

荷重作用에 의한 鋪裝壽命에 관한 研究

A Study on Estimation of the Pavement Fatigue Life by Loading

南 永 國*
Nam, Young Kug

Abstract

For many of the rigid pavements, the observations of significantly different performances were explained to relate distress mechanisms to distress manifestation and to develop better prediction of performance.

This paper summarizes the result of an investigation of the resilient elastic and fatigue behavior of inservice cement concrete pavements.

Static indirect tensile tests were conducted in order to estimate the average tensile strength of each of the projects tested. Repeat-load indirect tensile tests were conducted to determine the fatigue and resilient elastic characteristics and the relationship between fatigue life and stress/strength ratio.

Deformation measurements were taken during fatigue testing in order to determine the resilient elastic properties of the material and the changes in these properties during the test period.

要 旨

剛性鋪裝에 대하여 더 좋은 供用性能 기대를 위한 개발과 파손발생에 대한 파손과정에 관하여 포장 상태를 조사하게 된다.

본 論文은 供用中인 시멘트콘크리트 鋪裝의 疲勞舉動과 彈性特性에 대한 연구결과이다. 供用中인 各 鋪裝의 平均引張強度를 측정하기 위하여 Indirect tensile 시험을 실시한 것이다.

變形測定은 이러한 특성의 변화 및 콘크리트의 彈性特性을 구하기 위한 疲勞시험을 통하여 이루어진 것이다.

1. 序 論

콘크리트의 疲勞舉動에 관한 연구는 1900년대와서 特發性연구과제로 散發的으로 발표되었다. 특히

鋪裝의 疲勞舉動에는 路床의 支持力과 材料의 強度가 직접적인 영향을 미치며 이것이 곧 鋪裝壽命에 기인되므로 供用交通의 원활성을 기여하는데 중요한 과제이다.

*正會員·仁川大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

Mills와 Dowson⁽¹⁾은 콘크리트의 인장시험과 荷重作用頻度에 의한 疲勞試驗을 하였고, Nordby는 콘크리트의 휨강도 疲勞에 관련된 引張破壞를, Van Ornum은 7000회나 荷重을 반복하면서 極限強度의 약 55%가 疲勞破壞強度임을 밝혔다^(2,3). 또한 Moor와 Kormmers⁽⁴⁾는 供試體시험에서 極限強度의 비와 破壞回數의 關係를 밝혔으며, Antrim과 Mclaughlin⁽⁵⁾은 1959년에 공기연행 콘크리트의 疲勞舉動을 발표하였다. 1961년 Gray와 Mclaughlin⁽⁶⁾은 연구를 확장하여 輕量콘크리트 對한 荷重反復載荷 시험을 실시하여 輕量骨材의 疲勞特性이나 콘크리트의 휨(flexual) 疲勞시험시 시험속도의 영향과 시멘트콘크리트鋪裝의 應力級別 疲勞周期에 對한 破壞確率 등을 발표하였다⁽⁷⁻¹⁰⁾.

Indirect tensile test는 1953년에 日本의 Akazawa와 Brazil의 Carneiro와 Barcellos에 의하여 처음으로 고안되어 이 방법에 의한 鋪裝材料의 特性을 규명하였다.

특히 시멘트콘크리트鋪裝은 이러한 特性에 따라 distress mechanism이 다양하게 변하므로 鋪裝破壞에 있어서도 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구는 供用中인 시멘트콘크리트鋪裝에서 채취한 시료로 indirect tensile test를 실시하여 탄성계수의 특성

과 반복하중에 의한 應力/強度比와의 상관성을 규명하였다.

2. 시험계획

2.1 시료준비

시험을 위한 준비시료는 Texas州의 Ft. Worth, Atalant 및 Bryan도시의 일부도로와 Houston도시내 IH45번 시멘트콘크리트 鋪裝도로에서 시료를 채취하였다.

채취한 모든시료는 직경 102 mm(4in)와 높이 51 mm(2 in)를 표준으로하여 가공하였으며, 표준시료의 표면조각성에 대해서는 高強度 capping compound로 처리하였다. capping의 목적은 시료의 수직변형을 최소로 하기 위하여 가능한 얇게 시행하였으며 capping에 사용한 용구도 직경이 시료와 같은 것을 사용하여 시료의 크기와의 차이에 의한 시험영향 요인을 줄였다.

2.2 Indirect tensile 시험

이 시험은 표준시료규격으로 가공된 원형시료를 원주방향으로 수직되게 세워 그림 1과 같이 수직상대원주방향 양측에 압축을 가한다. 이때의 시험 조건은 하중을 가하는 접촉면이 균일하여 등분포 상태에서 힘을 받아야 하며, 이 하중면을 따라 쪼

