

## 현장타설 말뚝의 수중부 콘크리트 강도에 대한 고찰 Study on Compressive Strength of Cast-in-situ Concrete Pile

심재원<sup>1)</sup>, Jae-Won Shim, 전경수<sup>2)</sup>, Kyung-Soo Jeon, 김낙영<sup>3)</sup>, Nag-Young Kim, 박찬민<sup>4)</sup>, Chan-Min Park

<sup>1)</sup> 한국도로공사 도로교통연구원, 책임연구원, Chief Researcher, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation

<sup>2)</sup> 한국도로공사 초장대교량사업단, 사무국장, Chief Research Administrator, Super Long Span Bridge Research Center, Korea Expressway Corporation

<sup>3)</sup> 한국도로공사 도로교통연구원, 수석연구원, Research Director, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation

<sup>4)</sup> 한국도로공사 도로교통연구원, 연구위원, Senior Research Director, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation

**SYNOPSIS** : Due to the uneasy controllable qualities of the substructures such as pile and foundation, which are laid on underground, geotechnical engineers have applied conservative criteria to them. Therefore, the specification criterion of cast-in-situ concrete pile, which allows only one fourth of the compressive strength of structural capacity, has forced geotechnical designers to consider the most uneconomical design regardless of satisfying the grade of quality-control, required performance, construction cost and so on. Thus, in this study, we proposed the less conservative criteria on the strength of concrete pile, based on the experimental testing results of cast-in-situ concrete piles.

**Keywords** : cast-in-situ concrete pile, underwater, geotechnical criteria, substructure

### 1. 서론

시공시의 소음·진동 등을 적게 하기 위해 현장타설 철근 콘크리트 말뚝의 사용이 점차 증가하고 있으며, 구조물이 대형화되고 연약지반에 시공되는 경우가 많아짐에 따라 대구경의 긴 말뚝 사용이 증가하게 되었다. 이러한 현장타설 철근 콘크리트 말뚝 공사에 있어서는 지중에 구멍을 뚫은 후 이 구멍 안에 들어 있는 안정액 속에 철근을 삽입하는 동시에, 트레미관(tremie pipe)을 삽입하여 안정액과 대체하면서 콘크리트를 타설하고, 지중에 철근 콘크리트 말뚝을 시공하게 된다. 이와 같은 현장타설 철근 콘크리트 말뚝은 지반에 묻히기 때문에 손상을 발견하기 어렵고, 품질관리도 용이하지 않아 지반분야 전문 기준에서도 매우 엄격한 강도규정을 적용하여 왔다.

이와 같은 이유로 콘크리트말뚝이 현장에서 타설되는 경우도 콘크리트의 압축강도를 1/4만 인정하거나 콘크리트 설계기준강도의 대소에 관계없이 특정 값을 초과하지 못하도록 규정하고 있어 교량하부구조가 과다하게 설계되거나 비용적인 측면에서도 비효율적으로 시공되는 측면이 없지 않다.

따라서, 본 고에서는 실제 수중부에 콘크리트 말뚝을 시공한 경우의 현장채취 시편에 대한 실험결과와 콘크리트 분야에서 인정하고 있는 규정 값을 근거로 현재 현장타설 콘크리트 말뚝에 적용되고 있는 엄격한 강도기준의 완화의 필요성을 제안하고자 한다.

## 2. 현장타설 콘크리트 말뚝에 대한 규정

### 2.1 수중콘크리트의 강도

수중 콘크리트는 수중 또는 안정액 중에 타설되므로 타설 방법에 따라 강도에 큰 영향을 받게 된다. 일반 수중 콘크리트에 있어서, 트레미를 사용한 수중 콘크리트의 코어 공시체 압축강도는 수중에 타설되는 과정에서 주변의 물에 의한 씻김작용으로 인해 강도저하가 발생하여 동일 배합의 공기중 시공시 압축강도의 0.6배 정도로 나타나기도 한다.



