
수중 불분리성 콘크리트의 부착 강도 특성에 관한 연구

Bond Strength Properties of Antiwashout Underwater Concrete



김 명 식*

Kim, Myung-Sik



김 기 동**

Kim, Gi-Dong



윤 재 범**

Yoon, Jae-Bum

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the bond strength properties of antiwashout underwater concrete. The arrangement of bars (vertical bar, horizontal upper bar, horizontal lower bar), condition of casting and curing (fresh water, sea water), type of fine aggregate (river sand, blended sand(river sand : sea sand = 1 : 1), and proportioning strength of concrete (210, 240, 270, 300, 330kgf/cm²) are chosen as the experimental parameters.

The test results(ultimate bond stress) are compared with bond and development provisions of the ACI Building Code(ACI 318-89) and proposed equations from previous research(which was proposed by Orangun et. al).

The experimental results show that ultimate bond stress of antiwashout underwater concrete which arranged bar on the horizontal lower, used the blend sand, and was cast and cured in the fresh water are higher than other conditions. The ultimate bond stress were increased in proportion to $(\sqrt{f_{cu}})^{3/2}$. From this study, rational analytic formula for the ultimate bond stress are to be from compressive strength of concrete.

Keywords : antiwashout underwater concrete, ultimate bond stress, arrangement bar, fresh water, sea river sand, blend sand

* 정회원, 부경대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 부경대학교 토목공학과 석사

·본 논문에 대한 토의를 2000년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2000년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

수중콘크리트공사에서는 물의 씻김작용에 의한 재료분리문제와 다짐을 할 수 없으므로 인한 수밀성과 내구성에 대한 신뢰성 확보문제 등이 가장 큰 문제점이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 종래에는 트레미, 밀열림상자 또는 펌프압송법 등의 시공방법의 개선으로 재료분리를 줄이려고 하였으나, 시공방법의 개선만으로는 이러한 문제점을 해결할 수 없었다. 그러나 최근에는 독일에서 개발된 수중불분리성 혼화제를 첨가한 수중불분리성 콘크리트가 개발되어 이러한 문제점을 많이 개선할 수 있게 되었다.^(1~5)

수중불분리성 콘크리트는 수중분리저항성, 셀 프레벨링성, 그리고 충전성 등의 잇점때문에 유럽과 일본을 중심으로 유동성을 고려한 간극충전시공, 재료분리를 고려한 고품질의 수중콘크리트, 수질오염방지를 고려한 시공, 수중에서의 철근콘크리트 구조물, 강관 및 강관의 방식라이닝, 그리고 화재복구, 보수, 보강공법 등에 적용되고 있다.⁽³⁾ 우리나라에서도 1980년대 초반에 기술이 도입되어 최근 몇몇 교량보수공사 등에서 성공을 거둬서 관심이 증가되고 있으나, 아직도 수중불분리성 콘크리트의 실용화를 위한 연구실적은 미비한 실정이다.

철근콘크리트 구조물에서 철근과 콘크리트간의 부착력은 전체 구조물의 안정성 측면에서 매우 중요한(critical) 부분으로서 구조부재의 설계나 해석에서 기본이 된다. 철근콘크리트 구조물에서의 부착력은 콘크리트의 압축 강도, 건조상태, 피복두께, 철근의 직경, 형상, 구속철근의 유무, 매설간격 및 매설위치 등에 따라 크게 영향을 받는다. 보통콘크리트에 대한 철근과의 부착특성에 대해서는 상기한 변수들을 중심으로 많은 연구가 있어 왔지만, 수중불분리성 콘크리트에 대해서는 참고가 될 만한 자료가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 하천사 및 하천사와 해사를 입도조정하여 중량비 1:1로 혼합한 혼합사를 잔골재로 사용하고, 배합강도를 변화시킨 보통콘크리트 및 수중불분리성 콘크리트를 제작하여 굳지않은 콘크리트의 특성을 비교 분석한다. 이때 보통콘크리트의 압축 강도 및 부착 강도측정용