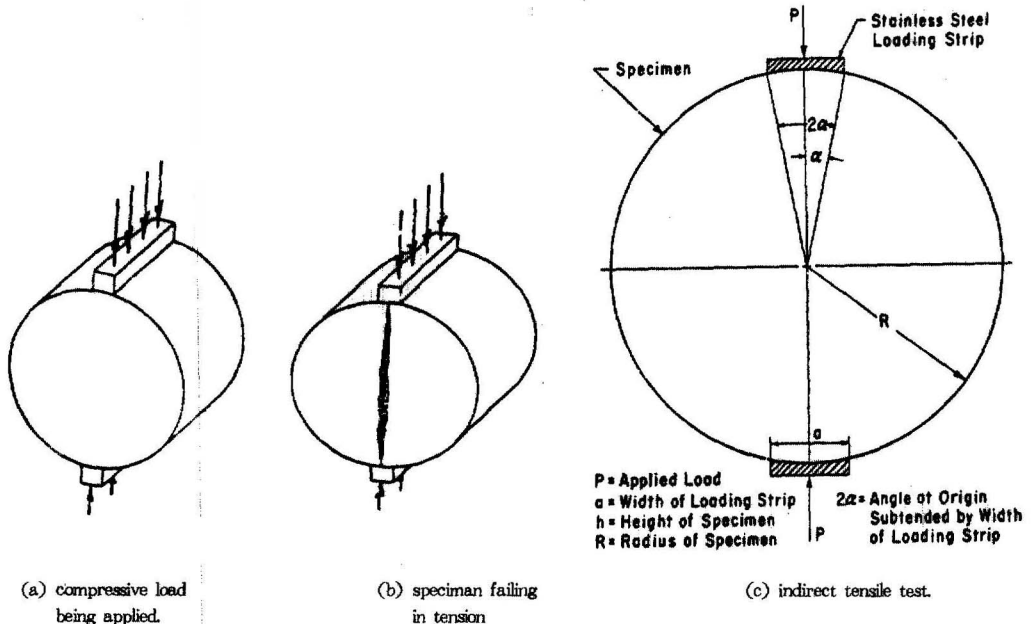


그림 1. Indirect tensile test loading and failure.

개지는 상태는 수직방향으로 나타난다. 그림 1-C에서 보는바와 같이 하중재하판에 압축하중에 대한 indirect tensile stress의 일반식은 아래와 같다.

$$\sigma_T = \frac{2\rho}{\pi ah} \left(\sin 2\alpha - \frac{a}{D} \right) \quad (1)$$

여기서

σ_T : indirect tensile stress(PSI)

P : 수직하중(Ib)

a : 수직하중 접촉면의 폭(in)

h : 시료의 높이(in)

D : 시료의 직경(in)

2α : 하중접촉면의 중심각(°)

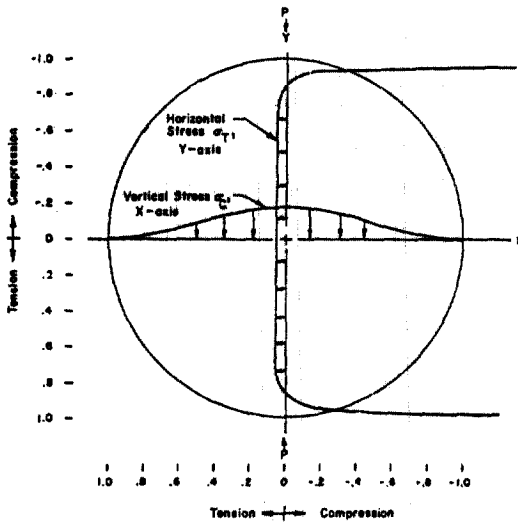


그림 2. Relative stress distributions and center element showing biaxial state of stress for the indirect tensile test.

하중응력분포는 그림 2에서와 같이 垂直軸을 따라 상하면에 부착된 재하판에 가한 하중이 집중적으로 작용하며, 이때의 應力分布는 XY2軸에 대하여 壓縮應力과 引張應力으로 分布된다. 引張應力은 Y軸에 均一하게 分布되며, 壓縮應力은 X軸에 中央部를 중심으로하여 좌우로 分포된다.

시편의 파괴는 鉛直軸을 중심으로 항상 일정하게 일어나며, 이 indirect tensile 시험을 통하여 하중작용으로 인한 수직 및 수평변형으로 탄성계수와 포아손비를 구할 수 있다^(11, 12).

Indirect tensile 강도를 측정하기 위하여 처음에는 콘크리트의 모러터시료를 사용하였으나 1965년 이후부터 Thompson, Messina, Stephens, Shklarsky, Kennedy 그리고 Hudson 등에 의하여 鋪裝體의 各種安定處理材料와 아스팔트콘크리트와 같은 非等方性材料에 대해서 많은 시험결과를 발표하였다.⁽¹⁵⁻²⁰⁾

2.3 시험기구

본 연구에서는 앞에서 기술한 원리를 적용한 電子油壓載荷시스템인 MTS 시험기계를 사용하였다. 靜荷重 시험방법은 시편위 중심부에 밀착된 시험기 上部壓盤에 장치된 DC-LVDT(linear variable differential transducer)로 垂直變形을 측정하고, 荷重 크기는 load-cell로 측정하는 것이다.

