

콘크리트 크리프, 수축 및 내구성에 대한 일본의 실무예측

Practical Prediction of Creep, Shrinkage and Durability of Concrete In Japan



권 승 희^{1)*}

Kwon, Seung Hee



강 수 태²⁾

Kang, Su Tae

이번 기사에서 소개하는 논문은 국제학술회의 CONCREEP8(Proceedings of 8th International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Ise-Shima, Japan, Sept. 30 - Oct. 2, 2008, pp.529-539)의 주제강연으로 발표되었다. 저자는 Y. Watanabe(Shimizu Corporation), T. Ohura(Mitsubishi Construction Co. Ltd.), H. Nishio(Abe-Nikko Co. Ltd.), M. Tezuka(Oriental Shiraishi Corporation)이다. 일본 내 실제 교량에서 장기간 측정된 변형과 설계할 때 예측된 변형이 매우 큰 차이를 보이고 있으며, 우리나라의 구조물 진단 및 유지관리 측면에서도 참고할만한 자료라 생각되어 번역기사로 소개한다.

요약문

최근 일본의 설계규정(설계기준 내 재료모델)은 전 세계에서 수집된 실험 결과들을 바탕으로 개발된 것으로, 세계 최고 수준의 예측 방법으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 장기간 관측된 실제 교량의 처짐은 예측결과와 많은 차이를 나타내고 있다. 이 논문에서는 콘크리트의 시간의존적 거동에 대한 일본 설계규정의 주요 변천 과정을 소개하고, 실제 장기거동과 예측결과가 큰 차이를 보이는 원인에 대한 논의가 이루어질 것이다. 또한 내구성이 높고 경제적인 콘크리트 구조물 건설을 위한 앞으로의 연구방향이 제시될 것이다.

1. 콘크리트 시간의존적 거동에 대한 설계 규정의 변화

일본의 경우 콘크리트 구조물 설계기준은 몇

1) 명지대학교 토목환경공학과 부교수, 공학박사

2) 대구대학교 토목공학과 전임강사, 공학박사

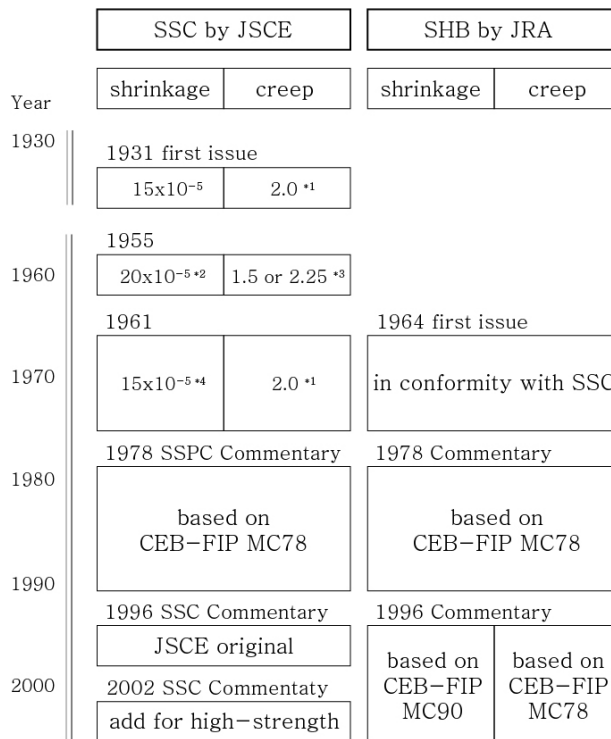
* E-mail : kwon08@mju.ac.kr

가지 단계를 통해 발전해 왔다. 초기 개발단계에서는 유럽의 설계기준으로부터 많은 영향을 받았지만, 현재의 설계기준은 일본에서 독자적으로 개발된 것이다.

최근, 일본의 콘크리트 구조물 설계기준은 토목과 건축 부분으로 나뉘어져 있다. 토목 구조물 설계는 일본 토목학회(Japan Society of Civil Engineering, JSCE)에서 개발한 콘크리트 구조물 설계기준(Standard Specifications for Concrete Structures, SSC)을 따르고 있다. 고속도로, 철도, 항만 등 사회 공공시설물 건설을 담당하고 있는 몇몇 기관은 자체적으로 개발한 설계기준을 사용하고 있다. 예를 들어, 일본 국토교통성 내 국토청 산하의 일본도로협회(Japan Road

Association, JRA)의 경우 고속도로 교량에 대한 설계기준(Specifications for Highway Bridges, SHB)을 제정하고 있으며, 철도기술연구원은 철도구조물에 대한 설계기준을 개발하여 사용하고 있다. 건축구조물 설계는 법적으로 건축학회에서 발간한 건축물 설계기준을 따르도록 되어 있다.

