

콘크리트 물성 정량화식을 이용한 LTPP 구간의 탄성계수 추정방법

An Estimation Procedure for Concrete Modulus by Using Concrete Strength Relationships in the LTPP Test Sections

양성철* · 조윤호**

Yang, Sung Chul · Cho, Yoon Ho

Abstract

Concrete strength relationship between various strength properties was presented through experimental data from concretes made from different sources of coarse aggregates and fine aggregates, and different amount of cement contents. In the strength relationship were included compression-flexure, compression-split tension, compression-modulus and flexure-split tension. A total of 61~81 data sets were analyzed while each data set is composed of 3 to 4 experimental test data. Using the proposed strength relations, a procedure to reliably estimate modulus values from the LTPP field test section was suggested. Core specimens were taken from 10 LTPP sections on the expressway as well as 4 sections on the national road. Then compressive strengths and modulus were determined in the lab. Finally concrete modulus was averaged with the estimated values by using the derived relationship and experimental values.

Key words : material properties, design method, strength, modulus, strength relationship

요 지

본 연구에서는 조골재, 세골재 및 시멘트량을 달리한 포장용 콘크리트 시편에 대한 강도시험을 통해 물성 정량화 모델식을 제시하였다. 관계식으로는 압축강도와 휨강도, 압축강도와 쪼갬인장강도, 압축강도와 탄성계수 그리고 휨강도와 쪼갬인장강도의 상관관계식을 제시하였다. 모델식에 사용된 데이터는 총 61~81개 조합으로서, 1개 조합에 사용된 시편은 3~4개이었다. 아울러 제시된 상관관계 모델식을 사용하여 고속도로 10개 현장과 국도 4개 현장의 LTPP 구간에서 얻은 코어시편의 탄성계수를 추정하는 절차를 제시하였다. 변동성을 감안하여 본 연구에서는 각 LTPP 구간을 대표하는 탄성계수로서 압축강도에서 탄성계수로 환산한 값과 코어 시편을 사용하여 스트레인지에 의해 측정된 탄성계수의 평균값을 사용함으로써 인해 코어시편으로부터 발생할 수 있는 측정오차를 줄일 수 있는 방안을 제시하였다.

핵심용어 : 재료물성, 포장설계법, 강도, 탄성계수, 상관관계식

1. 서 론

콘크리트 포장 유지관리 시 현장에서 채취한 코어시편의 강도는 해당 슬래브 및 해당 노선의 포장상태를 가늠하는 중요한 단서가 된다. 특히 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트 포장의 잔여수명을 예측하는데 주요 변수로 사용되고 있다. 그러나 현장 코어시편에서 얻은 탄성계수는 채취 및 시험방법 및 시편의 보관 상태에 따라 측정값의 차이가 많다. 실내시험에서 얻은 각종 재료물성 데이터를 활용하여 강도간의 상관관계식을 만든다면, 포장 유지관리 시 취득한 최소한의 정보를 활용하여 신뢰성 있는 탄성계수 또는 다른 강도를 추정할 수 있어 유익한 자료로 활용될 수 있다.

현재 한국도로학회를 중심으로 수행된 한국형 포장설계법

연구 과제를 통해 포장설계법의 기본 모델과 시스템이 개발되었다(김연복 등, 2006). 한국형 포장설계법에 사용될 입력 변수에 대해서는 지난 1~2단계 연구를 통해 포장 재료물성에 대한 DB가 구축되었다. 이에 3단계 연구에 들어와서는 개발된 포장설계법을 검증하는 과정에 있다. 이러한 과정에서 도출된 문제점으로서 기존에 구축된 재료물성 정량화 모델식(김연복 등, 2006; 양성철 등, 2007a; 양성철 등, 2007b) 중에서 탄성계수나 휨강도에 관한 입력변수의 민감도가 콘크리트 포장설계법의 근간이 되는 피로모형에 매우 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 기존에 제시된 콘크리트 물성 환산식에 대한 수정 및 보완이 절실히 필요한 시점에 이르렀다.

본 연구에 사용된 강도 및 탄성계수 실험결과는 한국형 포

*정희원 · 홍익대학교 건축공학부 부교수 (교신저자)(E-mail: scyang@hongik.ac.kr)

**중앙대학교 건설환경공학과 교수

장설계법에서 수행한 실험결과 이외에 가능하면 국내 콘크리트 포장배합과 관련하여 수행한 여러 연구자들의 모든 실험결과를 포함하려고 하였다. 상관관계식에 사용되는 물성으로는 압축강도, 휨강도, 쪼갬인장강도, 탄성계수가 된다. 그러나 대부분의 실험결과는 재령별 압축강도 등의 일부 데이터만 있어서 상관관계식을 만드는데 사용할 수가 없었다. 이중 조윤희 등(2000)이 '00년에 수행한 조골재의 영향에 따른 포장용 콘크리트의 기초물성의 실험결과는 매우 유익한 자료로서 앞에서 언급한 강도 및 탄성계수에 관한 포장용 콘크리트배합의 실험결과를 포함하고 있어 본 연구에 DB로서 활용되었다.

본 연구에서는 한국형 포장설계법 과제 및 유사 연구과제에서 수행한 콘크리트 강도시험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 강도간의 상관관계 모델식을 제시하였다. 이러한 상관관계식을 활용하여 현장 LTPP 구간에서 얻은 코어시편으로부터 신뢰성 있는 탄성계수를 추정하는 방법을 제시하였다. 한편 콘크리트 피로와 같이 실제 공용중인 콘크리트 포장은 환경하중 및 교통하중의 영향에 따라 탄성계수의 물성이 콘크리트의 손상(damage)에 따라 선형 또는 제곱근의 상관관계로서 저감되는 것으로 보고되고 있다(김연복 등, 2009). 그러나 탄성계수의 시간에 따른 감소 효과에 대한 평가는 본 연구에 포함되어 있지 않다.