反復載荷 시험은 하중변화에 따른 수직변형과의 관계를 나타내는 것이 아니고 필요로 하는 응력수준까지 하중을 재현하면서 일정회수까지 25, 50, 100 회 주기별로 계속재하하여 수평변위(H_R)를 측정한다. 이때 시험이 계속유지되는 동안 하중작용에 대한 주기현상이 모니터에 나타난다. 수평변위는 시편양측에 밀착시킨 LVDT에 의하여 측정하며 이것이 자동으로 X-Y좌표계에 기록된다.

정하중시험에서 반복재하시험에서 시험중 시편의 微動이나 재하시 하중충격에 의한 오차를 없애기 위하여 引張應力 약 $1.1N/cm^2$ (1.5 PSI)에 상당하는 89N(20 Ib)의 先行荷重을 사용한다. 그림 3은 전 인장응력 217에서 $356 N/cm^2$ (315~516 PSI)까지 재현이 가능한 하중범위로 0.4초재하 0.6초정지 1초주기(1 Hz)로 한 반복곡선과 수평변형이 나타나는 주기곡선을 나타낸 것이다.

모든 시험은 $24^\circ C$ (75°F)에서 파괴시 까지 계속하며, 파괴기준은 시편이 완전히 파괴되거나 아니면

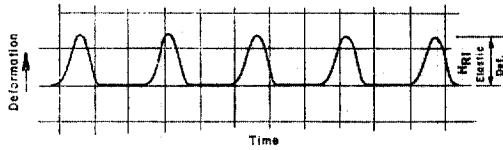
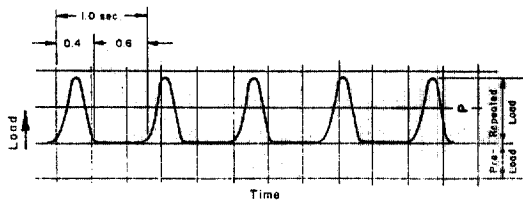


그림 3. Load pulse and corresponding horizontal deformations.

최소 500,000회이상 반복재하하여 미량의 변위가 증가될 때까지 재하한다.

2.4. 파라미터조사

본 연구에서 분석한 파라미터는 indirect tensile 강도(S_T), 동탄성계수(E_{IR}) 및 피로수명(N_f)이다. 피

로수명(N_f)은 시편이 완전히 파괴될 때까지 적용한 재하회수를 말한다. S_T 와 E_{IR} 값은 컴퓨터프로그램 MODAL9을 사용하였으나 E_{IR} 값은 포아손비를 0.20로 가정하여 계산된 값이다. 또 수식에 의한 S_T 와 E_{IR} 값은 다음 식으로 계산할 수가 있다.

$$S_T = \frac{0.156 P_{Fail}}{h} \quad (2)$$

$$E_{IR} = \frac{P}{H_{RI} h} (0.269 + 0.997 \nu) \quad (3)$$

여기서

P_{Fail} : 파괴시 전하중(Ib)

P : 반복하중(Ib)

h : 시편의 높이

H_{RI} : 수평회복변위(in)

ν : 포아손비

만약 시편의 직경이 다르면 상수가 변한다⁽¹²⁾.

3. 시험결과에 대한 분석

3.1 變動値의 특성

도로에 사용되는 아스팔트콘크리트나 시멘트콘

표 1. Summary of average test results for each specimen.

District Project Identification	Aggregate Type	Number of Specimens	Distance Covered, km mi		Tensile Strength			Modulus of Elasticity ²			Density		
					Mean, N/cm ²	Mean, psi	Coef., Var., %	Mean, N/cm ² (×10 ⁶)	Mean, psi	Coef., Var., %	Mean, kg/m ³	Mean, pcf	Coef., Var., %
2A	Limestone	104	27.4	17.0	316	459	19	2.85	4.14	40	2252	140.6	1.1
2E	Limestone	134	44.0	27.3	338	490	20	2.55	3.70	35	2244	140.1	1.6
12Sp	Gravel	46	--	--	321	466	29	2.52	3.66	36	2219	138.5	4.7
13Sp	Gravel	28	--	--	403	584	19	3.02	4.38	22	2254	140.7	1.7
17B	Gravel	141	37.5	23.3	343	498	19	3.46	5.02	26	2281	142.4	2.0
17M	Gravel	122	35.4	22.0	295	428	20	2.50	3.62	37	2263	141.3	1.4
18N	Limestone	25	7.4	4.6	292	424	19	2.58	3.74	24	2275	142.0	1.8
18O	Limestone	72	6.8	4.2	390	566	19	2.92	4.24	26	2342	146.2	1.2
19A	Gravel	72	25.9	16.1	294	427	21	2.32	3.36	42	2257	140.9	1.5
19B	Iron Ore Slag Gravel	63	20.8	12.9	270	391	20	2.34	3.40	42	2132	133.1	1.9
Weighted Average					325	471	20	2.75	3.99	34	--	--	1.7
Coef. Var. of Means, (%)					--	--	13	--	--	13	--	--	--

¹Top, center, and bottom slices from each core.

²Assumed Poisson's ratio=0.20.