공시체는 대기중에서 제작하여 담수에서 양생하며, 수중불분리성 콘크리트의 공시체는 담수 및 해수중에서 제작하고 양생하여 압축 강도와 부착 강도를 측정해서 경화된 콘크리트의 특성을 비교 분석한다. 이로부터 수중불분리성 콘크리트의 부착특성을 파악하고, 압축 강도와 상관을 이용해 이용하여 부착 강도를 예측할 수 있는 식을 제안하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험개요

2.1 부착 강도 실험계획

일반적으로 부착 강도 실험은 콘크리트와 그 속에 배근된 철근과의 상호작용을 정량적으로 파악하는 수단으로 사용되지만, 국가마다 규준이 상이하며 대상 부재와 사용목적에 따라서 실험방법이 다르다.

따라서 본 연구에서는 하중재하에 따라 매립된 철근의 전 길이에 걸쳐 응력이 일정하다는 가정(uniform bond stress)⁽⁶⁾에 철근의 항복을 피하고, 콘크리트의 부착 강도를 측정하기 위해서 무보강으로 하여 ASTM에서 규정하고 있는 방법⁽⁷⁾을 택하였다. 공시체의 크기는 15×15×15cm 이고, 주요 실험인자로는 철근 배근위치, 제작 및 양생조건, 잔골재의 종류, 그리고 압축 강도로 하여 총 75개의 공시체를 계획하였으며, 각 실험인자를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental factors and levels

Experimental factor	Level
Arrangement of bars	Vertical, horizontal upper, horizontal lower
Condition of casting and curing	Fresh water, Sea water
Fine aggregates	River sand, Blended sand
Proportioning strength (kgf/cm ²)	210, 240, 270, 300, 330

2.2 실험항목

본 연구에서 굳지않은 보통콘크리트에서는 공기량과 슬럼프를 측정하였고, 수중불분리성 콘크리트에서는 수중분리도(현탁액의 pH, 현탁물질량), 공기량, 그리고 슬럼프폴로우를 측정하였으며, 경화된 보통콘크리트와 수중불분리성 콘크리

트에서는 재령 28일의 압축 강도와 부착 강도를 측정하였다. 각 실험항목의 세부사항을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2에서 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 현탁액의 pH, 현탁물질량, 그리고 슬럼프플로우는 대한토목학회에서 규정한 「콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(안)」⁽⁸⁾에 준하여 실시하였다.

Table 2 Experimental items

Concrete		Experimental items	Note
Fresh concrete	Plain concrete	Air content	KS F 2421
		Slump	KS F 2402
	Antiwashout underwater concrete	pH, suspended solid Air content Slump flow	- KS F 2421 -
Hardening concrete		Compressive strength Bond strength	KS F 2405 ASTM C234-91a

2.3 사용재료

본 연구에서 시멘트는 비중이 3.14인 제1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 잔골재로는 하천사와 혼합사(하천사:해사=1:1)를 사용하였다. 또한 굵은골재의 최대치수는 배합강도가 높아질수록 적은 치수의 골재를 사용하는 것이 보통이지만, 골재의 크기가 부착력에 영향을 미치게 되므로^(9,10) 굵은골재 최대치수를 배합강도에 관계없이 25 mm인 쇄석골재를 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

혼화제로는 수중불분리성 혼화제와 유동화제를 사용하였는데, 그 물리적 및 화학적 성질은 Table 4와 같다.

Table 3 Physical properties of aggregates

Aggregate		Specific gravity	Water absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)	F.M.
Fine	River	2.58	1.8	1540	2.66
	Blend	2.58	1.8	1535	2.73
Coarse		2.62	1.16	1583	6.83

일반적으로 교각 등의 수중구조물에 배근되는 철근은 주로 SD30을 많이 사용하고 있고, ASTM에서는 D19를 표준으로 하고 있기 때문에 본 연구에서는 SD30의 D19를 사용하였다.

상기한 재료들을 사용하여 배합계산을 수행한 결과 Table 5와 같은 배합표를 얻을 수 있었다.

