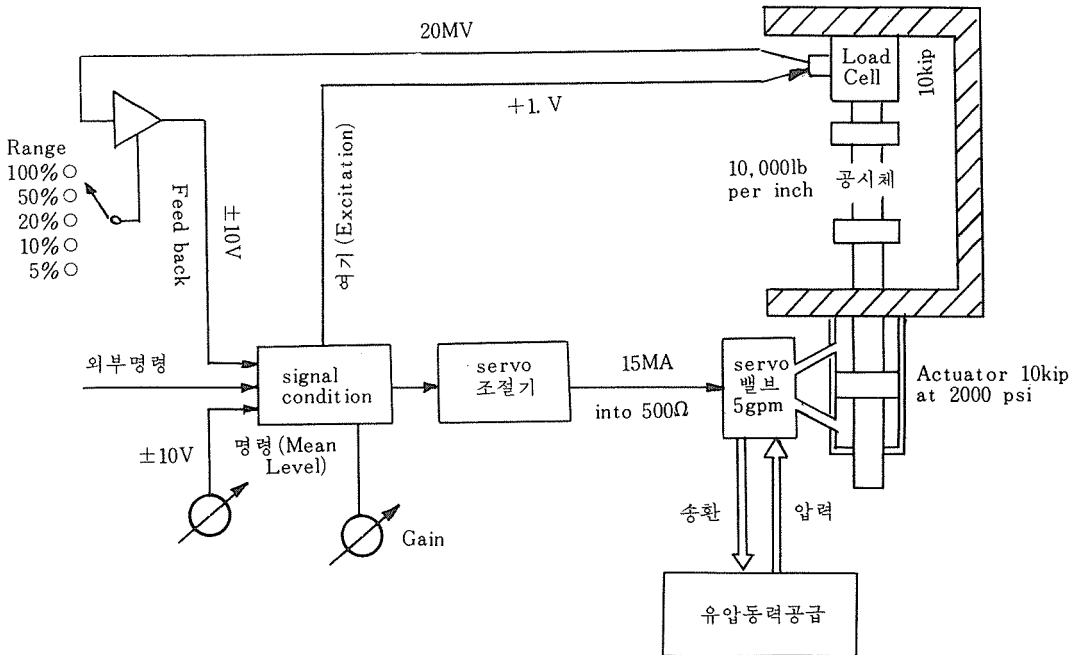


그림 2-2. 피로 실험기의 구조 원리도

다고 보고, 최소 자승법에 의한 1차 선형 회귀분석을 식 3-1에 의거하여 시행하였다.⁽³⁾

응력비 $\left(\frac{\text{최대응력}}{\text{최소응력}}\right)$ 를 기준으로한 $f-N-\frac{1}{T}$ 의 상관관계에 대하여는 재하진동수의 영향이 거의 없으므로 그 자료를 종합한 후 대표 직선식과 식 3-2에 따른 신뢰구간을 구하였다.⁽⁴⁾ 그런 다음 식 3-3에 있는 Weibull 분포함수⁽⁵⁾를 실험결과에 적용하였는데, 이는 재질을 구성하는 단위물질의 피로손상이 피로수명과 비례적인 관계를 갖으며, 각 단위 구성요소에 반복응력의 주파수가 그대로 전달되고, 피로수명이 지수 형태의 분포를 갖는다는 가정하에서 전개되므로 피로실험을 수학적으로 잘 검정하고 있다.

식 3-3에서 $n_0 = 0$ 일 때가 합리적으로 사료되고, 매개변수 α 의 V 는 모멘트 법⁽⁶⁾에 의하여 결정하였다.

$$Y = a + bX$$

(3-1)

(a : 절편, b : $S \times r/S^2$)

$$Y_0 \pm t(v, 1 - \frac{\beta}{2})$$

$$\left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2} \right]^{\pm} S \quad (3-2)$$

(v 와 $1 - \frac{\beta}{2}$ 에 따른 t 분포함수값)

$$F_N(n') = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n' - n_0}{V - n_0} \right)^\alpha \right]$$

$$L_N(n') = 1 - F_N(n') = \exp \left[- \left(\frac{n' - n_0}{V - n_0} \right)^\alpha \right]$$

(n' : N 의 특정값)

(3-3)

n_0 : 최소수명, $\alpha \cdot V$: 매개변수)