크리트 기타 각종 안정처리재료는 도로구조상 각종의 분담역할로서 매우 중요한 재료이며 역학상 중요한 몇가지 성질을 가지고 있다. 정하중이나 피로하중이 도로에 작용할 때 강도, 탄성계수 및 포아손비 등이 바로 역학상 중요한 성질들이며 그 외로 포장두께라던가 밀도도 중요한 역할을 한다. 이러한 각 성질의 값에 대해서는 분명한 변동량이 있음이 알려져 있다.

변동량의 원인은 재료의 고유변동, 시험시의 변

동 및 시료채취시 변동이며, 전변동량을 σ_0 , 각각에 대한 변동량을 σ_m , σ_i 및 σ_s 라고하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\sigma_0^2 = \sigma_m^2 + \sigma_i^2 + \sigma_s^2 \quad (4)$$

이러한 각각의 변동량에 있어서 재료의 변동은 원자재, 생산 및 시공의 차이를 고려할 수 있고, 시험 및 시료채취시 변동은 측정과정에서 기인하게 된다.

Abdun Nur⁽²⁾에 의하면 많은 프로젝트에서 變動

표 2. Indirect tensile, elastic modulus and density.

Sampling Location		Modulus ×10 ⁶ (PSI)	Indirect Tensile Strength(PSI)			Density(GCC)		
			Top	Middle	Bottom	Top	Middle	Bottom
C O R N E R	1	4560	545	501	521	2.362	2.319	2.297
	2	4139	559	551	592	-	-	-
	3	4124	471	422	631	-	-	-
	4	3405	384	358	517	2.269	2.660	2.327
	5	-	649	432	-	2.314	2.324	-
	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
	8	4411	357	690	587	2.321	2.331	2.339
	9	4460	536	554	-	2.288	2.299	2.292
	10	4504	545	651	699	2.288	2.316	2.314
Average		4.229	506	520	591	2.307	2.375	2.314
C E N T E R	1	4504	403	429	678	2.301	2.253	2.288
	2	3123	-	-	-	-	-	-
	3	3221	360	443	483	2.394	2.248	2.354
	4	3491	264	443	582	2.303	2.254	2.290
	5	3813	351	454	574	2.279	2.280	2.349
	6	4320	568	561	659	2.282	2.250	2.324
	7	4089	389	428	626	2.291	2.277	2.308
	8	3490	499	511	566	2.306	2.265	2.350
	9	-	395	425	639	2.274	2.268	2.370
	10	4.233	677	611	529	2.360	2.296	2.310
Average		3.809	434	478	593	2.310	2.266	2.327
E D G E	1	4433	519	533	696	2.306	2.281	2.373
	2	4276	507	515	403	2.270	2.325	2.256
	3	4417	570	726	532	2.337	2.332	2.307
	4	4001	401	392	594	2.271	2.277	2.333
	5	4508	494	471	814	2.318	2.318	2.355
	6	4547	494	588	684	2.295	2.300	2.342
	7	4615	454	625	783	2.312	2.360	2.354
	8	4843	685	636	612	2.309	2.317	2.357
	9	3887	237	651	583	2.342	2.328	2.342
	10	5036	644	744	739	-	-	-
Average		4.456	501	588	644	2.307	2.315	2.335
Total Average		4.165	480	529	609	2.308	2.319	2.325
Standrd Dev.		0.484	115	105	92	-	-	-
Coef. Var. (%)		11.6	24	20	13	-	-	-

係數를 조사한 결과 18에서 25%의 범위였으며, 콘 크리트의 평균품질에 대해서는 20%정도 이내이던바람직하다고 하고 있다.

표 1은 Texas州의 6개지역에서 채취한 시료를 직경 102mm(4in), 높이 51mm(2in)로 분할 가공하여 시편으로하고 이를 각각 indirect tensile 시험한 결과이다. 각 프로젝트별 인장강도에 대한 변동계수는 20%정도이며, 탄성계수에 대해서도 변동계수는 22에서 44% 범위로 나타났으나 이것은 가중치로 평균한 변동계수는 인장강도나 탄성계수 모두가 13%이다.

3.2 Indirect tensile strength

Indirect tensile 強度를 측정하기 위한 시료는 Texas州 Houston에 위치한 IH45노선에서 70여개의 시료를 채취하였다. 공용교통이 포장면을 주행할 때 교통하중이 놓이는 위치에 따라 발생하는 응력이 다르게 된다. 따라서 시료의 채취위치도 이에 준하여 시멘트콘크리트스래브의 우각부(corner), 중앙부(center), 가장자리(edge)별로 채취하였다.

표 2는 이 개개의 시료를 상부(top), 중앙부(middle), 하부(bottom) 별로 시험을 위한 규정시료로 분할하여 시험한 결과이다.

Indirect tensile 強度를 평균강도로 보아 상부가 501 PSI, 중앙부가 588 PSI, 하부가 644 PSI로서 �래브의 하부쪽이 상부보다 품질면에서 좋다는 것이 밝혀졌다. 이는 밀도측정 결과에서도 마찬가지로 경향임을 알 수 있으며, Kennedy⁽²⁷⁾가 발표한 연구결과에서도 같은 경향을 나타내고 있다.