2. 배합설계 및 실험결과

2.1 배합설계

본 연구에 사용된 강도 및 탄성계수 실험결과는 한국형 포장설계법 연구의 일환으로 프로그램에서 요구하는 기초 재료 물성에 대한 정량화 작업을 목적으로 수행하였다(김연복 등, 2006). 또한 조윤희 등(2000)이 '00년 “콘크리트 포장의 잔존수명 추정을 위한 기초 물성 연구”의 일환으로 조골재의 영향에 따른 포장용 콘크리트의 기초물성에 관해 발표한 연구결과를 이용하였다.

현재 국내에서 사용되는 대표적인 포장용 콘크리트 배합을 기준으로 하여 화강암, 편마암, 석회암, 사암, 안산암 등 조골재를 변수로 하였다. 그리고 세골재를 변수로 하여 자연사, 세척사, 부순모래를 사용하였다. 아울러 고성능 콘크리트 배합에 대한 실험계획도 포함하였다.

그림 1은 전국 산림골재 채석장의 암종 분포를 보여준다(조윤희 등, 2000). 그림 2는 국내의 암종별 채석장 비율로서 화강암을 생산하는 채석장이 32%, 편마암이 21%, 그리고 사암과 안산암이 각각 12%와 15%의 비율을 차지하고 있다. 본 연구에서는 국내의 대표적 골재 암종으로 화강암, 편마암,

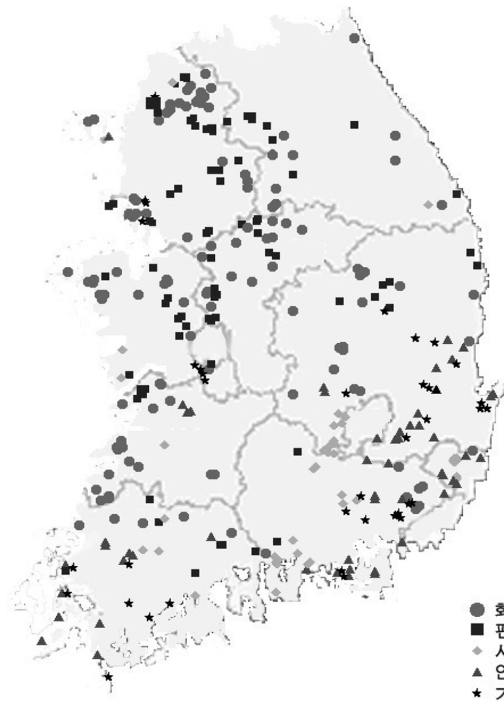


그림 1. 전국 채석장의 암종분포(지도)

전국 채석장 골재 비율

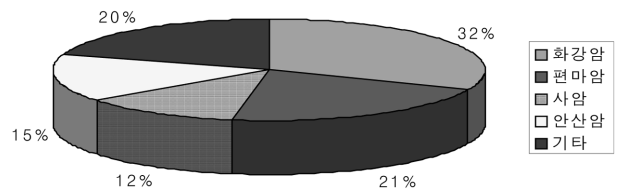


그림 2. 암종별 채석장 비율

사암, 안산암 등을 포함하였다(김연복 등, 2006; 조윤희 등, 2000).

모든 포장용 콘크리트 배합은 중부고속도로에 사용된 포장용 배합(시멘트량 340 kg/m^3)을 기준으로 하였다. 그리고 고성능 포장용 콘크리트 배합은 시멘트량을 375 kg/m^3 을 기준으로 하였다. 먼저 조골재를 변수로 하는 포장용 콘크리트 배합 1은 표 1과 같다(김연복 등, 2006). 세골재 및 시멘트량을 변화시킨 두 번째 콘크리트 배합 2는 표 2의 배합에 따라 수행되었다(김연복 등, 2006). 조윤희 등(2000)이 수행한 세 번째 콘크리트 배합 3은 표 3과 같다.

실험에 사용된 시멘트는 H사의 포틀랜드 시멘트(비표면적 $3,315 \text{ cm}^2/\text{g}$)로서 비중은 3.15이다. 자연사로서 금강산 잔골재(비중 2.63, F.M. 2.87, 흡수율 1.52%), 세척사(비중 2.61,

표 1. 조골재의 종류에 따른 콘크리트 배합설계 1(기준: 1 m^3)

조골재 종류	공기량 (%)	수량 (kg)	시멘트량 (kg)	물-시멘트비 (%)	잔골재량 (kg)	조골재량 (kg)		AE표준 감수제 (g)
						32 mm	19 mm	
화강340	4.5	144	340	42.3	682	660	532	510
석회315	5.0	144	315	45.7	822	1,073	-	788
사암315	4.5	144	315	45.7	822	1,057	-	788

표 2. 세골재의 종류 및 시멘트량에 따른 콘크리트 배합설계 2(기준: 1 m³)

배합 기호	잔골재 종류	공기량 (%)	수량 (kg)	시멘트량 (kg)	물-시멘트비 (%)	잔골재량 (kg)	조골재량 (kg)	AE표준 김수제 (g)	고성능 김수제 (g)
NS330	자연사	4.4	132	322	41.0	731	1162	805	-
NS370	"	3.5	135	375	36.0	694	1149	26	2,063
WS330	세척사	4.5	135	329	41.0	752	1153	823	-
WS370	"	4	135	375	36.0	736	1130	26	2,063
CS330	부순모래	4.6	135	329	41.0	760	1115	988	-

※화강암을 조골재로 사용함

표 3. 조윤호 등(2000)이 실험한 골재별 콘크리트 배합설계 3(기준: 1 m³)

배합 기호	조골재 종류	조골재 최대크기 (mm)	공기량 (%)	수량 (kg)	시멘트량 (kg)	물-시멘트비 (%)	잔골재량 (kg)	조골재량 (kg)	AE제 (kg)
화강32-45	화강암	32	4.5	161.0	342	47.1	703	1153	103
편마32-45	편마암	32	4.5	161.0	342	47.1	700	1175	103
안산32-45	안산암	32	4.5	161.3	342	47.2	729	1173	103
사암32-45	사암	32	4.5	160.8	342	47.0	684	1211	103
화강40-43	화강암	40	-	154.2	342	45.1	724	1153	-
편마40-43	편마암	40	-	153.7	342	44.9	665	1227	-
안산40-43	안산암	40	-	154.2	342	45.1	723	1167	-
사암40-43	사암	40	-	153.9	342	45.0	694	1210	-

흡수율 1.45%), 부순모래(비중 2.51, 흡수율 0.91%)가 사용되었다. 콘크리트 배합 3에 사용된 잔골재는 경기도 고촌의 강모래(비중 2.67, 흡수율 0.6%)를 사용하였다.