3-2. $f-N-R-\frac{1}{T}$ 에 대한 분석

(1) 골재 10mm와 25mm에 대한 $f-N-R-\frac{1}{T}$

상관관계분석

실험결과로부터 그림 3-1, 그림 3-2, 그림 3-3 및 그림 3-4, 그림 3-11, 그림 3-12에 골재

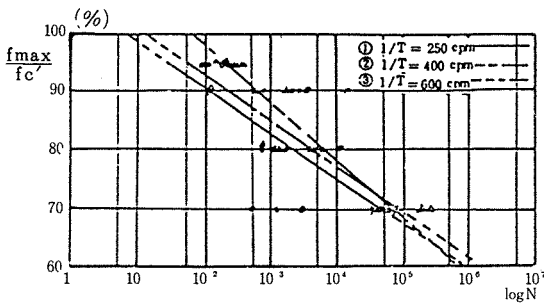


그림 3-1. 골재치수 10mm, $R=0.2$, $f-N$ 도표

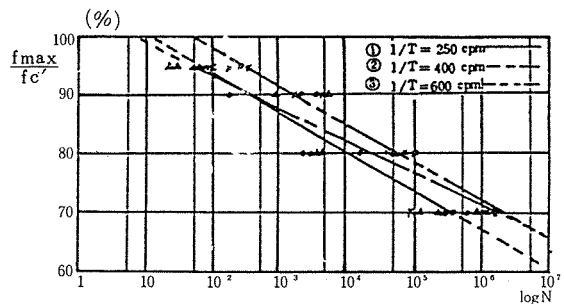


그림 3-2. 골재치수 10mm, $R=0.5$, $f-N$ 도표

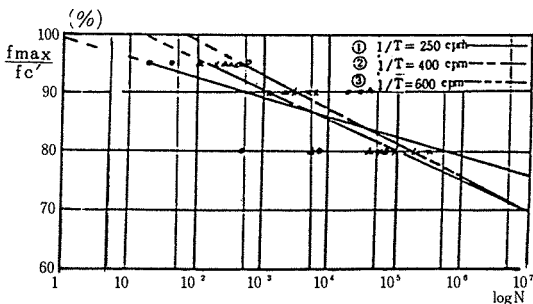


그림 3-3. 골재치수 10mm, $R=0.8$, $f-N$ 도표

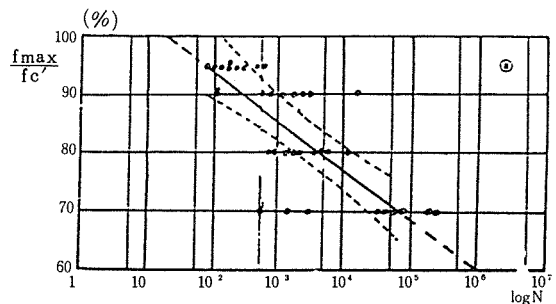


그림 3-4. 골재치수 10mm, $R=0.2$, $f-N$ 도표

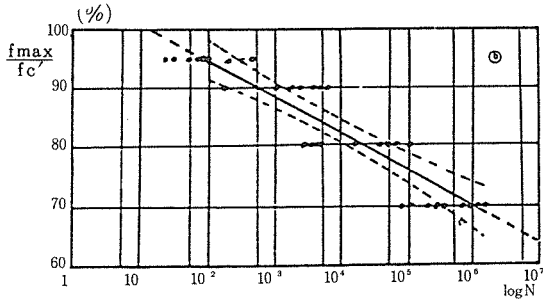


그림 3-5. 골재치수 10mm, R=0.5, f-N도표

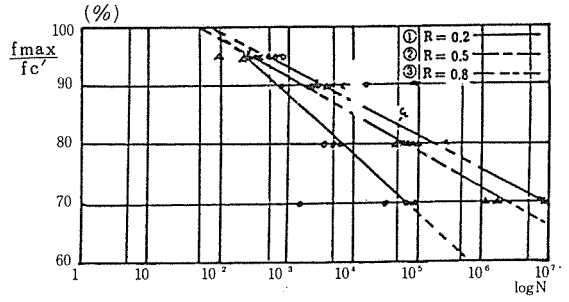


그림 3-9 골재치수 10mm, 1/T=600cpm, f-N도표

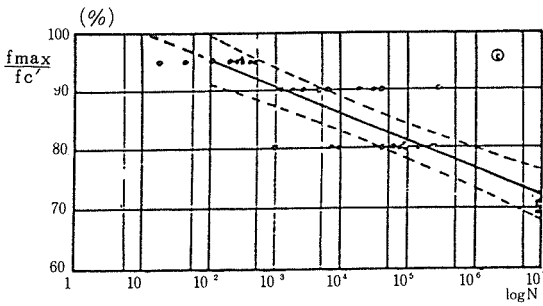


그림 3-6. 골재치수 10mm, R=0.8, f-N도표

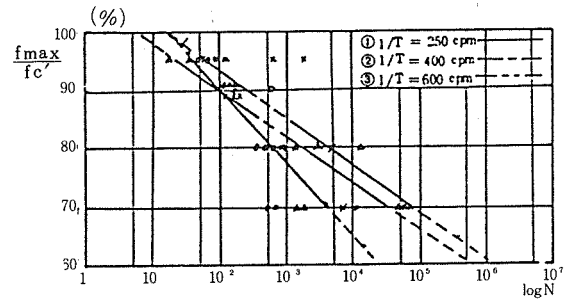


그림 3-10. 골재치수 25mm, R=0.2, f-N도표

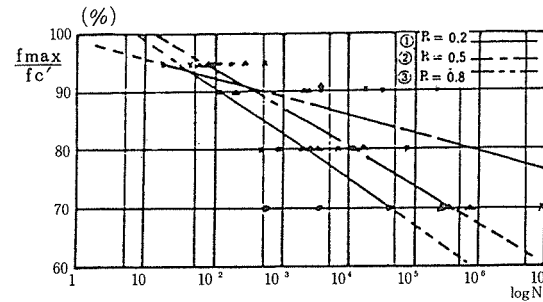


그림 3-7. 골재치수 10mm, 1/T=250cpm, f-N도표

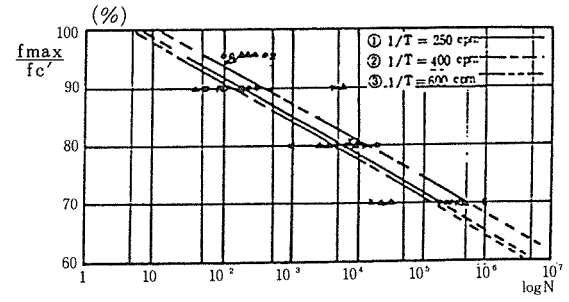


그림 3-11. 골재치수 25mm, R=0.5, f-N도표

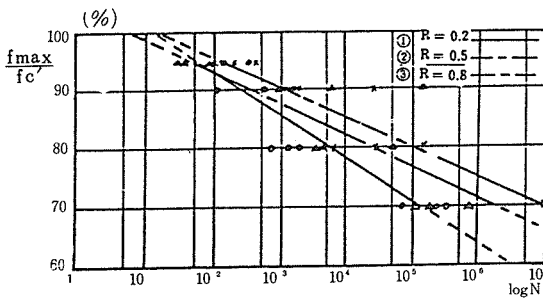


그림 3-8. 골재치수 10mm, 1/S=400cpm, f-N도표

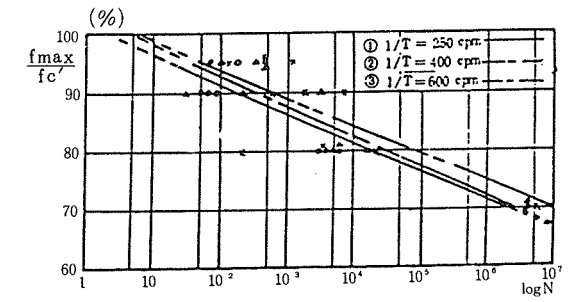


그림 3-12. 골재치수 25mm, R=0.8, f-N도표

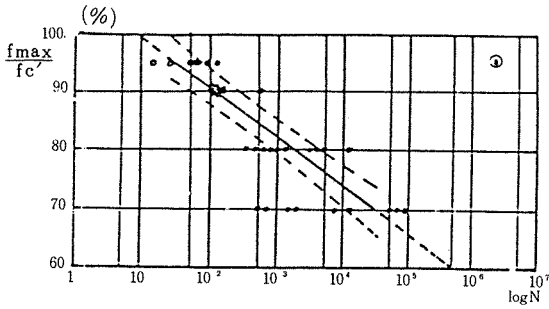


그림 3-13. 3 골재치수 25mm, R=0.2, f-N도표

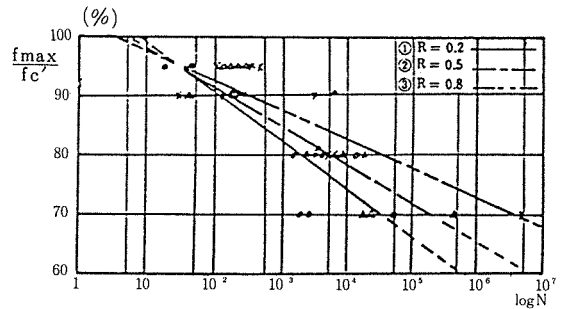