일본 토목학회는 최신의 연구결과를 설계기준에 반영하는 정책을 운영하고 있으며, 이에 따라 5년마다 소폭의 개정을 10년마다는 대폭의 개정이 이루어지고 있다. 반면에, 공공기관 자체의 설계기준의 경우 실제 설계 실무에서 발생할 수 있는 혼동을 피하기 위해 대폭적인 개정을 의도적으로 피하고 있다. 예를 들어, Fig. 1에서 보듯이 콘크리트의 시간의존적 거동에 대한 설계규



*1 : outdoors
 *2 : outdoors, minimum dimension of member 200-700mm
 *3 : outdoors, high-early-strength portland cement
 *4 : outdoors, post-tensioning
 SSPC : Standard Specifications of Prestressed Concrete

Fig. 1 설계기준에 포함된 수축 및 크리프 모델의 변천과정

정의 경우 SSC와 SHB가 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 일본토목학회의 경우 1996년 이후부터 일본에서 자체 개발한 모델을 SSC에서 채택하여 사용하고 있으나, SHB의 경우 여전히 CEB-FIP model code를 사용하고 있다.

1989년에는 탄산화 및 염소이온 침투와 같은 여러 가지 열화요인에 대해 내구성을 정량적으로 예측할 수 있는 방법이 일본토목학회를 통해 도입되었으며, 그 후 20여 년 이상 일본토목학회를 중심으로 콘크리트 구조물의 내구성 설계에 관한 연구가 지속되고 있다. 2000년의 설계기준 개정과정에서 처음으로 내구성 설계규정이 SSC에 도입되었으며, 2007년부터는 내구성이 안전성, 사용성, 내진성능과 별개로 확보되어야 할 구조물의 주요 성능으로 다루어지고 있다.

2. 수축과 크리프에 대한 설계규정

2.1 수축

일본토목학회 설계기준(SSC)의 수축 모델은 1996년까지 CEB-FIP MC 78을 근간으로 하였으나, 1996년에 이루진 개정작업에서 압축강도 55MPa 이하의 콘크리트에 대한 새로운 예측 모델을 도입하였다. 이 예측 모델은 습도, 단위수량, 부재크기, 노출 시 재령 등의 여러 가지 영향인자에 대한 방대한 수축 실험결과를 토대로 일본토목학회에서 독자적으로 개발한 모델이다. 일본에서 자체적으로 개발한 최초의 예측식으로, 2002년 개정편에는 압축강도 55MPa에서 80MPa까지의 고강도 콘크리트에 대해서도 수축을 예측할 수 있는 모델이 포함되었다. 고강도 콘크리트의 경우 자기수축(Autogenous Shrinkage)과 건조수축을 개별적으로 계산하여 그 합으로 전체 수축량을 구할 수 있도록 되어 있다. 반면에, 일반콘크리트의 경우는 자기수축과 건조수축의

구분 없이 전체 수축량을 예측할 수 있도록 되어 있다.

2007년의 개정편(SSC2007)에는 골재 품질에 대한 새로운 연구결과를 바탕으로 2002년 개정편(SSC2005)에서 규정한 수축 변형률의 1.5배를 사용하도록 규정하였다. 예를 들어, 타루이 고가교(Tarui viaduct)의 경우 완공 후 반년 만에 심각한 열화가 발생하였으며, 이는 예측값 보다 3배나 큰 수축 변형률에 따른 것으로 파악되었다. 이러한 조기 열화의 원인을 조사하기 위해 일본토목학회 내에 위원회가 구성되었으며, 콘크리트에 사용된 굵은골재가 원인인 것으로 판명되었다.

반면에 일본도로협회 설계기준(SHB)은 1996년부터 현재까지 CEB-FIP MC 90을 채용하여 사용하고 있다. 하지만 최근 일본도로협회에서도 수축에 대한 실험결과를 바탕으로 기존 수축 예측모델의 정확성을 재검증하는 작업을 진행하고 있다.

한편, SSC2007, SSC2002, SHB2002, CEB-FIP MC90, ACI 209-92로부터 예측되는 수축량을 비교하는 연구가 수행되었으며, 그 결과 중 일부를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 다음과 같은 가정으로부터 얻은 결과이다.

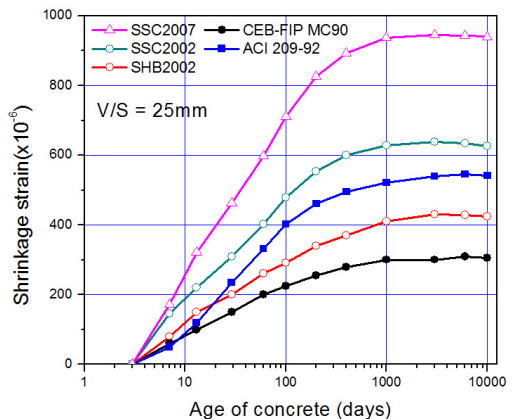


Fig. 2 모델별 수축 변형률 예측결과 비교

- 시멘트 종류 : 조강시멘트
- 물-시멘트 비(w/c) : 38.0%
- 단위수량(W) : 172kg/m³
- 부피-표면적 비(V/S) : 25mm
- 골재 온도 : 20℃
- 상대습도 : 70%
- 노출 시 콘크리트 재령 : 3일
- 28일 압축강도 : 55MPa
- 공기량 : 4.5%
- 잔골재율(S/A) : 36.3%

수축 변형률의 시간에 따른 증가 형태는 모델식에 따라 큰 차이가 없으나, 수축 변형률의 증가속도 및 최종 수축량은 큰 차이를 나타내었다. SSC2007은 다섯 가지 설계기준 중 가장 큰 값을 보였으며, 가장 작은 예측값을 보인 CEB-FIP MC 90비해 최종 수축량이 3배 큰 것으로 나타났다. Fig. 3은 Fig. 2와 동일 조건에서 부피-표면적 비에 따른 결과를 비교한 것이다. 부피-표면적 비가 커질수록 모델식들의 차이는 줄어들었고, 실제 교량의 일반적인 부피-표면적 비인 200mm 이상의 경우에는 그 차이가 무시할 수 있을 정도로 작았다.