Table 4 Physical & chemical properties of admixtures

Admixture	Phase	Specific gravity	pH	Main ingredient
Antiwashout underwater agent (AWA)	White powder	1.07	7.1	Hydroxy ethyl cellulose
Super-plasticizer (SP)	Light-brown liquid	1.23	12.0	High condensate tri-azin

Table 5 Mix proportions of concrete

Plain concrete								
Symbol	f_{cr} (kgf/cm ²)	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)					
			C	S	G			
PR-I	210	50	374	718	1051			
PR-II	240	48	390	712	1043			
PR-III	270	45	416	704	1030			
PR-IV	300	43	436	698	1019			
PR-V	330	40	468	687	1003			
Antiwashout underwater concrete								
Symbol	f_{cr} (kgf/cm ²)	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)					
			C	S		G	Admixtures	
				RS ¹⁾	SS ²⁾			AWA
AR-I	210	53	415	630	-	954	2.2	8.8
AR-II	240	50	440	619	-	943	2.2	8.8
AR-III	270	48	458	617	-	933	2.2	8.8
AR-IV	300	45	489	604	-	917	2.2	8.8
AR-V	330	43	512	596	-	907	2.2	8.8
AB-I	210	53	415	315	315	954	2.2	8.8
AB-II	240	50	440	309	309	943	2.2	8.8
AB-III	270	48	458	307	307	933	2.2	8.8
AB-IV	300	45	489	302	302	917	2.2	8.8
AB-V	330	43	512	298	298	907	2.2	8.8

1) River sand, 2) Sea sand

2.4 공시체 제작 및 양생

2.4.1 압축 강도측정용 공시체

압축 강도측정용 공시체의 제작에는 표준볼드($\phi 10 \times 20$ cm)를 사용하였다. 보통콘크리트는 KS F 2403에 준하여 기중에서 제작하고, 담수에서 28일간 표준양생하였다. 수중불분리성 콘크리트는 담수와 해수에서 대한토목학회규준⁽⁸⁾에

따라 제작하여 각각 담수와 해수에서 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 양생하였다.

2.4.2 부착 강도측정용 공시체

부착 강도측정용 공시체의 제작에는 ASTM⁽⁷⁾에 따른 강제 몰드(수직철근용 : $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$, 수평철근용 : $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}$)를 사용하였다. 보통콘크리트는 KS F 2441에 준하여 제작하여 담수에서 표준양생하였다. 수중불분리성 콘크리트는 Fig. 1과 같이 몰드상단에서 10 cm위까지 담수와 해수를 채운 후, 콘을 이용하여 수면에서 조용히 수중낙하시켜 봉우리 모양이 되도록 한 다음 몰드를 수조에서 꺼내어 5~10분 정도 정치시킨다. 수직철근용 몰드상면은 흠손으로 캡핑할 양만큼 남겨두고 마감한 다음, 캡핑후 탈형강도에 이르렀을 때 탈형하여 각각 담수와 해수에서 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 양생하였다. 특히 수평철근용 공시체는 재령 28일 강도측정시에 $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ 로 분리시킨다.

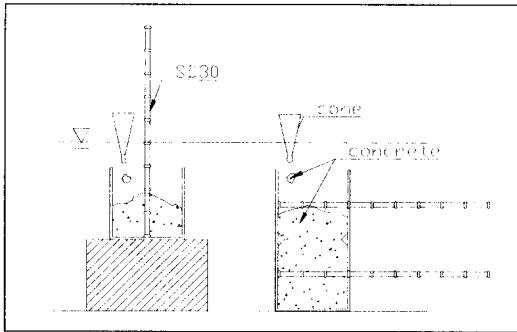


Fig. 1 Schematic of casting the bond test specimens underwater

2.5 부착 강도의 산정

부착 강도를 산정하는 방법에는 크게 인발시험을 통해 직접적으로 산정하는 방법과 기존에 제안되어 있는 식을 통해서 콘크리트의 압축 강도로부터 간접적으로 산정하는 방법이 있다.