3.3 彈性係數

탄성계수는 indirect tensile strength 시험으로 수직 및 수평변위값은 최소자승법으로 포아손비를 구하고, 하중과 수평변위와의 관계로서 수평正接係數를 구하여 표 3의 식에 의하여 구하였다.

표 3은 위와같은 상관관계로서 공시체의 직경에 따라 引張強度(S_T), 포아손비(ν), 彈性係數(E) 및 파괴시 全引張變位(ϵ_T)를 구할 수 있는 Kennedy⁽²³⁾가 제안한 식들이다.

포아손비는 탄성계수를 구하는데 있어서 필요한 변수이나 이를 구하기 위해서는 수직 및 수평변위의 회귀분석을 위한 단계별 상관조건 등으로 실측이 매우 어렵다. 따라서 표 4의 포장층별 자재료에 대해 추천한 포아손비를 사용하여도 실측한 값과

표 3. Equations for calculation of tensile properties

Tensile Property	Diameter of Specimen	
	4-Inch	6-Inch
Tensile Strength S_T , psi	$0.156 \frac{P_{Fai}}{h}$	$0.105 \frac{P_{Fai}}{h}$
Poisson's ratio ν	$\frac{0.0673DR - 0.3954}{-0.2494DR - 0.0156}$	$\frac{0.04524DR - 0.6804}{-0.1665DR - 0.00694}$
Modulus of elasticity E , psi	$\frac{S_H}{h} [0.997\nu + 0.2692]$	$\frac{S_H}{h} [0.9990\nu + 0.2712]$
Total tensile strain at failure S_T	$X_{TF} \left[\frac{0.1185\nu + 0.03886}{0.2494\nu + 0.0156} \right]$	$X_{TF} \left[\frac{0.0529\nu + 0.0175}{0.1665\nu + 0.0452} \right]$

P_{Fai} = total load at failure (maximum load P_{max} or load at first break point), in pounds;

h = height of specimen, in inches;

X_{TF} = total horizontal deformation at failure (deformation at the maximum load or at first break point), in inches (Fig. 4);

DR = deformation ratio $\frac{Y_T}{X_T}$ (the slope of line of best fit* between vertical deformation Y_T and the corresponding horizontal deformation X_T up to failure load P_{Fai});

S_H = horizontal tangent modulus $\frac{P}{X_T}$ (the slope of the line of best fit* between load P and total horizontal deformation X_T for loads up to failure load P_{Fai}).

*It is recommended that the line of best fit be determined by the method of least squares.

표 4. Recommended values of Poisson's ratio for different pavement materials⁽²⁷⁾.

Material Type	Range of Poisson's ratio
Portland cement concrete	.15-.20
Asphaltic concrete	.25-.35
Cement stabilized base	.20-.30
Asphalt stabilized base	.25-.35
Unbound granular base	.40
Granular subgrade	.40
Clayey or silty subgrades	.45

비교하여 탄성계수 값에는 큰 영향이 없다.

彈性係數는 표 2에서 보는바와 같이 도로의 차선편을 중심으로 하여 각 부위별로 측정하였으며 탄성계수의 평균값이 4.165×10^6 (PSI), 표준편차가

표 5. Summary of results for each specimen.

Location	Modulus of Elasticity (PSI) × 10 ⁶			Indirect Tensile Strength (PSI)		
	Specimen No.	Modulus E	S. D. σ	Specimen No.	S _r	S. D. σ
Corner	7	4.229	0.399	22	533	105
Center	9	3.787	0.478	24	501	108
Edge	10	4.456	0.330	30	537	131

0.484 × 10⁶(PSI)이며 변동계수는 11.6%였다.

표 5는 탄성계수와 indirect tensile 강도에 대하여 각 부위별 평균값을 나타낸 표이며, 그림 4는 각 부위별 시료에 해당되는 탄성계수와 indirect tensile 강도와의 상관성을 나타낸 회귀직선이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 indirect tensile 강도값이 크면 탄성계수도 크다는 것을 알 수 있다.

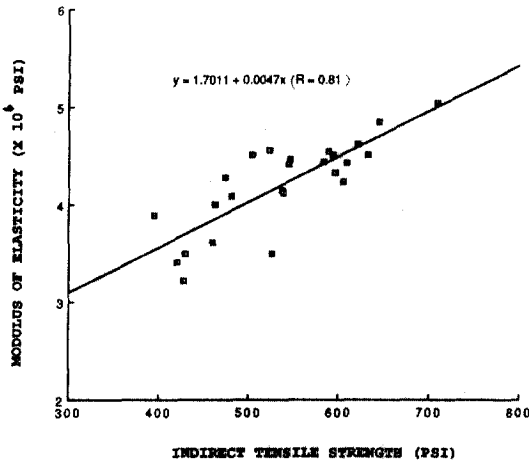


그림 4. Relationship modulus of elasticity and indirect tensile strength.

즉 상관성이 높은 1차회귀식으로서 탄성계수와 indirect tensile 강도와의 비례하므로 indirect tensile 강도만 측정하여도 탄성계수를 추정할 수 있다.