그림 3-17. 골재치수 25mm, 1/T=400cpm, f-N도표

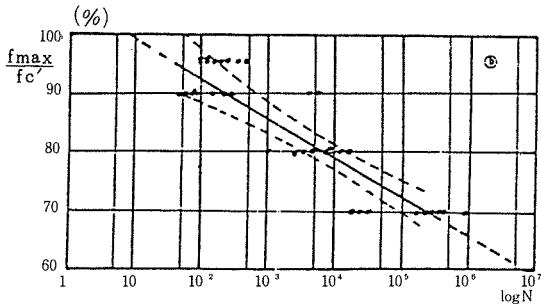


그림 3-14. 골재치수 25mm, R=0.5, f-N도표

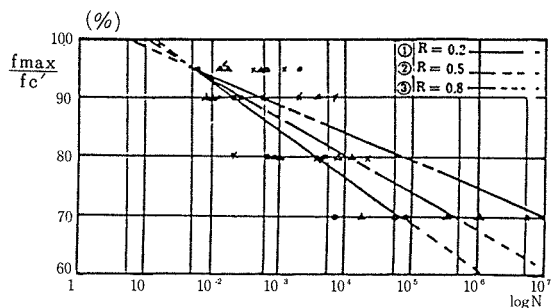


그림 3-18. 골재치수 25mm, 1/T=600cpm, f-N도표

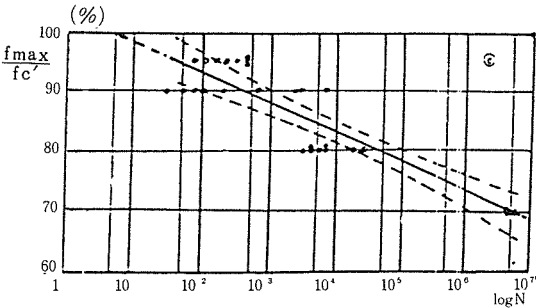


그림 3-15. 골재치수 25mm, R=0.8, f-N도표

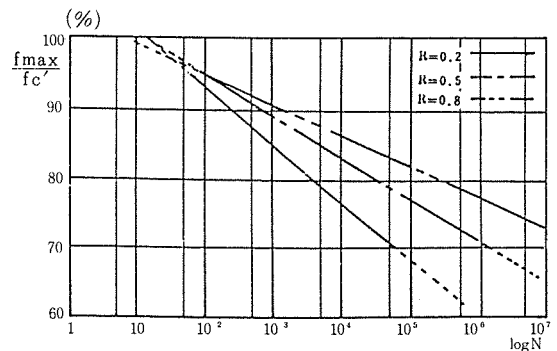


그림 3-19. 골재치수 10mm, f-N-R 도표

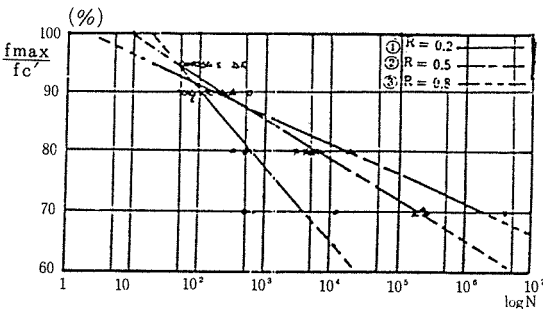


그림 3-16. 골재치수 25mm, 1/T=250cpm, f-N도표

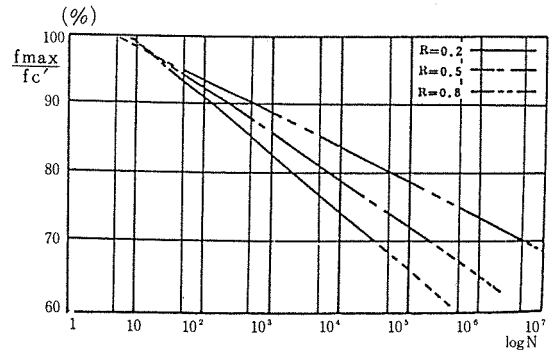


그림 3-20. 골재치수 25mm, f-N-R 도표

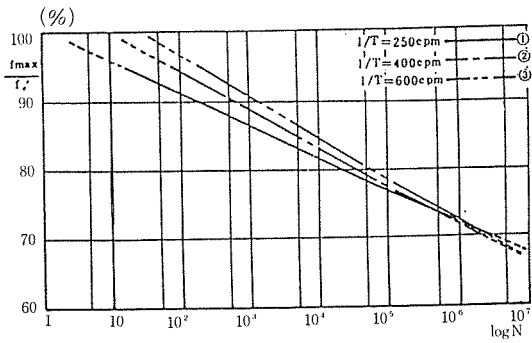


그림 3-22. 골재치수 10mm, $f-N-\frac{1}{T}$ 도표

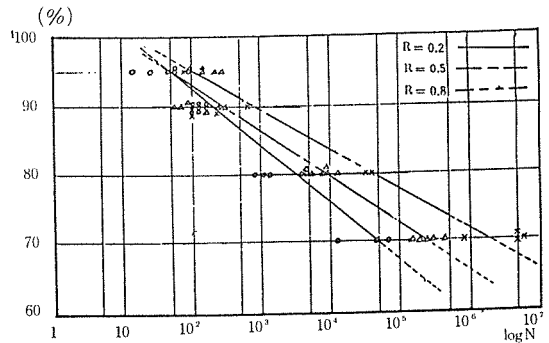


그림 3-24. 골재치수 25mm 신뢰구간내 포함된 자료만의 $f-N-R$ 도표

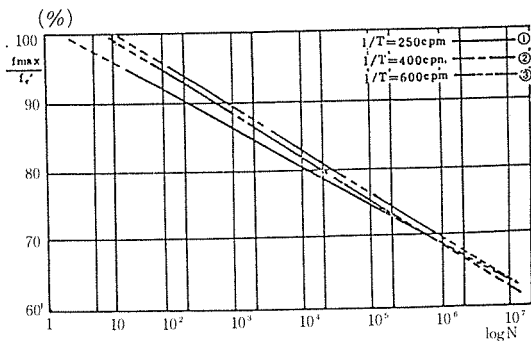


그림 3-22. 골재치수 25mm, $f-N-\frac{1}{T}$ 도표

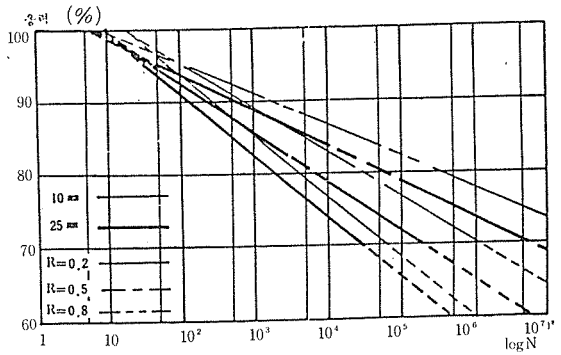


그림 3-25. 골재치수별 $f-N-R$ 도표

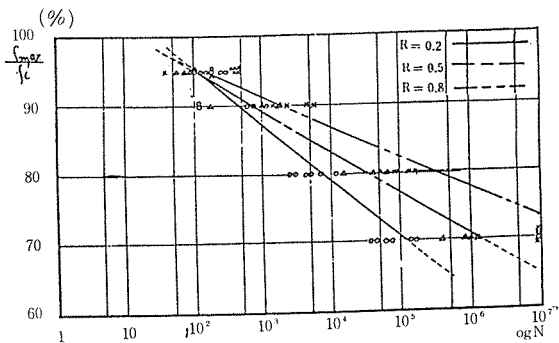


그림 3-23. 골재치수 10mm 신뢰구간내 포함된 자료만의 $f-N-R$ 도표

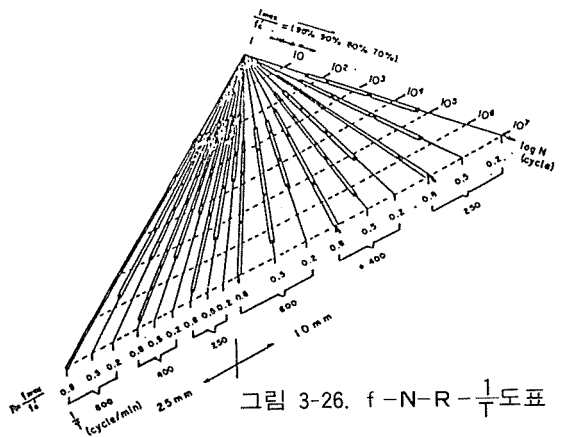


그림 3-26. $f-N-R-\frac{1}{T}$ 도표

크기와 응력비(R), 0.2, 0.5, 0.8에 따라 $f-N-\frac{1}{T}$ 의 관계를 도시하였다. 여기에서 주어진 응력비 하에서는 주파수가 증가할 수록 피로강도가 약간 증가하나 그 영향은 매우 미소하다. 이 자료들을 각각 종합하여 그림 3-4, 그림 3-5,

그림 3-6, 및 그림 3-13, 그림 3-14, 그림 3-15에 각 응력비 별로 $f-N$ 관계를 도시하여 보면, 응력비가 증가할 수록 피로강도로 증가함을 볼 수 있고, 그것을 다시 종합하여 그림 3-19와 그