인발시험을 통해 직접적으로 부착 강도(μ)를 산정하는 방법은 시험방법에 따라 다소 차이가 나지만, 기본적으로 식 (1)과 같이 하중재하시 철근에 발생하는 응력(f_s)을 중심으로 계산하거나, 재하된 하중(P)를 부착면적으로 나누어 계산

한다.

$$\mu = \frac{A_b f_s}{\Sigma_o L} \quad \text{or} \quad \mu = \frac{P}{\Sigma_o L} \quad (1)$$

(A_b : 철근의 단면적, Σ_o : 철근의 주장, L : 부착길이)

또한 콘크리트의 압축 강도로부터 간접적으로 부착 강도를 산정하는 방법에는 ACI 318-89 12.2. 2의 기본정착길이 산정식⁽¹¹⁾을 치환한 식 (2)^(9,10)와 Orangun 등이 제안한 식 (3)⁽¹⁰⁾ 등 많은 제안식이 있다.

$$\mu_{aci} = 5.91 \times \frac{\sqrt{f_{cu}}}{d_b} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (2)$$

$$\frac{\mu_{cal}}{\sqrt{f_{cu}}} = 0.2652 \times \left[1.2 + \frac{3C}{d_b} + \frac{50d_b}{\ell_d} \right] (\text{kgf/cm}^2) \quad (3)$$

(f_{cu} : 콘크리트 압축 강도, C : 철근피복두께, d_b : 철근직경, ℓ_d : 정착길이)

본 연구에서는 철근의 매립길이에 따라 응력이 일정하다는 가정하에, 철근에 변형계이지를 부착하지 않고 인발시험을 실시하여 재하된 최대하중(P)을 측정하고, 이 최대하중을 식 (1)과 같이 부착면적으로 나누어 부착 강도를 산정하며, 이 부착 강도를 식 (2), 식 (3)의 압축 강도로부터 간접적으로 산정한 부착 강도와 비교·검토를 통하여 수중불분리성 콘크리트의 부착특성을 파악한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

산골재의 종류와 배합강도에 따른 굳지않은 콘크리트의 실험결과를 정리하면 Table 6과 같다. Fig. 2는 수중불분리성 콘크리트의 수중분리저항성을 살펴보기 위해 현탁액의 pH와 현탁물질량을 측정된 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 2에서 pH와 현탁물질량은 물-시멘트비와 산골재의 종류에 관계없이 대한도목학회 규준이

하로 측정되었고, 물-시멘트비가 증가할수록 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며, 그 차이는 상당히 미소하게 나타났다. 또한 잔골재로 하천사만을 사용한 것보다 해사를 혼합한 혼합사를 사용한 것이 pH와 현탁물질량이 더 적게 나타났는데, 이것은 해사를 상용수로 세척할 때 미립자가 많이 유실되어 하천사가 혼합사보다 수중불분리성 혼화제를 더 많이 흡착하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 즉 하천사를 잔골재로 사용한 수중불분리성 콘크리트에서는 시멘트와 흡착되어야 할 수중불분리성 혼화제가 하천사의 미립자에 흡착되었기 때문에 수중불분리성 혼화제 사용량보다 다소 떨어지는 것으로 사료된다.

Table 6 Experimental results of fresh concrete

Symbol	pH	Suspended solid (mg/ℓ)	Slump (flow) (cm)	Air content (%)
PR-I	-	-	12.3	2.7
PR-II	-	-	11.2	2.3
PR-III	-	-	10.7	2.5
PR-IV	-	-	10.1	2.0
PR-V	-	-	9.2	1.8
AR-I	10.98	57.6	58.3	3.3
AR-II	10.90	56.3	57.3	3.1
AR-III	10.73	55.4	56.8	3.0
AR-IV	10.52	55.1	56.3	3.0
AR-V	10.40	53.9	55.3	2.9
AB-I	10.55	53.8	58.5	3.2
AB-II	10.40	53.5	57.3	3.3
AB-III	10.31	51.7	55.5	3.1
AB-IV	10.36	50.3	55.8	3.0
AB-V	10.31	48.7	55.4	2.8