그리고 indirect tensile 강도를 알 수 없을 경우에는 일반적인 강도관리로서 휨강도나 압축강도 및 밀도에 의하여 탄성계수를 산출할 수 있는 식은 (4) (5)식과 같다.^{(2), (5)}

$$E = r_c^{1.5} \times 3.3 \sqrt{f_c'} \quad (4)$$

$$E = 57400 \sqrt{f_c'} \quad (5)$$

$$f_r = 7.5 \sqrt{f_c'} \quad (6)$$

여기서

E : 콘크리트의 탄성계수(PSI)

r_c : 콘크리트의 밀도(PCF)

f_c' : 콘크리트의 압축강도(PSI)

f_r : 콘크리트의 휨강도(PSI)

식 (6)은 콘크리트의 휨강도와 압축강도의 상관식이며, 그림 5는 역시 휨강도와 압축강도와의 관계를 나타낸 그림으로서 어느 하나의 강도를 알면 탄성계수를 산정할 수 있다.

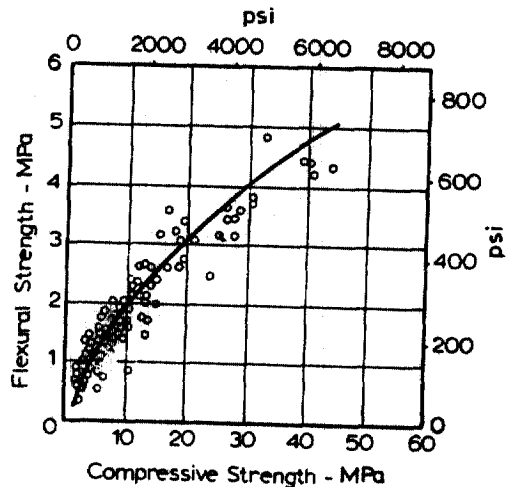


그림 5. Relation between compressive and flexural strengths of incompletely compacted concrete⁽²⁾.

4. 피로수명

4.1 피로수명의 일반성

일반적으로 피로시험의 결과는 응력 혹은 응력/강도비와 파괴시까지 반복하중에 의한 對數回數와의 관계인 S-N線으로 나타내어 왔다. 콘크리트의 강도별 비교가 좋다는 이유로 대부분의 연구는 반

복하중과 응력/강도비로 비교하였다. 이것은 콘크리트의 강도가 일정한 값을 가지는데 비해서 응력 발생은 콘크리트포장에 통과하는 하중에 따라 응력발생이 다르기 때문에 응력/강도비로 비교하며 그 비의 범위는 55%에서 85%이다.

하중 반복회수와 응력/강도비와의 일반 선형식은 식 (7)과 같다.

$$\log N_f = C_1 S + C_2 \quad (7)$$

여기서

N_f : 피로수명

C_1 : 반대수 구배

C_2 : 반대수의 절편

S : 응력/강도 비(%)

C_1 과 C_2 는 상수로서 많은 시험자료로부터 가장 적합한 선형에서의 최소자승법으로 구해진다.

4.2 피로수명의 관련성

표 1의 프로젝트중에서 17B, 17M, 19B 및 2E 4개의 프로젝트에 대한 피로수명의 시험결과는 그림 6과 같다. 4개의 그래프에서 기울기는 거의 비슷하며 다만 강도의 차이로 직선의 위치가 다르다.

이것은 응력/강도비의 변화에 따른 특성으로 보아 피로수명은 다르지만 fatigue mechanism이 비슷함을 보여주고 있다. 다만 직선의 위치가 다른 이유로서는 콘크리트품질이 다른 경우와 또 하나의 시료의 측정오차나 시험오차등으로 나타날 수 있다.

표 6은 4개의 프로젝트를 종합적으로 검토하기 위하여 응력/강도비의 구분에 따라 전시험회수값을 평균한 것이다.

그림 7은 표 6에 대한 S-N의 상관 그래프이다. 이것은 응력/강도비의 주어진 값과 피로수명(N_f)의 상관성이 높은 적합곡선을 찾기 위하여 Crick graph program을 사용하였으며, 적합곡선이 곧 비선형指數曲線으로 보여주고 있다. 그림 6과 비교하여 볼때 응력/강도비가 70%까지는 기울기가 비슷하나 80%에서는 비선형이므로 완만하다. 즉 통상 예

측할 수 있는 응력/강도비가 70%일 때 실제의 피로수명과 관련이 있으므로 이것은 곧 distress mechanism이 같은 성향임을 알 수가 있다.

그림 8은 탄성계수와 피로수명과의 상관성을 나타낸 도표이다. 이것은 반복하중 증가에 따라 탄성계수의 변화상태를 나타내고 있다. 피로수명의 10%에서 75%사이에서는 탄성계수가 약간 감소함을 알 수가 있다. 즉 하중작용 초기에는 탄성계수가 변화없이 유지되나 피로수명이 80% 이상이 되면 탄성계수가 감소함을 알 수가 있다.