모든 골재에 대해 입도시험, 절대 건조 비중, 흡수율 시험 결과 모두 기준치를 만족시켰다. 자연사, 세척사, 부순모래의 절대건조비중, 흡수율, No.200체 통과량은 모두 기준을 만족하였으나, 세척사 및 부순모래의 경우 세립분이 표준입도범위를 약간 벗어나 있었다. 그러나 매우 전형적인 세척사 및 부순모래의 입도이어서 별도의 입도 조정 없이 그대로 사용하였다.

모든 배합은 한국도로공사의 고속도로공사 전문시방서 기준(슬럼프값 2.5 cm 이하, 공기량 4~7%)에 맞는 콘크리트의 배합설계를 시험배합을 통해 결정하였다.

2.2 실험 결과

강도시험으로서 압축강도, 휨강도, 쪼갬인장강도를 측정하였고 아울러 탄성계수를 측정하였다. 압축강도, 쪼갬인장강도 및 탄성계수 실험에 사용된 시편은 150×300 mm 원주형이고, 휨강도 실험에 사용된 보 시편은 150×150×500 mm의 사각형 시편을 이용하였다. 재령별 및 종목별 시편은 3개를 만들어서 그 평균값을 사용하였다. 탄성계수는 컴프레시미터와 스트레인게이지를 모두 사용하여 평균값을 사용하였다. 따라서 탄성계수는 6개 시편의 평균값이 된다. 다만 콘크리트 배합 3은 재령별 및 종목별 각각 4개씩 만들어서 그 평균값을 사용하였으며, 탄성계수는 비파괴 시험법으로서 “Impact echo” 시험법을 사용하였다. 한편 포장설계법 일환으로 “Impact echo” 시험에 의한 비파괴 탄성계수와 컴프레시미터 및 스트레인게이지를 사용한 탄성계수와의 상관관계에 대한 연구결과는 다음 그림 3과 같다. 그림 3에 도식화된 각각의 데이터

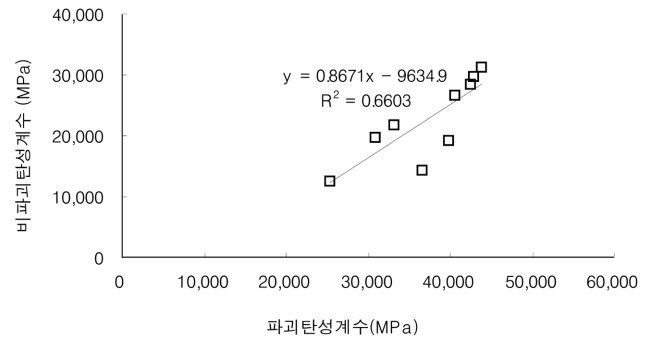


그림 3. 파괴탄성계수와 비파괴탄성계수의 상관관계

는 각각 3개씩의 컴프레시미터 시험법, 스트레인게이지 시험법 및 Impact echo 시험법에 따라 구한 결과이다. 이 관계식을 이용하여 배합설계 3에서 측정된 비파괴탄성계수 결과를 파괴탄성계수로 환산하여 표 6~표 7에 정리하였다.

표 4의 콘크리트배합 1에 따른 실험결과를 보면 석회암 및 사암 콘크리트의 경우 28일 이후의 강도 및 탄성계수가 일정하게 증가하지 않고 분산되는 경향을 보인다. 표 5의 콘크리트배합 2의 경우에는 WS330 배합의 휨강도, WS370 배합의 휨강도 및 쪼갬인장강도 또한 28일 이후의 데이터가 변동되는 경향을 보인다. 그러나 전반적으로 재령에 따라 강도 및 탄성계수가 일정하게 증가됨을 보여준다. 표 6~표 7의 콘크리트배합 3에서는 사암32-45 배합의 쪼갬인장강도가 28일 이후 유일하게 분산되는 경향을 보이는 것 이외에는 모든 실험결과가 재령에 따라 일정하게 증가함을 보여준다. 콘크리트 배합 1의 일부 데이터를 제외하고 전반적으로 재령에 따른 실험결과가 좋은 이유는 콘크리트배합 2에서는 일반적으로 예상되는 강도곡선의 경향에서 너무 벗어난 데이터에 대해 추

표 4. 배합설계 1에 대한 콘크리트 강도/탄성계수 결과

배합종류	강도 (MPa)	재령(일)					
		1	3	7	14	28	56
화강340	압축강도	13.3	24.3	31.3	31.4	35.0	39.2
	휨강도	3.5	3.8	4.3	4.4	6.2	6.2
	쪼갠인장강도	1.7	2.8	2.7	3.1	3.2	4.2
	탄성계수 ($\times 10^4$)	2.0	2.5	2.7	2.8	2.8	3.0
석회315	압축강도	8.7	23.7	34.9	39.5	33.7	40.9
	휨강도	1.5	3.8	4.9	5.1	4.1	5.4
	쪼갠인장강도	0.9	2.8	3.7	4.0	3.7	4.5
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.4	2.8	2.9	3.3	3.2	3.7
사암315	압축강도	13.9	20.9	30.9	38.4	34.6	39.9
	휨강도	2.0	3.3	4.4	4.5	3.3	5.0
	쪼갠인장강도	1.6	2.2	3.6	4.0	3.9	4.1
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.7	2.1	2.8	3.1	3.0	3.1