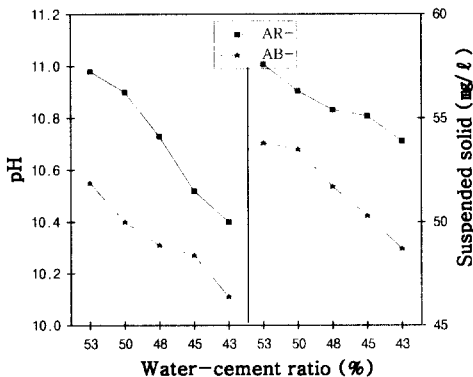


Fig. 2 pH and suspended solids according to w/c

Fig. 3과 Fig. 4는 보통콘크리트와 수중불분리성 콘크리트의 유동특성과 공기량 특성을 파악하기 위해 슬럼프, 슬럼프플로우, 그리고 공기량을 측정된 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 슬럼프, 슬럼프플로우, 그리고 공기량은 보통콘크리트와 수중불분리성 콘크리트 모두 물-시멘트비가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있고, 수중불분리성 콘크리트의 슬럼프플로우와 공기량은 pH와 현탁물질량과는 달리 잔골재의 종류에 관계없이 비슷하게 측정되었다.

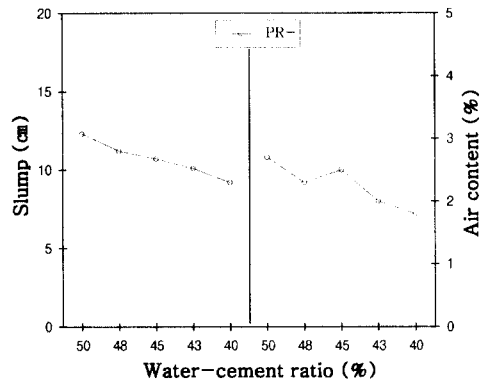


Fig. 3 Slump and air content of the plain concrete according to w/c

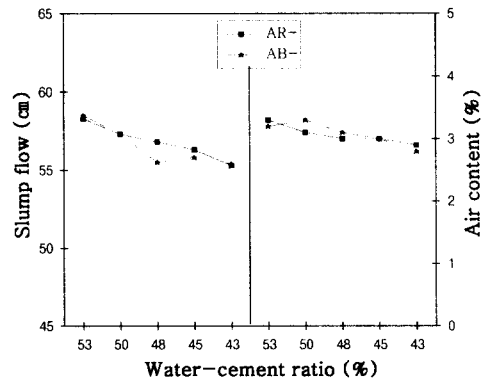


Fig. 4 Slump flow and air content of the antiwashout underwater concrete according to w/c

3.2 부착 강도 특성

철근 배근위치, 제작 및 양생수, 잔골재의 종

류, 그리고 배합강도를 변화시킨 보통콘크리트와 수중불분리성 콘크리트의 실험결과들을 정리하면 Table 7과 같다.

3.2.1 철근 배근위치의 영향

Fig. 5는 철근 배근위치(수직, 수평상단, 수평하단)에 따른 보통콘크리트와 수중불분리성 콘크리트(대표적으로 잔골재는 혼합사, 제작 및 양생 수는 담수)의 부착 강도를 각각의 압축 강도로 나누어 비교한 것이다.

Fig. 5에서 보통콘크리트의 부착 강도는 수직

으로 배근되었을 때가 압축 강도의 34~36%로 가장 높게 나타났고, 수평상단에 배근되었을 때가 압축 강도의 22~25%로 가장 낮게 나타났으며, 수평하단에 배근되었을 때는 압축 강도의 27~29%로 나타났다.