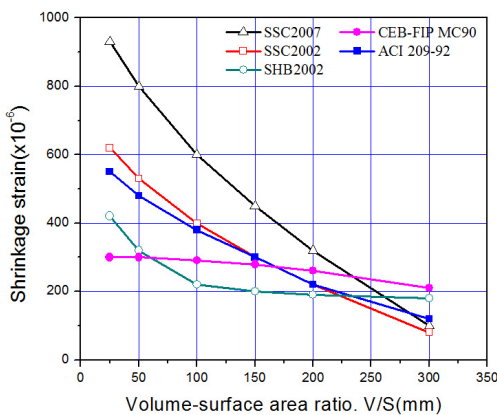


Fig. 3 부피-표면적 비에 따른 수축 변형률의 변화

2.2 크리프

1996년까지 SSC와 SHB는 크리프 모델로 CEB-FIP MC 78을 채택하여 사용해왔다. 그러다 1996년 일본토목학회는 55MPa 이하 강도 콘크리트에 대해 독자적으로 개발한 새로운 모델을 SSC의 크리프 모델로 사용하기 시작하였다. 이 예측식의 경우 기본크리프(basic creep)와 건조크리프(drying creep)를 구분하여 계산하고, 그 합으로 총 크리프 변형률을 예측하게 된다. 2002년 55MPa에서 80MPa까지의 고강도 콘크리트에 대한 크리프 예측식이 새롭게 포함되었으며, 고강도 콘크리트에 대해선 기본크리프와 건조크리프의 구분 없이 총 크리프 변형률을 산정하도록 되어 있다.

반면에 SHB는 1978년부터 현재까지 CEB-FIP MC78을 사용하고 있다. 이 예측 모델은 크리프 변형률을 지연된 탄성변형과 소성변형으로 구분하고 있다. 일본 내에 건설된 대부분의 고속도로 교량은 SHB에 따라 설계된 것이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 물-시멘트 비 43% (일반콘크리트)와 30%(고강도 콘크리트)에 대해 SSC2007로 계산된 크리프계수를 나타낸 것이다. 크리프계수의 계산에 가정한 콘크리트 배합

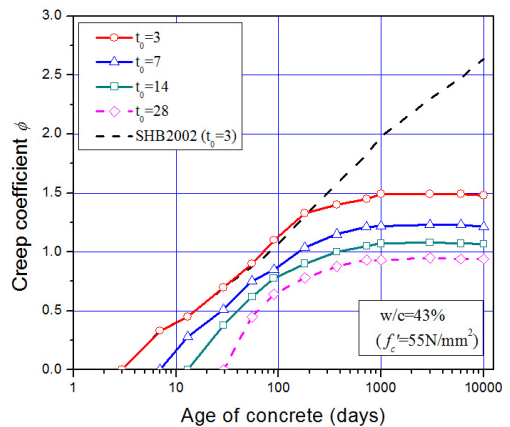


Fig. 4 SSC2007의 크리프계수(w/c=43%)

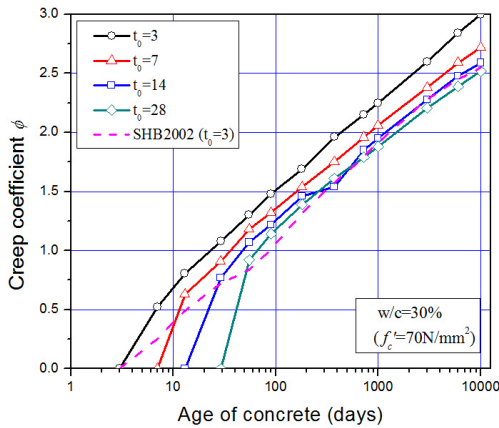


Fig. 5 SSC2007의 크리프계수(w/c=30%)

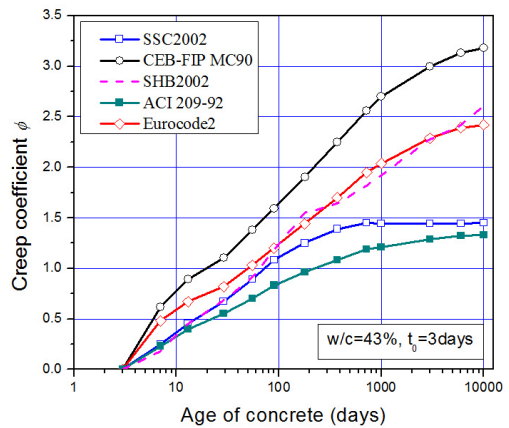


Fig. 6 모델식별 크리프계수의 비교

Table 1 크리프 계산 시 가정된 콘크리트 배합

w/c	s/a	Unit mass (kg/m ³)		Strength
		W	C	
43%	42%	165	384	55MPa
30%	39%	165	550	70MPa

은 Table 1과 같다. 부피-표면적 비는 200mm였으며, 나머지 조건은 2.1절에서 건조수축 계산에 사용된 것과 동일하다. 하중이 가해지는 시점의 재령은 3, 17, 14, 28일로 하였다. 일반콘크리트에 대해 SSC와 SHB로 예측된 결과는 200일까지 매우 비슷하지만, 그 후로 차이가 커지는 것으로 나타났다. 고강도 콘크리트의 경우 모든 재령에서 SSC와 SHB가 비슷한 결과를 보였다.