(a)

(b)

그림 1. 현장타설말뚝 시공을 위해 굴착한 굴착공 전경(a)와 surging 장면(b)

한국 콘크리트학회에서는 이와 같은 이유로 「수중 콘크리트의 강도를 공기 중에서 시공하는 콘크리트의 경우보다 배합강도를 높이던지 혹은 설계기준강도를 작게 하는 것이 바람직하며, 대부분의 경우 일반 수중 콘크리트에 있어서 수중 시공 시의 강도는 기중 시공 시의 0.6~0.8배 정도이므로 그 비율을 고려하여 배합강도를 설정한다 (특히, 현장타설 말뚝에 사용하는 수중 콘크리트에서는 수중 시공 시의 강도를 기중 시공시 강도의 0.8배 정도, 안정액 중에서의 시공시 강도를 기중 시공시의 0.7배 정도로 하여 배합강도를 설정한다)」고 권고하고 있다.

### 2.2 현장타설 콘크리트 말뚝의 허용압축응력 규정

1996년 건설교통부에서 제정한 『도로교표준시방서』에서는 「수중에서 시공하는 철근콘크리트 부재 중에서 현장타설 콘크리트 말뚝의 콘크리트 허용응력은 표1의 값으로 하고, 콘크리트의 배합시 단위 시멘트량을  $350\text{kg}/\text{m}^3$  이상, 물-시멘트비 55% 이하, 슬럼프 15~21cm를 원칙으로 한다」고 규정하고 있다. 이것은 동일배합의 콘크리트에 대하여 수중콘크리트 강도는 공기 중 콘크리트 강도에 비하여 일반적으로 변동이 크고 또 평균 강도도 떨어진다는 점을 고려해서 표준양생한 공시체의 압축강도와 실제로 시공한 현장타설 콘크리트 말뚝의 압축강도와의 관계를 바탕으로 수중콘크리트의 설계기준강도 및 허용값을 정한 것이다.

AASHTO(2002)와 일본 도로교시방서(2002)에서 추천하고 있는 허용압축응력의 최대값은 표2~3과 같다. 일본은 지진의 영향으로 휨 압축응력과 전단응력에 대해서 우리 규정보다 보수적으로, 축 압축응력에 대해서는 다소 경제적으로 규정한 차이는 보이지만 국내와 유사하고, 미국은 강도설계법에 기초하여 최대허용하중을 규정한 것이 허용응력설계법을 쓰고 있는 국내실정과 비교하여 주목할 만하다.

표 1. 수중시공 현장타설 말뚝의 콘크리트 허용응력(MPa), 국내

콘크리트의 호칭강도		30	35	40
수중 콘크리트의 설계기준 강도		24	27	30
압축응력	휨 압축응력	9.6	10.8	12
	축 압축응력	6.0	6.8	7.5
전단응력	콘크리트만으로 전단응력부담	0.39	0.41	0.43
	전단철근과 함께 부담	1.8	1.9	2.0

표 2. 수중시공 현장타설 말뚝의 콘크리트 허용응력(MPa), 일본

콘크리트 공칭강도		30	36	40
수중콘크리트 설계기준강도( $\sigma_{ck}$ )		24	27	30
압축응력	휨압축응력	8.0	9.0	10.0
	축압축응력	6.5	7.5	8.5
전단응력	콘크리트만 전단응력 부담( $\tau_{a1}$ )	0.23	0.24	0.25
	사인장철근과 공동부담( $\tau_{a2}$ )	1.7	1.8	1.9

표 3. 수중에서 시공하는 현장타설 말뚝의 최대허용압축응력 (AASHTO, 2002)

말뚝부재	최대허용하중	비고
나선철근 말뚝	$\Phi P_n = 0.85\Phi[0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\Phi = 0.75</math></li> <li>• <math>f'_c</math> = 콘크리트 압축응력</li> <li>• <math>A_g</math> = 기둥의 총 단면적</li> <li>• <math>A_{st}</math> = 축방향 철근 단면적</li> </ul>
띠철근 말뚝	$\Phi P_n = 0.80\Phi[0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$	$\Phi = 0.70$

사단법인 한국지반공학회에서 만든 『구조물 기초설계기준 해설(2003)』의 「현장타설 콘크리트말뚝」 편에서는 현장타설 콘크리트말뚝 재료의 허용하중은 콘크리트부위와 보강철근부위로 구분하여 두 부분의 허용하중을 각각 산정한 다음 이 두 값을 합하여 결정한다고 규정하고 있다.