표 5. 배합설계 2에 대한 콘크리트 강도/탄성계수 결과

배합종류	강도 (MPa)	재령(일)						
		1	3	7	14	28	56	180
NS330	압축강도	-	17.6	25.2	-	33.9	40.8	-
	휨강도	-	3.47	3.77	-	4.28	4.38	-
	쪼갠인장강도	-	-	-	-	-	-	-
	탄성계수 ($\times 10^4$)	-	2.16	2.41	-	2.73	2.83	-
NS370	압축강도	-	22.8	30.8	-	39.0	44.5	-
	휨강도	-	-	-	-	-	-	-
	쪼갠인장강도	-	-	-	-	-	-	-
	탄성계수 ($\times 10^4$)	-	2.32	2.62	-	3.10	3.34	-
WS330	압축강도	8.6	20.7	25.4	29.4	35.7	37.3	40.5
	휨강도	-	-	-	-	4.60	4.41	4.48
	쪼갠인장강도	0.95	2.10	2.80	2.88	3.05	3.35	3.49
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.62	2.15	2.64	2.99	3.03	3.23	3.31
WS370	압축강도	9.2	22.2	28.7	35.2	40.7	41.0	42.2
	휨강도	-	-	-	-	4.94	5.04	4.87
	쪼갠인장강도	0.90	2.30	2.69	3.19	3.45	3.44	3.49
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.26	2.07	2.66	3.06	3.19	3.38	3.75
CS330	압축강도	-	19.4	26.6	-	37.3	44.7	-
	휨강도	-	-	-	-	-	-	-
	쪼갠인장강도	-	-	-	-	-	-	-
	탄성계수 ($\times 10^4$)	-	2.27	2.63	-	3.29	3.41	-

표 6. 배합설계 3(골재크기 32 mm)에 대한 골재별 콘크리트 강도/탄성계수 결과

배합종류	강도 (MPa)	재령(일)				
		3	7	14	28	90
편마32-45	압축강도	12.1	15.5	20.6	21.7	24.0
	휨강도	2.87	3.19	4.42	4.63	4.66
	쪼갠인장강도	1.98	2.53	3.24	3.52	3.86
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.69	1.98	2.00	2.38	2.63
안산32-45	압축강도	8.8	12.7	17.5	19.5	26.1
	휨강도	2.05	2.59	3.14	3.89	4.53
	쪼갠인장강도	2.03	2.97	3.02	3.27	3.17
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.41	1.85	1.96	2.06	2.73
화강32-45	압축강도	9.4	14.4	16.8	19.7	21.6
	휨강도	3.16	3.17	4.09	4.56	4.76
	쪼갠인장강도	2.06	2.83	3.00	3.34	3.73
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.40	1.71	2.01	2.31	2.72
사암32-45	압축강도	12.4	12.5	18.9	20.7	21.0
	휨강도	2.71	2.77	3.79	4.37	4.54
	쪼갠인장강도	1.93	2.46	2.47	3.46	3.25
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.46	1.84	1.99	2.18	2.37

표 7. 배합설계 3(골재크기 40 mm)에 대한 골재별 콘크리트 강도/탄성계수 결과

배합종류	강도(MPa)	재령(일)				
		3	7	14	28	90
편마40-43	압축강도	11.5	14.8	19.4	21.9	30.2
	휨강도	2.99	3.42	3.69	4.09	4.60
	쪼갠인장강도	1.55	1.89	2.09	2.26	2.62
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.79	1.87	2.28	2.63	2.68
안산40-43	압축강도	12.8	16.3	22.6	28.9	34.0
	휨강도	2.83	3.57	3.77	4.19	4.50
	쪼갠인장강도	1.58	1.87	2.10	2.25	2.40
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.33	1.38	1.66	1.86	2.14
화강40-43	압축강도	10.2	15.2	19.2	23.4	31.8
	휨강도	3.22	3.68	3.76	4.38	4.52
	쪼갠인장강도	1.96	2.18	2.49	2.64	2.81
	탄성계수 ($\times 10^4$)	1.61	1.88	2.22	2.38	2.70
사암40-43	압축강도	-	-	-	29.6	31.3
	휨강도	-	-	-	3.72	4.30
	쪼갠인장강도	-	-	-	1.86	2.58
	탄성계수 ($\times 10^4$)	-	-	-	2.41	2.52

가로 시험을 하였기 때문이며, 콘크리트배합 3에서는 각각 4개 시편에 실험결과로 이해된다.

본 논문에서는 배합 및 재령에 따른 각 배합의 세부결과를 비교하는데 목적을 두지는 않았다. 각 배합에 따른 실험결과에 대한 세부논의는 김연복 등(2006)과 조운호 등(2000)의 세부결과를 참조하면 된다. 표4~7의 결과를 정리하면, 유사한 포장용 콘크리트 배합을 사용하는데도 불구하고 배합 구성물의 약간의 차이 및 양생방법 등에 따라서 각각의 실험결과가 상이하다는 것을 알 수 있다. 그러나 강도 및 탄성계수 사이에는 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 예를 들면 특정배합의 압축강도가 저평가되어 있으면 다른 강도나 탄성계수도 낮게 측정된다. 따라서 본 논문에서는 강도 및 탄성계수 상관관계에 초점을 두었다.

3. 콘크리트 강도 물성 정량화 모델식

콘크리트 강도간의 상관관계식 및 탄성계수와 압축강도는 일반적으로 다음과 같은 식을 사용한다.

$$f_a = c \times f_b^n$$

여기서 f_a , f_b 는 상관관계를 갖고 있는 각각의 강도 또는 탄성계수이며, c 및 n 은 재료상수를 의미한다.