수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 수직으로 배근되었을 때가 압축 강도의 28~32%로 보통콘크리트보다 평균 4%정도 낮게 나타났지만, 수평상단에 배근되었을 때는 압축 강도의 29~33%로 보통콘크리트보다 오히려 평균 7%정도 높게 나타났으며, 수평하단에 배근되었

Table 7 Experimental results of hardening concrete

Symbol	Compressive strength (f_{cu} : kgf/cm ²)	Max. bond strength ²⁾					Max. bond strength ratio					
		μ_v (kgf/cm ²)	μ_u (kgf/cm ²)	μ_l (kgf/cm ²)	μ_{aci} (kgf/cm ²)	μ_{cal} (kgf/cm ²)	$\frac{\mu_v}{\mu_{aci}}$	$\frac{\mu_u}{\mu_{aci}}$	$\frac{\mu_l}{\mu_{aci}}$	$\frac{\mu_v}{\mu_{cal}}$	$\frac{\mu_u}{\mu_{cal}}$	$\frac{\mu_l}{\mu_{cal}}$
PRF ¹⁾ I	218	77	55	61	45.9	70.0	1.68	1.20	1.33	1.10	0.79	0.87
PRFII	249	88	56	69	49.1	74.8	1.79	1.14	1.41	1.18	0.75	0.92
PRFIII	279	96	66	74	52.0	79.2	1.85	1.27	1.42	1.21	0.83	0.93
PRFIV	300	108	69	87	53.9	82.1	2.00	1.28	1.61	1.32	0.84	1.06
PRFV	358	127	89	102	58.9	89.7	2.16	1.51	1.73	1.42	0.99	1.14
ARFI	185	67	66	71	42.3	64.5	1.58	1.56	1.68	1.04	1.02	1.10
ARFII	220	72	74	78	46.1	70.3	1.56	1.60	1.69	1.02	1.05	1.11
ARFIII	252	81	83	85	49.4	75.3	1.64	1.68	1.72	1.08	1.10	1.13
ARFIV	268	85	89	96	50.9	77.6	1.67	1.75	1.89	1.10	1.15	1.24
ARFV	339	94	101	105	57.3	87.3	1.64	1.76	1.83	1.08	1.16	1.20
ARS ¹⁾ I	171	60	60	67	40.7	62.0	1.48	1.48	1.65	0.97	0.97	1.08
ARSII	199	70	73	78	43.9	66.9	1.60	1.66	1.78	1.05	1.09	1.17
ARSIII	242	73	76	81	48.4	73.7	1.51	1.57	1.67	0.99	1.03	1.10
ARSIV	254	82	83	90	49.6	75.6	1.65	1.67	1.82	1.09	1.10	1.19
ARSV	272	89	94	97	51.3	78.2	1.73	1.83	1.89	1.14	1.20	1.24
ABFI	225	73	74	80	46.7	71.1	1.56	1.59	1.71	1.03	1.04	1.13
ABFII	239	77	77	83	48.1	73.3	1.60	1.60	1.73	1.05	1.05	1.13
ABFIII	284	84	86	89	52.4	79.9	1.60	1.64	1.70	1.05	1.08	1.11
ABFIV	316	90	92	99	55.3	84.3	1.63	1.66	1.79	1.07	1.09	1.17
ABFV	325	97	100	105	56.1	85.5	1.73	1.78	1.87	1.14	1.17	1.23
ABSI	186	63	63	66	42.4	64.7	1.49	1.49	1.56	0.97	0.97	1.02
ABSII	195	66	67	70	43.4	66.2	1.54	1.54	1.61	1.00	1.01	1.06
ABSIII	247	76	76	82	48.9	74.5	1.55	1.55	1.68	1.02	1.02	1.10
ABSIV	273	81	83	89	51.4	78.3	1.58	1.61	1.73	1.03	1.06	1.14
ABSV	284	85	87	96	52.4	79.9	1.62	1.66	1.83	1.06	1.09	1.20

1) F : Fresh water, S : Sea water

2) μ_v : Max. bond strength of vertical bar, μ_u : Max. bond strength of horizontal upper bar, μ_l : Max. bond strength of horizontal lower bar, μ_{aci} : Max. bond strength by ACI code, μ_{cal} : Max. bond strength by Orangun et al

을 때는 압축 강도의 31~36%로 가장 높게 나타났다.

보통콘크리트의 경우는 블리딩으로 인해서 수평철근의 하단에 수막이 형성되어 부착력을 저하시키기 때문에 수평으로 배근된 것이 수직으로 배근된 것보다 낮은 부착 강도를 나타낸 것이고, 수중불분리성 콘크리트의 경우 수중불분리성 혼화제의 강한 점성으로 인하여 블리딩이 억제되었기 때문에 오히려 수평으로 배근된 공시체의 부착 강도가 더욱 양호하게 나타났다.