림 3-20에 나타냈다.

그 다음 실험결과 자료들을 주파수 별로 분리하여 그림 3-7, 그림 3-8, 그림 3-9, 및 그림 3-16, 그림 3-17, 그림 3-18에 골재 크기에 따라 도시하였는데, 여기에서 주어진 주파수에서는 응력비가 증가할 수록 피로강도가 현저히 증가하고 있음을 알 수 있다. 표 3-1로부터 그에 대한 대표식들을 변형시키면 표 4-2와 같다. 여기에서 응력비가 0.2일 때 각 주파수에 따라 산출되어 표 3-2에 나타난 β'' 값이 Tepfers와 Kutti⁽⁷⁾에 의하여 제안된 식 2-1의 β'' 값과 거

의 유사하나 약간 작게 나타났었고, 응력비가 0.5와 0.8일 때는 약간 크게 나타내었다. 이러한 차이는 Tepfers-Kutti식이 일정한 응력비 ($R=0.2$)와 일정한 주파수 ($\frac{1}{T}=300\text{cpm}$)를 갖는 실험으로부터 산출되었기 때문으로 사료된다. 그러므로 본 연구에서는 식 2-1의 수정 및 보완을 하기 위하여 β'' 와 R 및 $\frac{1}{T}$ 의 상관관계를 그림 3-27, 표 4-3 및 표 3-4에 나타내었고, 주파수가 250cpm내지 600cpm, 응력비가 0.2 내지 0.8 사이에서 R값 및 β'' 값을 결정해 줌으로써 주어진 응력율에 대한 피로수명을 계산할 수

표 3-1 대표식과 상관계수

종 류	직선번호	대 표 식	상관계수
그림 3-1	①	$f_{\max}/f_{c'} = -0.128 \log N + 1.1570$	81.4
	②	$f_{\max}/f_{c'} = -0.067 \log N + 1.0630$	81.2
	③	$f_{\max}/f_{c'} = -0.050 \log N + 1.0150$	96.0
그림 3-2	①	$f_{\max}/f_{c'} = -0.083 \log N + 1.0677$	89.4
	②	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0665 \log N + 1.0424$	85.2
	③	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0494 \log N + 1.0220$	80.5
그림 3-3	①	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0788 \log N + 1.0838$	90.7
	②	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0637 \log N + 1.0564$	79.9
	③	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0476 \log N + 1.0314$	87.6
그림 3-4	a	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0746 \log N + 1.0814$	74.0
그림 3-5	b	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0588 \log N + 1.0638$	80.0
그림 3-6	c	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0452 \log N + 1.0399$	86.0
그림 3-7	①	$f_{\max}/f_{c'} = -0.077 \log N + 1.0690$	85.2
	②	$f_{\max}/f_{c'} = -0.067 \log N + 1.0760$	67.8
	③	$f_{\max}/f_{c'} = -0.033 \log N + 1.9950$	92.0
그림 3-8	①	$f_{\max}/f_{c'} = -0.073 \log N + 0.0780$	69.9
	②	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0542 \log N + 1.0420$	88.8
	③	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0513 \log N + 1.0594$	84.3
그림 3-9	①	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0984 \log N + 1.1845$	68.0
	②	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0635 \log N + 1.1046$	88.5
	③	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0568 \log N + 1.0930$	84.8
그림 3-21	②	$f_{\max}/f_{c'} = -0.047 \log N + 1.0075$	68.3
	③	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0559 \log N + 1.0474$	83.5
	③	$f_{\max}/f_{c'} = -0.0603 \log N + 1.0814$	78.5

있도록 하였다.