다음 표 8에는 기존의 연구자들이 제안한 상관관계식을 정리하였다(양성철 등, 2007a; 한국콘크리트학회, 2007; AASHTO, 2001; ACI 318, 1999; ACI 363, 1997; CEB-FIP, 1993; Ramaiah et al, 2003). 먼저 휨강도와 압축강도는 ACI 318(1999)에 의해 $n=0.5$ 인 제곱근의 공식이 상당히 오랫동안 사용되었다. 최근에는 미국 CTR의 Ramaiah 등(2003)은 제곱근 대신 $n=2/3$ 를 사용할 것을 제안하였다.

두 번째로서 쪼갬인장강도와 휨강도의 상관관계식은 전통적으로 $n=0.5$ 의 사용식이 사용되었다. 그러나 최근에 여러 연구자들이 $n=0.5\sim0.79$ 를 제안하였다(양성철 등, 2007a; AASHTO, 2001; ACI 318, 1999; ACI 363, 1997; CEB-FIP, 1993; Ramaiah et al, 2003). CEB-FIP(1993)나 Ramaiah 등(2003)은 제곱근 대신 $n=2/3$ 를 제안하였다.

세 번째로서 탄성계수와 압축강도는 제곱근을 사용하는 ACI 318(1999)의 제안식이 오랫동안 사용되었다. 이는 방대

한 데이터를 토대로 작성하였고 그 상관관계도 높기 때문이다. 국내에서는 ACI 318식을 근거로 콘크리트구조설계기준에 압축강도와 탄성계수의 상관관계식을 제시하고 있다. '03년까지는 $n=0.5$ 를 사용하였다. 또한 압축강도가 300 kgf/cm^2 이하인 경우에는 탄성계수 = $15,000 \sqrt{\text{압축강도}}$ 를, 압축강도가 300 kgf/cm^2 이상인 경우에는 탄성계수 = $10,500 \sqrt{\text{압축강도}}$ 로서 $n=0.5$ 를 사용하였다. 압축강도가 300 kgf/cm^2 (30.6MPa) 이하인 경우, MPa의 단위로 환산하면 탄성계수 = $4,700 \sqrt{\text{압축강도}}$ 가 된다. '07년 이후에는 압축강도의 범위를 구분하지 않고 하나의 통합된 관계식으로 $n=1/3$ 를 사용하여 탄성계수 = $8500 \sqrt[3]{\text{압축강도}+8}$ 로 MPa의 단위로 표현하였다.

마지막으로 쪼갬인장강도와 휨강도는 AASHTO 93 포장설계법(2001)에서는 선형의 관계로서 쪼갬인장강도는 휨강도의 86%로 간주하고 있다. 최근 Ramaiah 등(2003)은 쪼갬인장강도를 휨강도의 67%를 사용할 것을 제안하고 있다.

앞의 실험결과를 바탕으로 그림 4~7에 휨강도-압축강도, 쪼갬인장강도-압축강도, 탄성계수-압축강도, 쪼갬인장강도-휨강도의 상관관계식을 만들었다. 그리고 위의 표 8에서 소개한 기존의 상관관계식과 비교하였다.

3.1 휨강도와 압축강도의 상관관계

배합설계 1의 18개, 배합설계 2의 10개, 배합설계 3의 37개로서 총 데이터 65개를 가지고 통계처리를 하여 그림 4에 도식화하였다. 여기서 데이터 1개는 시편 3개(콘크리트배합 1,2) 또는 시편 4개(콘크리트배합 3)의 평균값을 의미한다. 최적화된 상관관계식은 $n=0.5$ 가 아닌 경우에서 구할 수 있으나 국제적으로 $n=0.5$ 를 사용하는 것이 관례로 되어 있어서, 이를 토대로 $n=0.5$ 인 경우 $c=0.8264$ 이며 R^2 은 0.736이다. 그림 4에 의하면 현행 ACI 식($c=0.63$)은 휨강도를 저평가하는 것으로 나타났으며, 특히 압축강도가 클수록 휨강도와의 상관관계는 차이가 많음을 알 수 있다. 포장용 콘크리트의 휨강도와 압축강도의 모델식으로서 다음과 같이 제안한다.

$$f_r = 0.8264 \times f_{ck}^{0.5}$$

여기서 f_r 은 휨강도(MPa), f_{ck} 는 압축강도(MPa)를 나타낸다.

표 8. 기존의 상관관계식(MPa로 환산)

상관관계	제안자	관계식	
		c	n
휨강도와 압축강도	ACI 318	0.63	0.5
	Ramaiah et al.	0.48	2/3
쪼갬인장강도와 압축강도	ACI 363R	0.60	0.5
	CEB	0.30	2/3
	Ramaiah	0.32	2/3
탄성계수와 압축강도	ACI 318(KCI-03)	4,700	0.5
	ACI 318(KCI-07)	8,500	1/3
쪼갬인장강도와 휨강도	AASHTO	0.86	1
	Ramaiah et al.	0.67	1