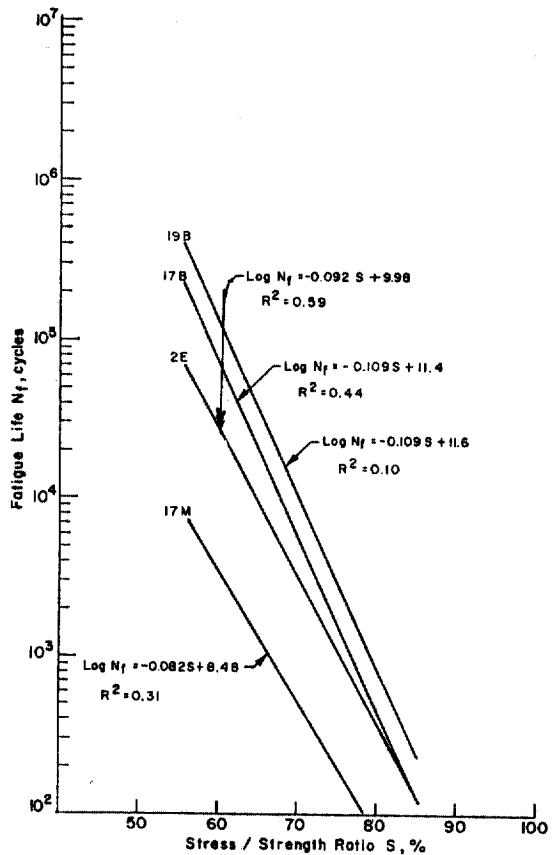


그림 6. S-N relationships for all projects.

표 6. Summary of results of N_f and stress/strength ratio relationship.

stress/strength ratio	82	83	82	82	76	76	70	70	74	72	75	61	70	55
Fatigue life N_f	21×10^3	522×10^3	951×10^3	961×10^3	251×10^3	271×10^3	212×10^3	305×10^3	721×10^3	911×10^3	715×10^3	331×10^3	896×10^3	191×10^3

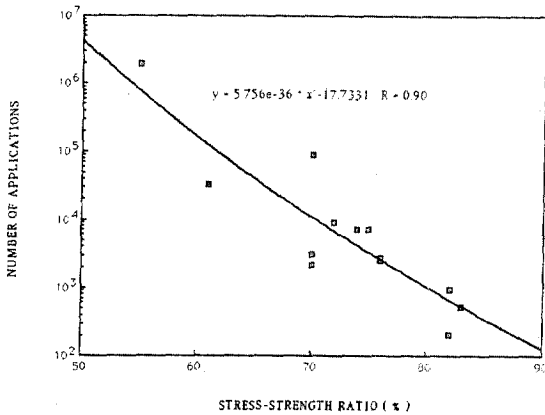


그림 7. S-N relationships for all average values.

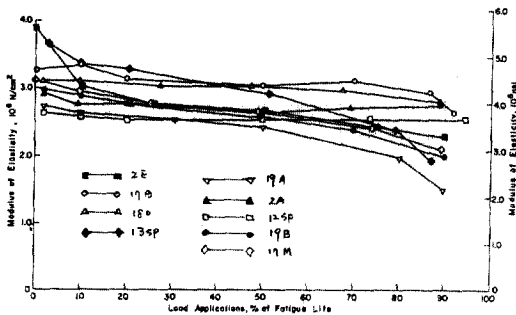


그림 8. Typical relationships between modulus of elasticity and load applications for portland cement concrete⁽²⁰⁾.

5. 결 론

본 연구는 포장을 구성하고 있는 각종의 재료중 시멘트콘크리트스래브의 시료를 채취하여 indirect tensile시험과 반복재하시험을 통하여 재료의 탄성계수와 인장강도 및 응력/강도비에 따른 피로수명의 상관성과 재료의 특성을 규명하였다.

그 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 실측한 탄성계수와 indirect tensile강도의 분산계수가 20% 이내로서 그 측정값의 신빙성이 높다.

(2) 시멘트콘크리트포장에 대해 상, 중, 하부로 나누어 품질을 평가할 때 indirect tensile강도와 밀도의 실측치를 보아 스래브의 하부가 상부보다 우

수하다.

(3) Indirect tensile강도와 탄성계수와의 상관성은 1차회귀식으로서 indirect tensile강도를 알면 탄성계수를 산정할 수가 있다.

(4) S-N 관계에서 반대수선형이던 비선형이던 응력/강도비가 70%까지는 선형의 기울기가 비슷하므로 피로수명에 직접관련되는 distress mechanism은 같은 성향을 나타내고 있다.

앞으로 반복재하회수, 탄성계수 및 응력/강도비가 3자의 상관성에 대하여 數理的인 연구가 계속되면 포장수명예측에 필요한 역학적인 뒷바침이 될 것이다.

감사의 말

본 연구는 문교부 해외파견교수 연구계획에 의해서 이루어 졌으며, 문교부 당국에 깊은 감사를 표하는 바입니다.

아울러 The University of Texas at Austin, 교통연구소 소장 Dr. B.F. McCullough를 비롯하여 적극 지원해 준 연구원 여러분께도 고마움을 전합니다.