다음으로 주파수에 따라 도시된 $f-N-R$ 관계 자료를 종합하여 그 대표식을 그림 3-21과 그림 3-12에 도시하면, f_{max}/f_c' 값이 70% 내지 75% 이하가 될 때는 피로강도가 주파수의 변화에 따라 큰 차이를 나타내지 않는다. 이것은 f_{max} 이 정적압축강도의 75%보다 작을 때, 50 cpm내지 900cpm의 하중재하는 피로강도에 거의 영향을 끼치지 않는다.⁸⁾ 라는 기존 실험적 자료를 대입증하고 있다.

골재 10mm와 25mm에 대한 95%의 신뢰도를 갖는 신뢰구간에 표 3-5에 제시되어 있다.

(2) 골재크기가 피로강도에 미치는 영향

골재별로 종합한 $f-N-R$ 관계를 그림 3-25에 도시하였다. 그림에서 보면 동일한 응력비일 때 25mm 골재시편의 경우보다 10mm 골재시편의 경우에 피로수명이 약간 증가됨을 보여 주고 있다. 이는 콘크리트 단위 체적당 골재 표면적이 더 큰 10mm 골재의 경우시멘트 페이스트와 골재와의 접촉 면적이 증대되어 피로강도가 증가된 것으로 사료된다.

(3) $f-N-R-\frac{1}{T}$ 관계도표

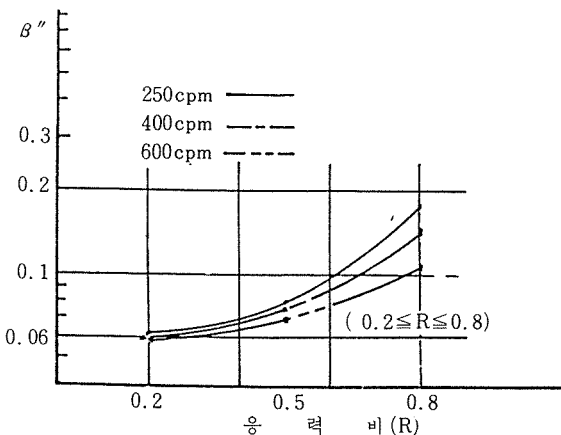
골재 10mm와 25mm에 대한 $f-N-R-\frac{1}{T}$ 관계도표를 그림 3-26에 도시하였다. 이는 응력비

종 류	직선번호	대 표 식	상관계수
그림 3-10	①	$f_{max}/f_c' = -0.128 \log N + 1.1570$	81.4
	②	$f_{max}/f_c' = -0.083 \log N + 1.0677$	85.4
	③	$f_{max}/f_c' = -0.0888 \log N + 1.0838$	79.7
그림 3-11	①	$f_{max}/f_c' = -0.067 \log N + 1.0630$	96.2
	②	$f_{max}/f_c' = -0.065 \log N + 1.0424$	80.2
	③	$f_{max}/f_c' = -0.0637 \log N + 1.0564$	87.9
그림 3-12	①	$f_{max}/f_c' = -0.050 \log N + 1.0150$	89.0
	②	$f_{max}/f_c' = -0.0494 \log N + 1.0220$	90.6
	③	$f_{max}/f_c' = -0.047 \log N + 1.0314$	74.6
그림 3-13	a	$f_{max}/f_c' = -0.082 \log N + 1.0660$	77.0
그림 3-14	b	$f_{max}/f_c' = -0.065 \log N + 1.0510$	85.0
그림 3-15	c	$f_{max}/f_c' = -0.048 \log N + 1.0200$	84.0
그림 3-16	①	$f_{max}/f_c' = -0.128 \log N + 1.1570$	81.4
	②	$f_{max}/f_c' = -0.067 \log N + 1.0630$	96.2
	③	$f_{max}/f_c' = -0.050 \log N + 1.0150$	89.0
그림 3-17	①	$f_{max}/f_c' = -0.083 \log N + 1.0677$	85.4
	②	$f_{max}/f_c' = -0.0665 \log N + 1.0424$	80.2
	③	$f_{max}/f_c' = -0.0494 \log N + 1.0220$	90.6
그림 3-18	①	$f_{max}/f_c' = -0.0788 \log N + 1.0838$	79.7
	②	$f_{max}/f_c' = -0.0637 \log N + 1.0564$	87.9
	③	$f_{max}/f_c' = -0.0476 \log N + 1.0314$	74.6
그림 3-22	①	$f_{max}/f_c' = -0.056 \log N + 1.0141$	79.2
	②	$f_{max}/f_c' = -0.0621 \log N + 1.0368$	80.8
	③	$f_{max}/f_c' = -0.0596 \log N + 1.0450$	77.6

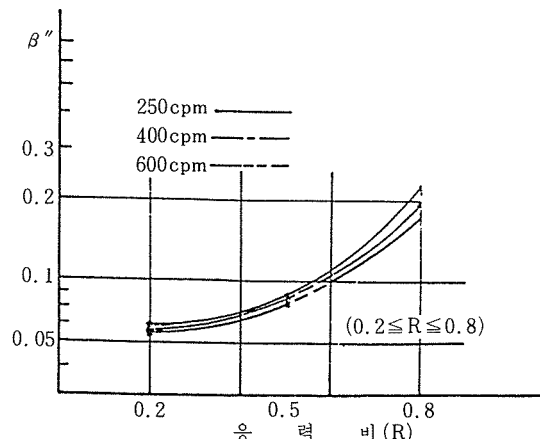
가 0.2내지 0.8인 범위와, 주파수가 250cpm 내 의 70%내지 95%로 가해지는 반복하중에 대한 지 600cpm사이에서 최대하중이 정적압축 강도 피로수명을 설정할 수 있도록 하였다.