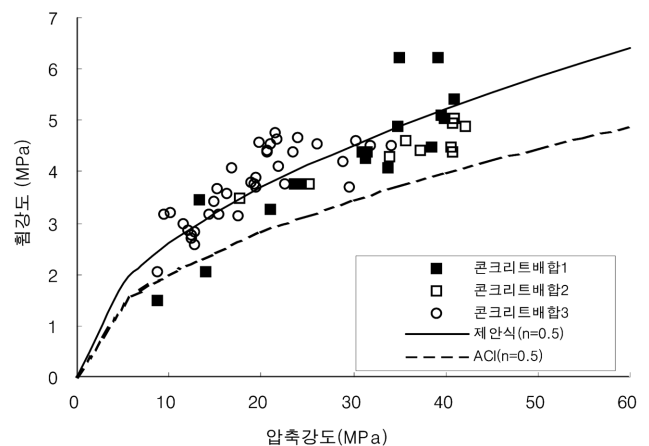


그림 4. 휨강도-압축강도 상관 그래프

3.2 쪼갬인장강도와 압축강도의 상관관계

배합설계 1의 18개, 배합설계 2의 14개, 배합설계 3의 37개로서 총 데이터 69개를 가지고 통계처리를 하여 그림 5에 도식화하였다. 쪼갬인장강도와 압축강도의 상관관계식도 보편적으로 사용되는 $n=0.5$ 를 사용하는 경우 $c=0.5725$ 이며 R^2 은 0.559로서 다른 상관관계식보다는 다소 분산되는 것으로 나타난다. 이러한 요인으로는 첫째, 쪼갬인장강도 특성상 시편 단면에 인장과 압축이 동시에 발생하는 영향이 있다. 둘째로는 쪼갬인장강도 시험 시 상하단부에 등분포하중(일반적으로 시편 직경의 1/6을 폭으로 사용)을 모사하는 목재 박편(wooden strip)의 등분포하중 폭의 영향을 감안치 못하는 쪼갬인장강도 산출식의 영향도 있다. 셋째로는 시험과정에서 정확하게 파괴하중을 구하기 어려운 점이다. 단면이 완전히 균열이 생성되었는데도 하중재하부분과 받침부분에서는 균열이 V자 형태로 벌어져서 쪼갬모양을 형성하여 여전히 하중을 받는 것으로 인식하기 때문이다.

다음은 본 연구에서 제안한 쪼갬인장강도와 압축강도의 상관관계식이다.

$$f_{sp} = 0.5725 \times f_{ck}^{0.5}$$

여기서 f_{sp} 은 쪼갬인장강도(MPa), f_{ck} 는 압축강도(MPa)를 나타낸다. 그림 5를 보면 ACI식($c=0.60$)과 본 연구에서 제안한 관계식($c=0.5725$)은 유사함을 알 수 있다. 상대적으로 CEB-FIP(1993) 공식은 위의 식보다 쪼갬인장강도가 저평가되고 있으며, 더욱이 낮은 압축강도에서는 차이가 더 난다.

3.3 탄성계수와 압축강도의 상관관계

배합설계 1의 18개, 배합설계 2의 26개, 배합설계 3의 37개로서 총 데이터 81개를 가지고 통계처리를 하여 그림 6에 도식화하였다. 배합설계 3의 특정 데이터(안산40-43, 그림 6에서 가장 낮은 수준의 탄성계수 원 심벌 5개)의 경우를 제외하고는 '07년도 구조설계 기준 이전에 사용되었던 $n=0.5$ 의 관계식을 사용하는 경우에 상관관계가 좋음을 보여준다. 상수 $n=0.5$ 및 $n=1/3$ 의 관계식을 사용하는 경우 탄성계수와 압축강도의 상관관계식은 각각 다음과 같다.

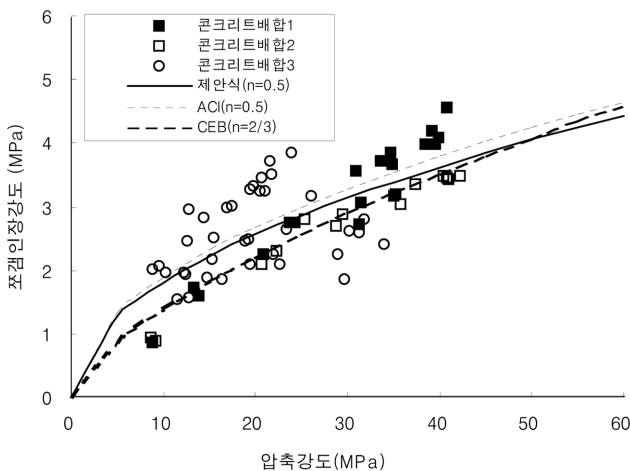


그림 5. 쪼갬인장강도-압축강도 상관 그래프

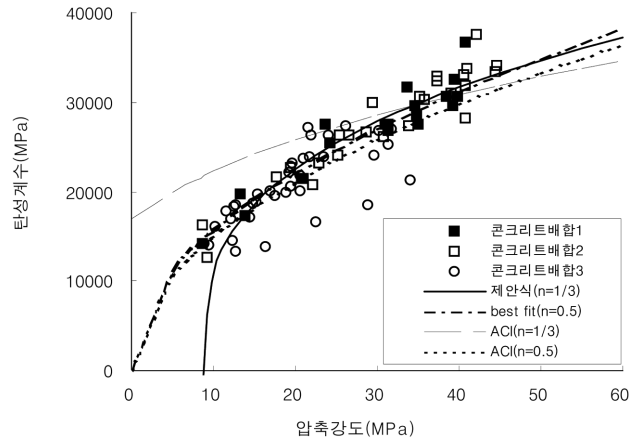


그림 6. 탄성계수-압축강도 상관 그래프

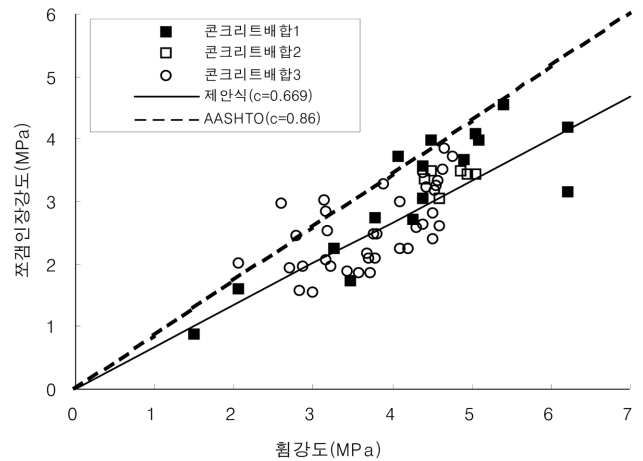


그림 7. 쪼갬인장강도-휨강도 상관 그래프

$$E = 4,931 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (n=0.5 \text{인 경우, } R^2 \text{은 } 0.842)$$

$$E = 10,046 \times \sqrt[3]{f_{ck}} - 8.76 \quad (n=1/3 \text{인 경우, } R^2 \text{은 } 0.806)$$