Fig. 6은 SSC2007, SHB2002, CEB-FIP MC90, ACI 209-92, Eurocode2로 계산된 크리프 계수를 비교한 것이다. 계산에 사용된 가정은 다음과 같다.

- 28일 압축강도 : 55MPa
- 재하 시 재령 : 3일
- 슬럼프 : 80 mm
- 공기량 : 4.5%
- 잔골재율(S/A) : 45%

재령 10,000일 시점에서 크리프 계수는 1.5에서 3.2로 모델식에 따라 매우 큰 차이를 보이고 있다.

3. 내구성

3.1 탄산화

콘크리트의 탄산화는 오래전부터 많이 알려진 내구성 관련 문제 중 하나이다. SSC2007에서는 탄산화 깊이와 철근 부식이 시작되는 한계 깊이 사이의 비율로 탄산화 저항 성능을 평가하고 있다. 탄산화 깊이는 구조물 사용기간의 제곱근에 비례하는 것으로 가정되며, 한계 깊이는 외부 환경 조건에 따라 10mm에서 25mm사이로 결정된다. 이러한 설계규정은 물-시멘트비 50% 이하에서 일반 포틀랜드 시멘트가 사용되고 콘크리트 덮개가 30mm 이상인 경우에는 고려하지 않아도 된다.

3.2 염소이온 침투

일본은 바다로 둘러싸인 나라로, 염소이온 침투는 콘크리트 구조물의 내구성 설계에서 가장

중요한 요소 중 하나이다. 이러한 인식에도 불구하고, 염소이온 침투로 인해 심각한 열화가 발생하는 구조물이 잇달아 나타난 1980년대까지 이 부분에 대한 연구가 활발히 이루어지지 않았다. Fig. 7은 SSC와 SHB에서 최소 철근 덮개에 대한 규정의 변천과정을 정리한 것이다.

1980년 염소이온 침투에 대한 대책을 마련하기 위해 산·학·연 공동연구가 수행되었으며, 이 연구의 성과로 일본도로협회에서 염소이온 침투에 대한 지침이 1984년 발간되었고, 다음과 같은 규정이 제시되었다.

- 염소이온 침투가 심한 지역의 경우, 거더의 콘크리트 덮개는 35mm에서 70mm까지 증가되어야 한다.
- 상부구조 콘크리트의 최대 물-시멘트 비는 50%까지로 제한한다.

- 필요한 경우, 콘크리트 표면의 코팅 및 에폭시 코팅 철근을 사용할 수 있다.

일본도로협회의 지침 발간 이후, 일본토목학회는 콘크리트 구조물에서 염소이온 침투의 영향을 평가하기 위한 이론적 접근법의 개발을 시작하였다.

SSC의 2000년 개정판에서, 일본토목학회는 처음으로 확산이론을 사용하여 염소이온 침투에 기인한 손상을 정량적으로 평가할 수 있는 새로운 방법을 도입하였다. 이 방법의 기본 개념은 구조물의 설계수명 내에 철근 표면 위치의 염소이온 농도가 철근 부식 한계(1.2kg/m³) 이하가 되는지 여부를 검토하는 것이다. 이 개념은 SSC2007에도 포함되어 있다. 국토교통성 국토청 산하 토목공학 연구원은 실제 교량에서 수집된 염소이온

Year	SSC by JSCE		SHB by JRA	
	Environmental Condition	min. cover (mm)	Environmental Condition	min. cover (mm)
1940	1931 first issue			
	corrosive general	33 15		
1960	1967 seawater attack	70	1964 First issue	
	seabreeze attack	50	No rule	
	1974 corrosive	35	1968 corrosive general	35 25
	exposed to rain	25		
1980	not exposed to rain	15	1984 Guideline	
			Area Classification C	
2000	2000 W/C=0.4, 100yrs, w/wa=0		on the sea	70
	splash zone	211	0-100m	50
	0m from seashore	191	100-200m	35
	100m	149	2000 Research Report	
	250m	119	Area Classification C. 100yrs	
	1km	59	on thesea-20m	100
			20-50m	70
		50-100m	50	
		100-200m	35	

Note w:crack width. wa:permissible crack width

Fig. 7 일본토목학회(JSCE)와 일본도로협회(JRA)의 최소 콘크리트 덮개 규정의 변천

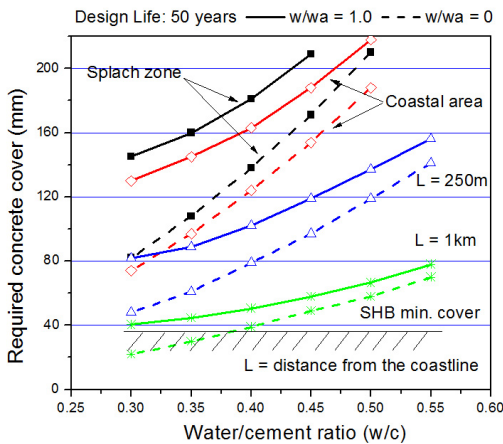


Fig. 8 SSC2007의 소요 콘크리트 덮개

침투 결과를 바탕으로 SSC2000을 수정하여 고속도로 교량의 설계에 적용할 것을 제안하고 있다.