표 3-2 변형된대표식

종 류	직선번호	변형된 대표식
그림 3-7'	①'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0613(1-R)\log N$
	②'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0793(1-R)\log N$
	③'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.1742(1-R)\log N$
그림 3-8'	①'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0600(1-R)\log N$
	②'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0763(1-R)\log N$
	③'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.1412(1-R)\log N$
그림 3-9'	①'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0578(1-R)\log N$
	②'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0707(1-R)\log N$
	③'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.1064(1-R)\log N$
그림 3-16'	①'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0698(1-R)\log N$
	②'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0856(1-R)\log N$
	③'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.2208(1-R)\log N$
그림 3-17'	①'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0694(1-R)\log N$
	②'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0828(1-R)\log N$
	③'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.2023(1-R)\log N$
그림 3-18'	①'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0649(1-R)\log N$
	②'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.0832(1-R)\log N$
	③'	$f_{max}/f_c' = 1 - 0.1773(1-R)\log N$



a) 골재치수 10mm의 $\beta'' - R - \frac{1}{T}$ 관계도표



b) 골재치수 25mm의 $\beta'' - R - \frac{1}{T}$ 관계도표

그림 3-27. 골재크기에 따른 $\beta'' - R - \frac{1}{T}$ 관계도표

표 3-3 $\beta''-R-1/T$ 의 상관관계 곡선식(골재10mm)

1/T (cpm)	곡 선 식
250	$\log \beta'' = -1.159 - 0.525R + 1.283R^2$
400	$\log \beta'' = -1.202 - 0.28R + 0.9R^2$
600	$\log \beta'' = -1.245 - 0.064R + 0.506R^2$

표 3-4 $\beta''-R-1/T$ 의 상 상관관계 곡선식(골재25mm)

1/T (cpm)	곡 선 식
250	$\log \beta'' = -1.030 - 0.997R + 1.844R^2$
400	$\log \beta'' = -1.038 - 0.958R + 1.728R^2$
600	$\log \beta'' = -1.121 - 0.603R + 1.328R^2$

표 3-5 신뢰구간 결정식($\beta = 5\%$)

종류 식	신뢰구간 결정식
그림 3-4	$Y_0 \pm 2.04 \left(1 + \frac{1}{30} + \frac{(X_0 - 3.282)^2}{32.542} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{0.0947}{32.542}$
그림 3-5	$Y_0 \pm 2.04 \left(1 + \frac{1}{36} + \frac{(X_0 - 3.844)^2}{70.682} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{0.0740}{70.682}$
그림 3-6	$Y_0 \pm 2.04 \left(1 + \frac{1}{30} + \frac{(X_0 - 3.804)^2}{79.313} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{0.0822}{79.313}$
그림 3-13	$Y_0 \pm 2.04 \left(1 + \frac{1}{36} + \frac{(X_0 - 2.798)^2}{41.457} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{0.0974}{41.457}$
그림 3-14	$Y_0 \pm 2.04 \left(1 + \frac{1}{37} + \frac{(X_0 - 3.294)^2}{61.82} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{0.0966}{61.62}$
그림 3-15	$Y_0 \pm 2.04 \left(1 + \frac{1}{30} + \frac{(X_0 - 3.033)^2}{60.683} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{0.0822}{60.683}$

3-3. 수정 Goodman 도표 도출

실제 구조물에 재하되는 하중의 주기가 일정 한 경우도 있을 수 있으나, 대부분의 경우에 변칙적으로 변화되므로 실험 결과중에 주파수의 영향을 통합하였으며 좀더 정확한 자료간을 이 용하기 위하여 95% 신뢰구간 내에 포함된 자료

만을 선택하여 재정리한후에 그림 3-33과 그림 3-24에 도지하였다. 도출된 상관식의 상관계수 표를 표 3-6에 나타내었고, 각 골재 치수별로 피로수명이 10^6 일 때의 f_{max} 과 f_{min} 을 그림으 로부터 구하여 도지한 것이 그림 3-28의 수정 Goodman 도표이며, 그 결과가 타 연구^(9,10) 결

표 3-6. 신뢰구간내 포함된 자료의 직선식과 상관계수

골재치수	R	직 선 식	상관계수(γ)
10mm	0.2	$f_{max}/f_c'' = 1.121 - 0.083 \log N$	94.8%
	0.5	$f_{max}/f_c'' = 1.064 - 0.0592 \log N$	98.4%
	0.8	$f_{max}/f_c'' = 1.064 - 0.0527 \log N$	97.0%
25mm	0.2	$f_{max}/f_c'' = 1.083 - 0.0821 \log N$	97.2%
	0.5	$f_{max}/f_c'' = 1.052 - 0.0638 \log N$	96.8%
	0.8	$f_{max}/f_c'' = 1.037 - 0.051 \log N$	98.1%