여기서 E 는 탄성계수(MPa), f_{ck} 는 압축강도(MPa)를 나타낸다. 한편 07년도 KCI 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 탄성계수의 상관관계식에서는 앞에서 설명한 바와 같이 세제곱근 안에 압축강도+8MPa이 더해진 변수로 표현되었다. 그러나 본 실험의 결과에서 얻어진 회귀분석에서는 그림 6과 같이 낮은 압축강도 수준에서 탄성계수가 작게 측정되는 경향으로 인해 y -절편이 (-)의 값을 나타낸다. 이는 KCI식의 근간이 되는 ACI식에 사용된 콘크리트가 다양한 콘크리트 강도별로 탄성계수를 측정된 것에 비해, 본 실험에서는 일정한 포장용 콘크리트 강도에 대해 재령을 달리하여 측정된 압축강도와 탄성계수의 상관관계가 영향을 미친 것으로 파악된다. 그림 6에는 n 값의 차이에 의해 압축강도에 따라 예측되는 탄성계수의 차이가 극명함을 보여준다. 두 예측식의 차이는 압축강도가 약 15 MPa 이상인 경우에 3.2%로서 사용할 수 있으며, 압축강도가 10 MPa인 경우, 두 모델식의 오차가 31% 정도를 보이며, 15 MPa 이상에서는 약 3%로 줄어든다.

3.4 쪼갬인장강도와 휨강도의 상관관계

배합설계 1의 18개, 배합설계 2의 6개, 배합설계 3의 37

개로써 총 데이터 61개를 가지고 통계처리를 하여 그림 7에 도식화하였다. AASHTO(2001)에서 제안한 식($c=0.86$)은 쪼갬인장강도가 고평가되고 있으며 Ramaiah 등(2003)의 제안식($c=0.67$)과 본 연구의 제안식($c=0.669$)이 동일한 것으로 나타났다. 다음은 본 연구에서 제안한 쪼갬인장강도와 휨강도의 선형 상관관계식으로서 R^2 은 0.609에 해당된다. 앞에서 설명된 바와 같이 쪼갬인장강도는 시험 특성상 결과가 다소 분산되는 것으로 이해된다.

$$f_{sp} = 0.669 \times f_r$$

여기서 f_{sp} 는 쪼갬인장강도(MPa), f_r 은 휨강도(MPa)를 나타낸다.

4. 모델 정량화식을 이용한 LTPP 구간의 물성 추정

4.1 시험구간의 코어강도

LTPP 구간에 대한 조사는 2005-2006년에 실시되었다. 코어시편에 의한 시험은 압축강도와 탄성계수를 측정하였다.

LTPP 구간은 10개의 고속도로 구간과 4개의 국도 구간을 선정하였다. 각 구간에서 지름 100 mm 코어시편 3~5개를 채취하였으며, 압축강도 및 탄성계수를 측정하여 다음 표 9에 정리하였다. 전체적으로 LTPP 구간의 압축강도가 약 38.7~58.9 MPa 정도까지 상당히 높게 나타난 반면 스트레인 게이지를 이용하여 측정된 탄성계수의 값은 19.5~41.3 GPa로서 최대와 최소의 비가 2배가 넘어서 코어시편에 의한 탄성계수 측정값에 대한 신뢰성이 낮음을 알 수 있다.

4.2 LTPP 구간의 탄성계수 추정

표 9의 결과를 보면 압축강도는 상당히 높게 측정되었으나 탄성계수가 상대적으로 작게 측정되었고 변동성이 큼을 알 수 있다. 이는 LTPP 현장 시험에서 흔히 목격되는 바이다.

표 9. LTPP 시험구간의 코어강도 결과

번호	노선	준공년도	시멘트량 (kg/m ³)	평균압축강도 (MPa)	평균탄성계수 (GPa)
고-1	중앙선	2003	-	48.8	30.2
고-2	서해안선	2003	-	43.8	33.5
고-3	서해안선	2001	358	58.9	35.2
고-4	영동선	1992	358	45.6	19.5
고-5	중앙선	1992	358	49.7	41.3
고-6	중앙선	2001	-	38.7	41.2
고-7	경부선	1999	348-370	40.4	22.7
고-8	경부선	1995	348-370	54.1	26.9
고-9	남해선	2001	-	53.4	24.6
고-10	남해선	1995	348-370	48.3	27.8
국-1	국도21	-	-	43.4	24.4
국-2	국도22	-	-	43.5	20.3
국-3	국도42	-	-	44.4	30.5
국-4	국도37	-	-	46.4	26.8

표 10. 고속도로 LTPP 구간의 탄성계수 추정값

번호	노선	탄성계수(GPa)		
		압축강도→탄성계수	탄성계수 측정시험	평균값
고-1	중앙선	34.5	30.2	32.3
고-2	서해안선	32.6	33.5	33.1
고-3	서해안선	37.8	35.2	36.5
고-4	영동선	33.3	19.5	26.4
고-5	중앙선	34.8	41.3	38.0
고-6	중앙선	30.7	41.2	36.0
고-7	경부선	31.4	22.7	27.1
고-8	경부선	36.3	26.9	31.6
고-9	남해선	36.0	24.6	30.3
고-10	남해선	34.3	27.8	31.1
국-1	국도21	32.5	24.4	30.7
국-2	국도22	32.5	20.3	29.2
국-3	국도42	32.9	30.5	34.3
국-4	국도37	33.6	26.8	31.8

변동성을 감안하여 본 연구에서는 각 LTPP 구간을 대표하는 탄성계수로서 표 10과 같이 압축강도→탄성계수로 환산한 값과 코어 시편을 사용하여 스트레인게이지에 의해 측정된 탄성계수의 평균값으로 정하였다. 압축강도→탄성계수 환산식은 본 설계법 과제에서 제안한 모델식($E = 4,931 \times f_{ck}^{0.5}$)을 사용하였다.