Fig. 8은 50년 설계수명을 갖는 콘크리트 구조물에 대해 SSC2007에 따라 소요 콘크리트 덮개를 계산한 결과이다. 그 결과를 살펴보면, 해안으로부터 1km 떨어진 위치에서도 SHB에서 규정하는 소요 콘크리트 덮개는 SSC2007의 규정을 만족하지 못하고 있다.

SSC2000에서 염소이온 침투에 관한 내구성 설계 평가방법은 확산이론에 근거하여 최소 콘크리트 덮개를 결정하는 방법으로, 국제적으로도 혁신적인 것이라 할 수 있으며, 관련 분야의 연구개발을 촉진시키는 데 크게 기여하였다. 하지만, 이 평가방법의 안정성 및 정확성을 개선하기 위해서 앞으로도 실제 콘크리트 구조물로부터 수집된 보다 많은 데이터를 통해 검증 및 보완이 이어져야 할 것이다.

3.3 알칼리 골재 반응

1980년대, 염소이온 침투에 의해 열화된 구조물이 몇몇 나타나기 시작한 시점과 거의 동일한 시점에, 안산암을 굵은골재로 사용한 구조물에

서 알칼리 골재 반응에 기인한 손상이 발견되었다. 이로부터 학계와 국공립연구기관을 중심으로 관련 연구가 활발히 진행되었다. 이들 연구의 결과로 알칼리 골재 반응으로 인한 열화를 방지하기 위해 ASTM에 따라 반응성 골재의 실험방법, 분류기준, 제어방법을 제시하였다. 1989년, JIS A5308 “레미믹스트 콘크리트(Ready-Mixed Concrete)”을 개정할 때, 알칼리 골재 반응을 원천적으로 방지할 수 있는 방법이 포함되었다. 2003년 JIS A5308의 재개정 시 다음과 같은 규정이 새롭게 포함되었다.

- a. 콘크리트 내 총 알칼리 무게를 증가의 산화나트륨(Na_2O)으로 계산하여 3.0kg/m^3 이하로 제한
- b. B, C 타입 고로슬래그 시멘트 또는 B, C 타입의 플라이애쉬 시멘트와 같이 알칼리 반응에 대한 저항성이 높은 시멘트의 사용
- c. 표준 시험법에 의해 안전이 검증된 골재의 사용

위에서 언급한 방지 대책에도 불구하고, 2003년 알칼리 골재 반응으로 인해 T형 교각의 상부보에서 철근의 파괴가 보고되었다. 이와 유사한 문제가 다른 곳에서도 드러났으며, 힘을 받는 부분과 압접(pressure-welding) 커플러에 위치하고 있는 철근이 파괴되는 현상이 나타났다. 이에 일본토목학회 내에 기술위원회가 긴급하게 소집되었고, 이들 손상에 대한 메커니즘을 규명하고 안전성을 확보하기 위한 연구가 수행되고 있다.

3.4 긴장재 보호

긴장재의 부식 방지 방법으로 일반 시멘트 페이스트를 이용한 그라우팅 방법이 가장 널리 적용되어 왔다. Fig. 9는 일본과 해외에서 적용하

Year	Japan			Overseas
	Event	Material	Machine	Event
1970		1970 Water reducing admixture, aluminum powder		
1980	1987 JPCCA Manual	1982 High viscous type	1984 Squeeze pump (0.75kw)	1985 UK: Collapse of Ynys-y-Gwas Bridge
	1991 Fracture of prestressing bar	1992 Pre-grouted prestressing steel		1992 Belgium: Collapse of Bridge over River Schede
	1993 JPCCA Manual revision			1992 UK: Ban on internally grouted tendons
1990	1994 JH ban on transverse prestressing bar	1996 Non-bleeding type	1996 Squeeze pump (3.7kw)	1996 UK: Lift the ban
	1996 JPCCA Manual revision	1999 Transparent sheath	1999 Flowmeter	
	1999 JH ban on internally grouted tendons	2000 Super low viscous type	2002 Combined use of vacuum	2001 USA: Fracture of Mid-Bay Bridge
2000	2002 JPCCA Manual revision	2005 Non-bleeding, Non-expansive type	2004 Filling sensor	2002 FDOT Improve program
	2005 JPCCA Manual revision			2002 fib Guide to good practice
	2005 JPCEA Guidelines issue			

Note: JPCCA : Japan Prestressed Concrete Construction Association
 JPCEA : Japan Prestressed Concrete Engineering Association
 JH : old Japan Highway Public Corporation
 FDOT : Florida Department of Transportation

Fig. 9 그라우팅 기술의 변천과정

고 있는 그라우트 기술의 변천과정을 간략히 나타낸 것이다. 1980년대 중반부터 심각한 열화에 기인한 교량의 붕괴 또는 긴장재의 파단이 여러 나라에서 발생하였다. 이러한 급작스런 사고로 인해 1992년 영국에서는 내부에 그라우트를 채우는 포스트텐션 콘크리트 교량의 건설을 금지했으며, 일본의 경우도 일본 도로공사(Japan Highway Public Corporation, JH)에서 횡방향 긴장을 위해 주로 사용되는 프리스테레싱 강봉의 사용을 금지했고, 다음으로 내부에 그라우트를 채우는 종방향 긴장재의 사용을 금지했다. 최근에는 설계에 내구성과 경제성을 고려하여 이들 규정이 폐지되거나 수정되었다.