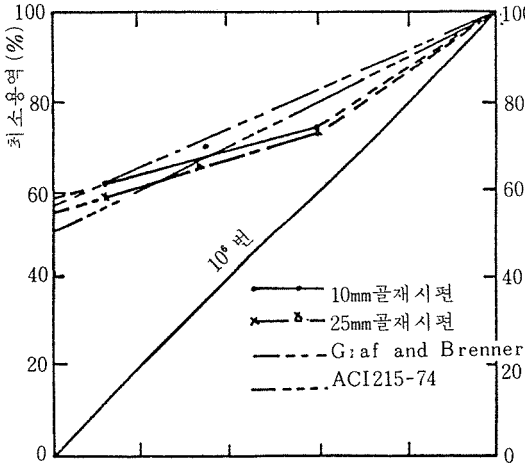


그림 3-28. 수정 Goodman도표 비교분석

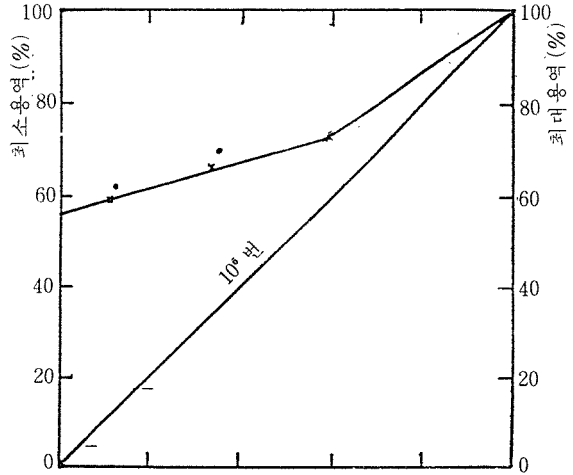


그림 3-29 수정 Goodman도표 (제안)

과와 매우 근사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

제반 자료를 종합 분석하고 실험결과 자료에서 안전측을 취하여 단일 도표로 도출하여 그림 3-29에 도시하였다.

이는 피로강도설계와 해석시 이용하여도 타당할 것으로 사료된다.

4. 결 론

일정건축의 반복하중을 받는 무근콘크리트에서 피로하중의 주기를 고려한 피로거동과 피로강도 해석을 위한 수정 Goodman도표 도출에 관한 실험적 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 콘크리트에 작용하는 피로하중의 주기(T)가 짧아질수록 피로수명이 길어지며, 콘크리트에 작용하는 반복응력의 최대치(f_{max})가 정적 압축응력의 75%보다 작고 반복하중의 주파수가 250cpm 내지 600cpm의 범위 내에 있을 때는 주파수가 피로강도에 거의 영향을 주지 않는다는 사실을 증명하였고, 이 결과는 타 연구의 결과와도 일치하고 있다. 한편 최대응력이 정적

압축강도의 75%를 초과할 때는 주파수가 피로강도에 상당한 영향을 주고 있음이 증명되었다.

2. 반복하중의 주파수를 고려하여 피로강도, 피로수명, 응력비에 관한 상관 관계식을 Trepfers-Kutti식의 형태로 산정한 후에 수정 및 보완하여 국내 콘크리트의 해석에 활용할 수 있도록 하였다.

3. 골재의 최대치수가 10mm인 경우의 피로수명이 25mm의 경우보다 약간 증가됨이 증명되었는데, 이는 10mm의 경우에 단위체적당 골재와 시멘트 페이스트 사이의 접촉면적이 증대되어 피로강도가 증가된 것으로 사료된다.

4. 실험자료로부터 하중-피로수명-응력비-주파수 관계도표를 작성하여, 응력비가 0.2내지 0.8 사이와, 주파수가 250cpm 내지 600cpm 사이에서 최대하중이 정적압축강도의 70%내지 95%로 가해지는 반복하중에 대한 피로수명을 설정할 수 있도록 하였다.

5. 피로강도 해석에 적합한 수정 Goodman도표를 도출, 제시하였으므로 국내 콘크리트의 피로강도 해석과 설계에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다. *

〈참고 문헌〉

1. Jan Ove Holman., "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading, "The Norwegian Institute of Technology, The University of Trondheim, Nov. 1979, pp. 1 - 250.
2. Thomas, T. C. Hsu., "Fatigue of Concrete, "ACI Journal, July-August, 1981, pp. 292 - 305.
3. Kreyszig, Erwin, Advanced Engineering Mathematics, 4th edition, pp. 934 - 939.
4. Jerrold, H. Zar, Biostatistical Analysis, Prentice-Hall Inc, 1974, pp. 190 - 227.
5. Benjamin, Jack R. and C. Allin Cornell, Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill Book Company, 1970' pp. 271 - 285.
6. Wirsching, Paul H. and T. P. Yao James, "Statistical Methods in Structural Fatigue, "Journal of the Structural Division, Proceeding of the ASCE, June, 1970. pp. 1201 - 1219.
7. Tepfers, R. and T. Kutti, "Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete", ACI Journal, May, 1979, pp. 635 - 652.
8. Award, M. E. and H. K. Hilsdorf, "Strength and Deformation Characteristic of plain Concrete Subjected to High Repeated and Sustained Loads", Abeles Symposium of Fatigue of Concrete, SP-41, ACI, 1974, pp. 1 - 13.
9. Nordby, C. E., "Fatigue - A Review of Research", ACI, August, 1958.
10. ACI Committee 215, "Considerations for Design Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading," ACI Manual, Vol. 1, 215 R-3, 1982.
11. 장동일, 구봉근, 건설재료시험, 1972, pp. 19 - 23. pp. 47 - 51, pp. 109 - 115.
12. 건설부, 콘크리트 시방서, 1982, p.294.

근로자는 주인의식
기업가는 공인의식