표 10에 의하면 압축강도 시험으로부터 구한 결과를 이용하여 평균 개념의 탄성계수를 추정한 결과 전체 LTPP 구간의 경우는 26.4~38.0 GPa 정도의 탄성계수를 도출하였다. 이러한 값은 일반적으로 예상되는 값의 범주이다. 표 10의 고-4의 데이터를 보면 영동선 구간의 코어시편으로부터 측정된 탄성계수의 값이 19.5GPa이었으나 상관관계식을 이용하여 압축강도로부터 환산된 탄성계수를 평균한 최종 탄성계수 값이 26.4 GPa로 추정할 수 있어 코어시편에서 직접 측정된 값보다는 일반적으로 알고 있는 값에 근접하다.

다음 그림 8-9에는 각각 고속도로와 국도 LTPP 구간의 탄성계수 추정값을 구간 번호별로 정리하였다. 스트레인 게이지

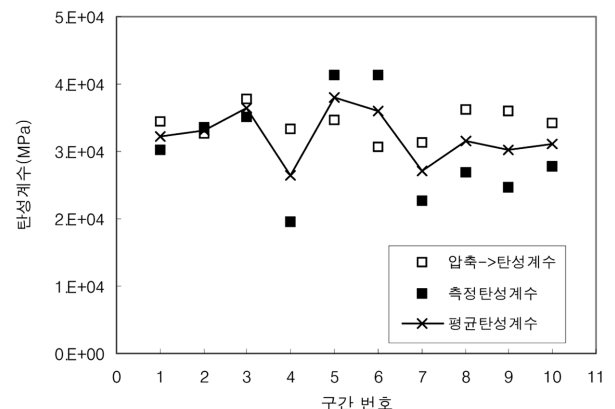


그림 8. 고속도로 구간의 추정 탄성계수

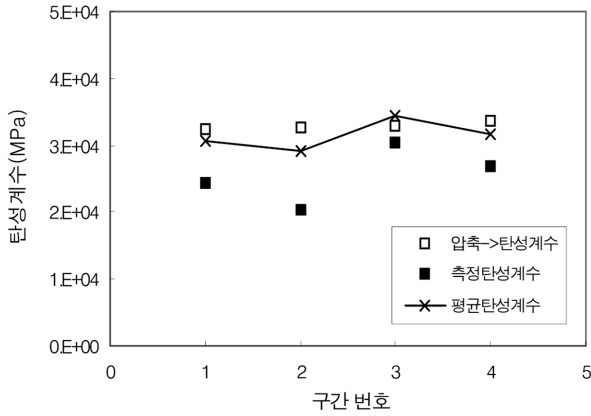


그림 9. 국도 구간의 추정 탄성계수

에 의해 측정된 탄성계수의 값이 상대적으로 많이 변동됨을 알 수 있다. 이는 코어시편의 채취 과정에서 시편이 교란되기 때문이기도 하며, 상대적으로 압축강도로부터 탄성계수를 사용하는 환산식의 경우는 통계학적인 관계식을 사용하기 때문이다. 앞에서 제시한 절차에 의한 평균탄성계수로서 고속도로의 경우 26.4-38.0 GPa 정도이었고 국도의 경우는 29.2-34.3 GPa로 추정할 수 있다.

6. 결 론

- 총 61~81개 조합의 포장용 콘크리트 시편에 대한 콘크리트 강도시험을 통해 물성 정량화 모델식을 제시하였다. 관계식으로는 압축강도→휨강도, 압축강도→쪼갠인장강도, 압축강도→탄성계수, 휨강도→쪼갠인장강도의 상관관계식을 제시하였다.
- 이들 제시된 상관관계 모델식을 사용하여 현장 LTPP 구간에서 얻은 코어시편의 탄성계수를 추정하는 절차를 제시하였다. 변동성을 감안하여 본 연구에서는 각 LTPP 구간을 대표하는 탄성계수로서 압축강도→탄성계수로 환산한 값과 코어 시편을 사용하여 스트레인게이지에 의해 측정된 탄성계수의 평균값을 사용함으로써 코어시편으로부터 발생될 수 있는 측정오차를 줄일 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 홍익대학교 학술진흥연구비에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김연복 등 (2006) 콘크리트 포장 설계법 개발 연구보고서, 건설교통부.
- 김연복 등 (2009) 콘크리트 포장 설계법 개발 연구보고서, 국토해양부.
- 양성철, 박종원 (2007a) 포장용 콘크리트의 강도 및 탄성계수 상관관계식, 한국도로학회논문집, 한국도로학회, 제9권, 제4호, pp. 205-213.
- 양성철, 조윤희, 정진훈, 김연복 (2007b) 콘크리트 물성 정량화식을 이용한 LTPP 구간의 물성 추정, 2007 도로학회 학술발표논문집, 한국도로학회, pp. 281-284.
- 조윤희 등 (2000) 콘크리트 포장의 잔존수명 추정을 위한 기초 물성 연구 연구보고서, 한국도로공사.
- 한국콘크리트학회 (2007) 2007년도 개정 콘크리트 구조설계기준 해설.
- AASHTO (2001) *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, AASHTO.
- ACI 318 (1999) *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, American Concrete Institute.
- ACI 363 (1997) *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*, American Concrete Institute.
- CEB-FIP (1993) *CEB-FIP Model Code 1990*, Committee Euro-International du Beton.
- Ramaiah, S.V, McCullough, B.F, Dossey, T. (2003) *Estimating In Situ Strength of Concrete Pavements under Various Conditions*, FHWA/TX-04/0-1700-1 Report, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.

- ◎ 논문접수일 : 10년 01월 18일
- ◎ 심사의뢰일 : 10년 01월 21일
- ◎ 심사완료일 : 10년 01월 28일