참고 문헌

1. R. E. Mills and R. F. Dawson, "Fatigue of concrete", *Proceedings, 7th Annual Meeting*, H. R. B, Dec, 1927 pp.160-172
2. G. M. Norlby, "Fatigue of Concrete-A. Review of Research", *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 30, No. 2, Aug. 1958 pp.191-215
3. J. L. Van Ornum, "Fatigue of Cement Products", *Transaction, ASCE*, Vol. 51. 1903 pp.441-444
4. H. F. Moor and J. B. Kommers, "The Fatigue of Metals", McGraw-Hill, 1927. ch. XI, pp.250-289
5. J. Dec. Antrim and J. F. McLaughlin, "Fatigue study of Air-Entrained Concrete", *Journal of the ACI*, Vol. 30, No. 11, May 1959 pp.1173-1180
6. W. H. Gray, J. F. McLaughlin and T. D. Antrim, "Fatigue Properties of Light-weight Aggregate Concrete", *Journal of the ACI* Vol. 58. No. 2. Aug. 1961
7. H. Fellemer, "Fatigue of Concrete", *Proceedings of the American Society for Testing Materials*, Vol. 22, II (1922)
8. H. A. William, "Fatigue Tests of Light-Weight Aggregate Concrete Beam", *Proceedings, American Concrete Institute*, Vol. 39, 1943 pp.441-447
9. C. E. Kesler, "Effect of Speed of Testing on Flexural

- Fatigue Strength of Plain Concrete”, *Proceedings, H. R. B. Vol. 32, 1953, pp.251-258*
10. John T. McCall, “Probability of Fatigue Failure of Plain Concrete”, *Journal of the ACI, Vol. 30, No. 2, Aug 1958 pp.233-245*
 11. Anagnos, James N, and Thomas W. Kennedy, “*Practical Method of Conducting the Indirect Tensile Test*”, Research Report 98-10, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, Aug. 1972
 12. Gouzalez, Guillermo, Thomas W. Kennedy, and James N. Anagnos, “*Evaluation of the Resilient Elastic characteristics of Asphalt Mixtures Using the Indirect Tensile Test*”, Research Report 183-6, Center for Highway Research, the University of Texas at Austin Nov. 1975
 13. Akazawa, T. “Tension Test Method for Concrete”, *Bulletin No. 16 International Association of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, Paris, No. V. 1953 pp.11-23*
 14. Carneiro, F. L. L. B, and A. Barcelles, “Concrete Tensile Strength”, *Bulletin No. 13, International Association of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, Paris, March. 1953. pp.97-127*
 15. Thompson, M. R, “*The Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soil*” Lime Stabilization Highway Research Record No. 92. H. R. B. 1965 pp.69-79
 16. Messina, R, “*Split Cylinder Test For Evaluation of the Tensile Strength of Asphalt Concrete Mixtures*” Unpublished Thesis, Master of Science in Civil Engineering The UT at Austin. Jan 1966
 17. J. E Stephens and Breen, J. J., “Split Cylinder Test Applied to Bituminous Mixtures at Low Temperatures” *Journal Materials. Vol. 1. No. 1. American Society for Testing and Materials, March. 1966*
 18. E. Suklarsky and M. Livneh “The Splitting Test for Determination of Bituminous Concrete Strength” *Proceedings. AAPT, Vol. 31, 1962. pp.457-476*
 19. T. W. Kennedy and W. R. Hudson, “*An Indirect Tensile Test for Stabilized Materials*” Highway Research Record No. 235, HRB. 1968. pp.36-48
 20. W. R. Hudson and T. W. Kennedy, “*An Indirect Tensile Test to Stabilized Materials*” Research Report 98-1, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin 1968
 21. Abdun-Nur, E. A., “Design Specification S-A Challenge” *Journal of the Construction Division, Proceedings, Vol. 91, American Society of Civil Engineers, May 1965, pp.29-44*
 22. The AASHO Road Test, Report No. 2, “*Materials and Construction*”, *Special Report 61B, Highway Research Board, 1962*
 23. James N. Anagnos and Thomas W. Kennedy, “*Practical Method of conducting The Indirect Tensile Test*”, Center for Transportation Research project Report 98-10, 1972
 24. Pieter J. Strauss, B. Frank McCullough, and W. Ronald Hudson, “*Continuously Reinforced Concrete Pavement : Structural Performance and Design Construction Variables*” The University of Texas at Austin C. T. R. RR-177-7 pp.15
 25. B. C. Nayak, W. Ronald Hudson, and B. Frank McCullough, “*A Sensitivity Analysis of Rigid Pavement Overlay Design Procedure*”, The University of Texas at Austin. CRT, RR-177-11 p.25
 26. A. M. Neville “*Properties of Concrete*” 3rd Edition p.302
 27. Marshall, Bryant P., and Thomas W. Kennedy, “*Tensile and Elastic Characteristics of Pavement Materials*,” Research Report No.183-1 Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, Jan. 1974
 28. A. M. Neville “*Properties of Concrete*” 3rd Edition p.302
 29. Thomas W. Kennedy “*Tensile Characterization of Highway Pavement Materials*” Research Report No. 183-15F C. T. R. The University of Texas at Austin. July 1983. p.30

(接受 : 1989. 9. 4)