그러나, 콘크리트부위에 대한 내용에는 「지하수가 없는 건조한 상태에서 정밀한 품질관리를 실시하여 콘크리트를 타설하는 경우에는 기성콘크리트말뚝에서와 같이 콘크리트 압축강도의 최대 25%까지를 장기 허용압축응력( $0.25\sigma_{ck}$ )으로 하며 그 값이 6MPa를 초과하지 않도록 한다. 콘크리트 타설 조건상 지하수가 존재하는 상태에서 정밀한 품질관리를 실시하여 콘크리트를 타설하는 경우에는 콘크리트 압축강도의 최대 20%까지를 장기 허용압축응력으로 하며 그 값이 5MPa를 초과하지 않도록 한다」 고 규정하고 있었으나 이로 인한 현장타설말뚝의 부재력 제한으로 인하여 지지력 확보가 매우 곤란한 상황이 빈번히 발생하고 있었다. 더욱이 최근 고강도 콘크리트 기술의 발달과 품질관리 기술의 향상을 감안한다면 이러한 기준은 다소 상향 조정되어야 할 것으로 보인다.

이와 같은 취지로 2008년 대한토목학회에서 제정한 『도로교설계기준 해설』에서는 최근 대형기초가 많이 사용됨에 따라 대형기초의 지지력이 부재의 허용하중에 의하여 제한되지 않도록 하기 위하여 콘크리트의 장기허용응력을 콘크리트 공칭강도의 21%(즉  $0.21\sigma_{ck}$ )까지 사용할 수 있도록 상향하였는데 보다 경제적인 시공을 위해서는 관련 연구와 검토를 통한 추가 상향조정이 필요할 것으로 판단된다.

### 3. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서는 현장타설 콘크리트 말뚝의 실제상황을 확인하기 위하여 두 곳의 현장시공 데이터(금강대교·서해대교)를 수집하였고, 2008년 인천 당하동에 현장타설 콘크리트 말뚝을 시공하여 기중 및 수중 콘크리트의 강도특성을 직접 확인하고자 하였다.

### 3.1 사용재료

금강대교 현장타설 말뚝에는 각각 25mm 쇠석골재, 공주사 및 비중 3.14인 H사의 보통포틀랜드 시멘트가 사용되었고, 서해대교에는 19mm 쇠석골재, 삼교호사와 비중 3.14인 H사의 5종(내황상염) 시멘트가 사용되었다. 또한, 실험실 조건의 공시체와 현장타설 말뚝에서 채취한 코아 공시체의 비교를 위해 시험시공이 실시되었던 인천 당하동의 현장타설 말뚝에 사용된 골재는 25mm 쇠석골재와 S사에서 구매한 세척사가 사용되었으며 시멘트는 비중 3.15인 S사의 보통포틀랜드 시멘트가 사용되었다 (표4).

표 4. 금강대교 및 서해대교 현장타설 말뚝 사용재료 물성

	비중	흡수율	조립율	#200체 통과량	안정성	염화물함량	알칼리 골재반응	비고
조골재	2.637	0.46%	-	0.26	4.4%	-	양호	금강대교
	2.59	1.0%	-	0.01	5%	-	양호	서해대교
	2.63	-	6.61	-	5%	-	-	인천
모래	2.621	0.64%	2.95	1.7%	2.1%	-	-	금강대교
	2.606	0.94%	2.88	1.1%	3.2%	0.003%	-	서해대교
	2.59	-	2.85	1.4%	3.2%	0.04%이하	-	인천

### 3.2 실험방법

현장타설 콘크리트 말뚝의 강도 (28일 압축강도,  $f'_c$ )는 금강대교 27MPa, 서해대교 35MPa 및 인천 45MPa를 목표로 표5와 같이 설계되었다. 시험에 사용된 현장타설 말뚝의 배합은 점성의 영향이 적도록 w/c 55% 이하, 단위시멘트량 300kg/m<sup>3</sup> 이상이 되도록 설정하였고, 잔골재율은 쇠석을 사용하였으므로 43% 이상이 되도록 조정하였다.