4. 기존 교량의 시간의존적 거동

콘크리트의 시간의존적 거동을 예측하기 위한 이론적 모델에 관한 연구는 지난 수십 년간 광범위하게 수행되어 왔지만, 정작 이들 모델을 사용하여 실제 교량의 장기거동을 예측하고 측정된 변형과의 비교를 통해 예측의 정확성을 검증하는 연구는 극히 드물었다. 이는 소형 실험체에 대한 수축 및 크리프 실험결과에 비해 실제 구조

물에서 측정되는 장기변형의 예측결과가 매우 제한적이기 때문일 것이다.

Table 2는 중앙에 힌지를 갖는 실제 프리스트레스트 콘크리트 교량에서 측정된 장기처짐을 나타낸 것으로, 일본 내에서 구할 수 있는 모든 실측치이다. 놀랍게도, 모든 교량에서 설계시 예측되었던 처짐에 비해 매우 큰 처짐을 보이고 있다. 건설된 지 20년 이상이 지난 교량들은 예측값에 대한 실측값의 비가 3.83에서 4.28로 나타났다. Table 2에서 괄호 안의 예측값은 설계시 예상하지 못했던 추가 변형을 포함한 것으로, 예측값에 대한 실측값의 실제비는 표에서 제시된 것보다 클 것으로 예상된다. 다른 나라에서도 교량의 과도한 장기변형에 대한 실측 사례가 보고되고 있다.

Fig. 10은 Tsukiyono 교량의 종단면도를 나타낸 것이다. Tsukiyono 교량은 20년 이상 연속적으로 처짐을 관측해 온 유일한 교량으로 측정결과가 일반에 공개된 바 있다. 처짐 측정은 대략 1년에 한번 이루어졌다. 처짐뿐만 아니라 콘크리트의 크리프 및 수축거동을 평가하기 위해 콘크리트의 변형률도 측정되었다. 1982년 이 교량이 건설되었으며, 현재까지 26년 동안 측정

Table 2 일본 내 여러 교량에서 측정된 거더의 변위 및 해석결과 요약

Bridge name	Completed year	Max. span length (m)	(a) Predicted deflection (mm)	(b) Measured deflection (mm)	(b)/(a)	Age at measure (year)	Remarks
Kyobashi (Kobe)	1966	70.0	(71, 60, 35) *	131, 118, 73	(1.84, 1.96, 2.08) *	22	
Mikanagi (Osaka)	1972	47.5	28	130	4.64	11	
Hontanigawa (Nagano)	1972	72.0	(130) *	280	(2.15) *	30	
Jinnzugawa (Toyama)	1975	81.6	(67) *	170	(2.53) *	26	ASR**
Kitsureuriha (Osaka)	1979	65.0	(85) *	321	(3.75) *	23	ASR**
Unknown	1979	63.0	70	300	4.28	24	ASR**
Tsukiyono (Gunma)	1982	84.5	35	134, 147	3.83, 4.20	26	

* () includes unexpected deflections likely to occur during service life.

** ASR means the possibility of influence of Alkali Silica Reaction.

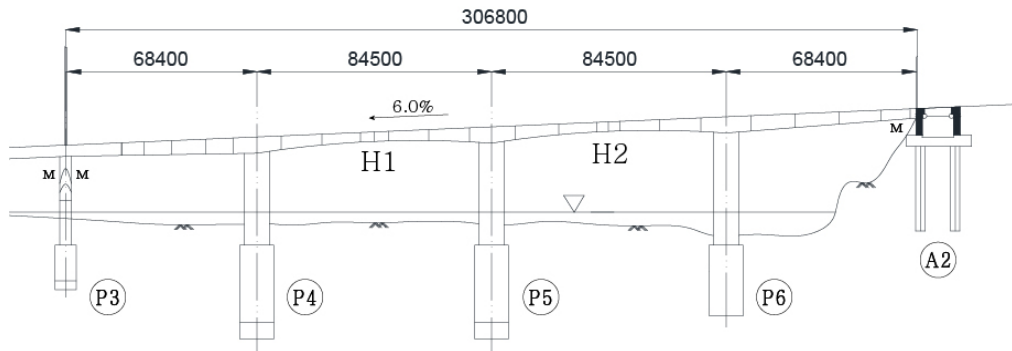


Fig. 10 Tsukiyono 교량의 종단면도

되었다. 설계 당시 장기처짐은 다음과 같은 가정 하에 계산되었다.

- 콘크리트의 압축강도 : 40MPa
- 탄성계수 : 35,000 MPa
- 상대습도 : 70%
- 부피-표면적 비 : 400mm
- 크리프 계수(SHB1978) : 1.58
- 건조수축변형률: 185×10^{-6}

예측된 처짐과 측정된 처짐을 Fig. 11에 비교 하여 나타내었다. 보다 자세한 내용은 참고문헌에서 찾아 볼 수 있다.