표 5. 시험시공 위치별 현장타설 콘크리트 말뚝 배합비

$f'_c-G$ (MPa)	시멘트 종별	W/B (%)	S/A (%)	단위 재료량(kg/m <sup>3</sup> )					Air (%)	혼화제	비고
				W	B		S	G			
					C	FA					
27-25	1종	46	43	174	376	-	733	999	3-5	AE감수제	금강대교
35-19	5종	36	43	164	457	-	742	982	3-5	AE감수제	서해대교
45-25	1종	28	46	158	450	56	757	897	3-5	1.1%B	인천

현장타설 콘크리트 말뚝의 강도특성을 파악하고자 금강대교와 서해대교에서는 기 시공한 재령 28일의 말뚝에서 중심을 보오링하여 NX 샘플러로 채취한  $\phi 5.4$ cm 코아 공시체에 대해 KS2422의 규정에 따라 시험을 실시했고, 인천 당하동 시험시공에서는 말뚝 타설시 별도로 제작하여 표준양생한  $\phi 10 \times 20$ cm 공시체와 재령 28일의 해당 말뚝에서 상기와 마찬가지로 NX 샘플러로 채취한 코아 공시체를 준비하여 표준형 공시체에 대해서는 말뚝의 관리를 위해 14일과 28일 재령에서 KS F2405에 따르고, 코아 공시체에 대해서는 KS2422에 따라 시험을 실시하였다. 하중재하는 코아 공시체와 표준 공시체에 동일하게 하중가력속도 0.6MPa/sec로 파괴시까지 선형으로 증가시켰다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

금강대교와 서해대교의 시험시공에서는 기중과 수중의 콘크리트 강도를 비교할 수 있는 데이터를 수집하지 못해 목표강도와 실제강도의 비교 값만을 표6에 수록하였다. 시멘트량이 상대적으로 적었던 금강대교의 수중부 콘크리트는 목표강도의 95% 수준으로 나타났지만, 부배합으로 배합설계된 서해대교의 경우는 오히려 22%나 목표강도를 상회하는 것으로 나타났다. 이 결과로 볼 때 현행 목표강도의 25%만을 인정하는 부분의 상황은 조심스럽지만 목표강도 수준과 관계없이 6MPa이나 5MPa로 허용강도를 묶는 부분은 수정이 필요한 것으로 판단된다.

참고로 금강대교와 서해대교의 현장타설 콘크리트 말뚝에는 재하실험을 실시하지 않은 상태에서 코어 공시체를 채취하였다.

표 6. 금강대교 및 서해대교 현장타설 말뚝 코아 콘크리트 공시체 실험결과 (MPa)

구분	금강대교 (%)		서해대교 (%)		비 고
	압축강도	탄성계수	압축강도	탄성계수	
목표강도	27.0	-	35.0	-	※ 인천 당하동 시공과는 달리 수평 재하실험을 실시하지 않았음
코아강도	<b>25.7 (95)</b>	1.67×10 <sup>4</sup>	<b>42.8 (122)</b>	2.29×10 <sup>4</sup>	

표 7. 인천 현장타설 말뚝 콘크리트 공시체 실험결과 (MPa)

구분	표준공시체 강도				구분
	계	1	2	3	
재령 14일	<b>40.2</b>	43.0	37.2	40.3	총 9개 공시체 사용
재령 28일	<b>46.9</b>	47.6	46.1	47.0	총 18개 공시체 사용

표7은 시험시공 시 타설된 말뚝별로 9개씩 제작된 표준공시체(Ø10×20cm)에 대해 실시된 품질관리시험 결과를 정리한 것이다. 28일 재령에서 평균 46.9MPa을 발현하여 45MPa을 목표로 하였던 당초의 품질관리 수준을 만족하는 것으로 판단되므로 수중에서 시공된 콘크리트 말뚝에서 채취된 코어 공시체의 기준 데이터로 활용이 가능한 것으로 판단된다.