PC 박스 거더 교량의 장기처짐 예측의 경우, 상부와 하부 플랜지의 부등(differential) 변형률의 영향이 매우 클 수 있으므로 반드시 고려되어야 한다. Kristek과 Bazant의 연구에서도 건조수축 발현 속도는 대략적으로 콘크리트 두께의 제곱근의 역수에 비례하는 것으로 언급하고

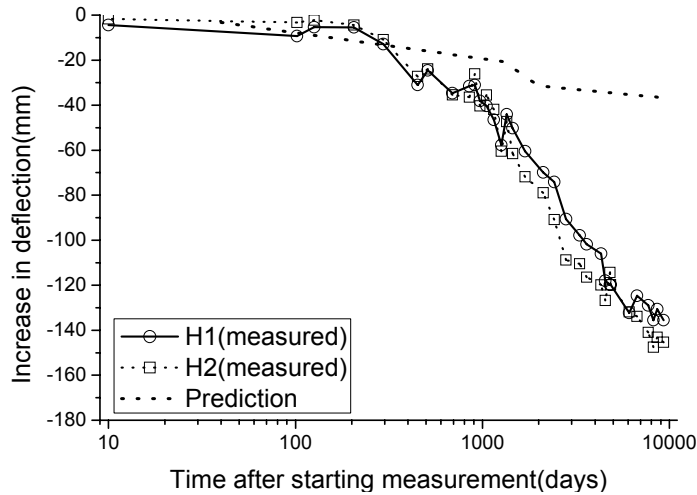


Fig. 11 Tsukiyono 교량의 거더 중심부에서 측정된 변위와 장기거동 해석결과

있다. 더 나아가, Tsukiyono 교량의 변형률 측정결과는 응력수준에 따라 크리프계수가 다르다는 것을 보여주고 있다. 교량의 상부 플랜지, 웹 중심부, 하부 플랜지에서 완공 후 10년 시점에 측정된 크리프계수는 각각 1.35, 2.00, 2.65였다. 크리프와 건조수축이 콘크리트 단면 내에서 일정하지 않다는 것은 예측된 장기변형이 실제와 매우 큰 차이를 나타내는 원인 중 하나일 것이다. 따라서 PC 박스 거더 교량의 장기처짐을 보다 정확히 예측하기 위해서는 단면 내에서 균일하지 않은 크리프 및 수축을 고려해야 한다.

5. 미래의 연구 방향

5.1 수축

5.1.1 고강도 콘크리트의 수축

최근 55MPa 이상의 강도를 갖는 고강도 콘크리트의 사용이 보편화되고 있다. 고강도 콘크리트의 시간의존적 거동을 파악하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 어느 정도 정확성을 확보

한 예측이 가능하다. 하지만, 고강도 콘크리트의 높은 자기수축과 높은 철근비는 균열발생가능성을 높일 수 있으며, 이들 문제를 고려한 적절한 설계방법이 구축될 필요가 있다.

5.1.2 다양한 종류의 골재가 수축에 미치는 영향
최근 일본 내에는 좋은 품질의 골재가 고갈되어가고 있는 실정이다. 골재의 품질은 천차만별이며, 어떤 지역에서는 1000×10^{-6} 정도로 높은 수축특성을 갖는 골재도 있다. 콘크리트의 수축은 실험결과에 기초한 골재의 품질을 고려하여 결정해야 하지만, 설계자가 이러한 정보를 얻기는 매우 힘든 일이다. 이러한 골재의 다양성을 설계에 고려하는 방안이 매우 필요한 실정이다. 그러나 수축을 설계하중으로 고려하는 어떠한 개념과 방법도 정립되어 있지 않다. 특히 부정정 차수가 높은 구조물의 경우, 수축변형의 구속에 의해 발생하는 하중 및 응력이 구조물의 거동에 매우 중요한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 과도한 수축을 나타내는 골재가 실제 사용될 수도 있다는 것이 설계과정에 고려되어야 한다.

5.2 처짐

5.2.1 PC 박스 거더 교량의 장기 처짐 예측
4장에서 언급했듯이, 20년 이상 사용된 교량의 경우 예측값보다 훨씬 큰 장기처짐을 나타내고 있다. 이러한 과도한 변형의 원인에 대해 몇몇 연구자들은 알칼리 골재 반응, 설계기준보다 낮은 탄성계수, 활하중의 증가 등 여러 가지 요인의 결합에 기인한 것으로 주장하고 있지만 아직까지 명확히 파악되고 있지 않다. 또한 거더 단면 내 위치에 따라 동일하지 않게 발생하는 크리프 및 수축도 원인 중 하나일 수 있다. 이와 관련된 연구는 아직까지 매우 미미한 수준이며 보다 많은 연구가 수행되어야 할 것이다. 이와 더불어, 실제 교량에서 측정된 장기변형에 관한 데이터가 일반 연구자에게 공개되어야 할 것이다.