표 8. 인천 현장타설 말뚝 콘크리트 코아 공시체 실험결과(MPa)

구분	관리강도	코아 공시체 강도(MPa)		구분
		#1 (%)	#2 (%)	
재령 28일	46.9	<b>23.0 (49)</b>	<b>19.7 (42)</b>	1.0~ 6.5m
		<b>27.1 (58)</b>	-	6.5~12.5m
		<b>37.4 (80)</b>	<b>32.5 (69)</b>	12.5~18.0m

재령 28일의 말뚝에서 중심을 보오링하여 NX 샘플러로 채취한  $\phi 5.4\text{cm}$  코아 공시체의 강도시험결과를 표8에 정리하였다. 해당 말뚝(#1 또는 #2 말뚝) 모두 수평재하실험을 수행하여 말뚝에 소정의 손상이 가해진 후 채취한 코아 공시체임에도 수평재하실험이 실시되었던 상단부가 목료강도의 40~50%만을 발현할 뿐, 말뚝 선단부는 약 70~80% 수준까지 강도발현을 보이는 것을 알 수 있었다. 이 결과로 판단해 볼 때, 앞서 언급한 것처럼 고강도 콘크리트 기술이 발전을 고려하지 않고 허용응력 규정을 특정 값으로 제한하는 것은 경제적으로나 효율적으로나 모두 불합리한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

최근 현장타설 콘크리트 말뚝의 사용이 빈번해 지면서 수중부에서의 콘크리트 공사품질에 대해 많은 관심을 갖게 되었다. 또한, 현장타설 말뚝을 설계·시공하는 많은 기술자들은 상대적으로 지나치게 보수적인 설계규정의 불합리성을 지적하며, 설계단면의 과도한 확대와 이로 인해 수반되는 비용의 증가 및 단면설계의 제약 등을 들어 허용응력규정의 상향조정까지도 거론하고 있다.

단순히 몇 개 현장에서 얻은 시험결과 값만으로 해당 규정의 불합리성을 지적할 수는 없지만, 국내의 시공 및 설계 기술력의 발달을 무시하고 과거 선진국에 비해 낙후되어 있던 설계 및 시공기술에 맞춰 제정된 보수적 규정과 설계법 (허용응력설계법 등)을 고집하는 것은 기술자의 올바른 자세는 아니라고 판단된다. 또한, 시공 장비 등에 대해서도 해외에서 개발된 고가의 장비를 그대로 받아들여 사용할 것이 아니라 국내 기술에 대한 신뢰를 토대로 국내 장비기술력을 인정하는 것도 잊지 않아야 한다.

국내 기초분야는 향후 개발하여야 할 분야가 매우 넓으며, 이의 개발을 위해서는 재료, 설계, 시공 등 각 분야의 인력과 인접 학문의 공조를 통해야만 유용한 결과가 도출될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(1996), “도로교표준시방서”, pp.561~562.
2. 건설교통부(2003), “구조물 기초설계기준 해설”, (사)한국지반공학회, pp.280~282.
3. 대한토목학회 외(2008), “도로교설계기준 해설”, pp.844.
4. 전경수(2000), “풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 연직 및 횡방향 지지거동 분석”, 서울대학교 대학원, pp.1~97.
5. 최홍식, 허권, 양은익(2001), “수중 콘크리트의 시공”, 콘크리트학회지, 제 13권, 제2호, pp.18~22.
6. 한국도로공사(2009), “고속도로공사 전문시방서”.
7. 한국콘크리트학회(2004), “특수콘크리트공학”.