5.2.2 새로운 재료가 사용된 교량의 장기 처짐 예측

80MPa 이상의 압축강도를 갖는 초고강도 콘크리트와 같은 새로운 재료가 최근 개발되고 있으며, 실제 교량에 적용되고 있다. 이러한 재료는 거더 단면을 감소시키고 경간장을 보다 길게 할 수 있게 한다. 그러나 높은 강도를 나타내는 것이 이와 비례하는 높은 탄성계수를 갖는다는 것을 의미하지는 않으며, 초고강도 콘크리트의 경우 탄성거동에 비해 크리프와 같은 장기거동에 대해서는 아직까지 명확히 파악되지 못하고 있다. 이러한 새로운 재료가 장대교량에 사용된다면, 구조물의 거동을 정확히 예측할 수 있는 방법이 제시되어야 할 것이다.

5.3 내구성

5.3.1 내구성에 대한 균열의 영향

SSC2007에는 염소이온 침투에 대해 균열폭

과 내구성 사이의 관계가 명확히 제시되어 있고, 균열폭 산정에 있어 크리프 및 건조수축의 영향을 고려하고 있다. 그러나 크리프 및 건조수축에 따른 영향은 아직까지 명확하지 않으며, 구조물의 내구성을 평가하는 데 있어 균열폭 산정식의 정확성 및 적용성을 재검토할 필요가 있다.

5.3.2 100년 수명 구조물의 소오 콘크리트 덮개
3.2절에서 논의된 바와 같이, SSC2007에 따라 계산되는 50년 수명의 구조물에 요구되는 콘크리트 덮개는 SHB2002의 콘크리트 덮개 규정에 비해 매우 크다. SSC의 규정이 이론적 근거에 의해 제시되었고 염소이온 침투에 따른 고속도로 교량의 열화에 대한 보고가 있음에도, 일본 도로협회는 설계기준을 개정하는 데 망설이고 있는 것처럼 보인다.

최근, 100년 수명의 구조물을 설계하는 것이 일반화되어가고 있다. 이런 경우, SSC와 SHB의 콘크리트 덮개에 관한 차이는 더욱 더 커지게 된다. 현재 해안에 건설되고 있는 한 철도교가 이러한 불합리성의 좋은 예이다. 이 교량은 SSC에 따라 설계되었으며, 소오 콘크리트 덮개는 200mm였다. 하지만, 이러한 과도한 콘크리트 덮개로 인해 전례가 없는 문제가 시공 중 발생하였다. 우선 시공 자체가 쉽지 않고, 철근으로 보강되지 않은 매우 두꺼운 콘크리트 덮개에 균열이 발생한 것이다. 앞으로 내구성, 경제성, 시공성을 모두 고려하여 소오 콘크리트 덮개를 결정할 수 있는 새로운 방법에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P. and Baweja, S., "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3", Structural Engineering Report94-10/603c:

- Northwestern University. Published as Draft RILEM Recommendation in Materials and Structures(RILEM Paris), vol. 28, 1995, pp.357-365, pp.415-430, pp.488-495.
2. Hata, Y. and Hirooka, M., "Long-Term Measurement of Tsukiyono Bridge Superstructure", Journal of Prestressed Concrete, vol. 27, No. 1, 1985, pp.39-47. (in Japanese)
 3. Hata, Y. et al., "Creep Behavior of Prestressed Concrete Bridge over Ten Years", Proceedings of FIP Symposium '93, Kyoto, Japan, Oct. 17-20, 1993, pp.305-310.
 4. Hida, K. et al., "Presumption of Prestress and Cause of Large Displacement in Center Hinge PC Box Girder by Released Stress Method", Collected Papers on Civil Engineering Structures and Materials 21, 2005. (in Japanese)
 5. Itoh, K. et al., "Improvement of Drivability by Connecting the Center Hinge", EXTEC No. 69, vol. 18, No. 1, 2004, pp.32-37. (in Japanese)
 6. JSCE Concrete Committee, "Interim Report of Deterioration Countermeasure ad Hoc Committee for Tarui Viaduct", Tokyo: Japanese Society of Civil Engineers(JSCE), 1995. (in Japanese)
 7. Kristek, V. et al., "Box Girder Bridge Deflection-Why is the Initial Trend Deceptive?", Concrete International, vol. 28, No. 1, 2006, pp.55-63.
 8. Sakai, K., "Rehabilitation of Mikanagi Bridge", Bridge and Foundation Engineering, vol. 17, No. 8, 1983, pp.86-89. (in Japanese)
 9. Sakamoto, K. et al., "Soundness Evaluation and Retrofit Plan of Jinzugawa Bridge", Bridge and Foundation Engineering, vol. 37, No. 4, 2003, pp.27-31. (in Japanese)
 10. Suzuki, T. et al., "Retrofit Design and Construction of Kitsureiha Bridge", Journal of Prestressed Concrete, vol. 46, No. 5, 2004, pp.45-53. (in Japanese)
 11. Witthukreangkrai, E. et al., "Long-Term Deflection Monitoring of a Cantilever Prestressed Concrete Bridge with Intermediate Hinges over 25 Years", Proceedings of 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures(CONCREEP8), Ise-Shima, Japan, 2008, pp.639-645.
 12. Yamamoto, T. et al., "Rehabilitation of Kyobasi Bridge", Journal of Prestressed Concrete, vol. 31, No. 6, 1989, pp.31-39. (in Japanese)

담당 편집위원: 권승희
(명지대 토목환경공학과 부교수)
kwon08@mju.ac.kr