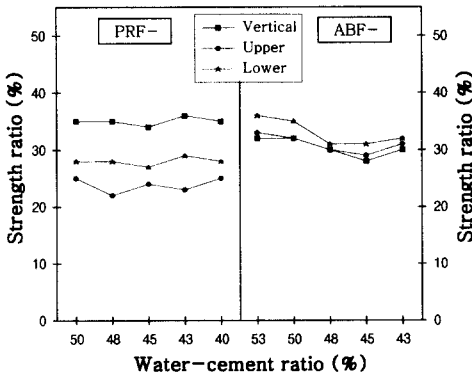


Fig. 5 Strength ratio according to position of arrangement bar (bond strength / compressive strength)

3.2.2 제작 및 양생수의 영향

Fig. 6은 제작 및 양생수에 따른 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도(대표적으로 수직철근)를 나타낸 것이고, Fig. 7은 부착 강도를 압축 강도로 나누어 비교한 것이다.

Fig. 6에서 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 잔골재의 종류에 관계없이 해수에서 제작·양생한 공시체가 담수에서 제작·양생한 공시체보다 4~14 kgf/cm²정도 낮게 나타났는데, 이것은 해수에 포함된 무기질로 인한 삼투작용 때문으로 생각된다.

Fig. 7에서 강도비(부착 강도/압축 강도)는 오히려 해수에서 제작·양생한 것이 높게 나타난 것이 더 많았는데, 이것은 해수내에 포함된 무기질의 영향이 부착 강도보다는 압축 강도에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

따라서 해양공사에서 수중불분리성 콘크리트로 배

합설제를 할 경우에는 담수에서보다 더 높은 할증계수를 적용하여야 할 것으로 생각된다.

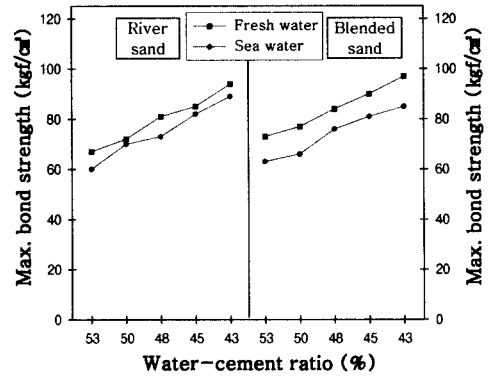


Fig. 6 Max. bond strength according to condition of casting and curing

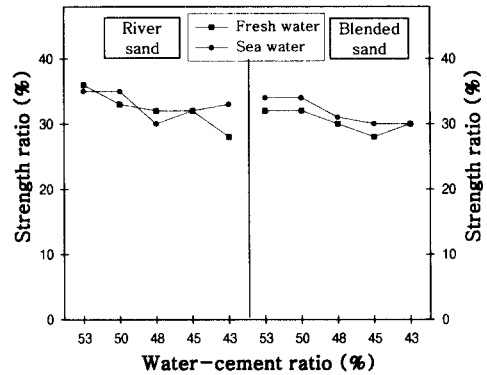


Fig. 7 Strength ratio according to condition of casting and curing

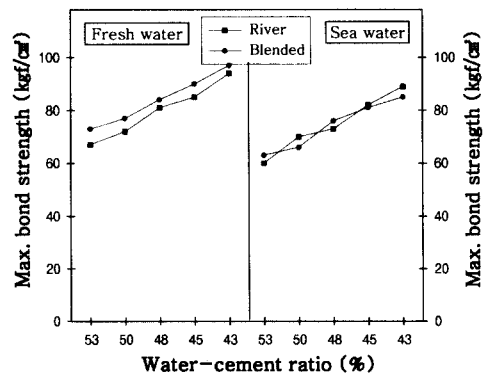


Fig. 8 Max. bond strength according to type of sand

3.2.3 잔골재 종류의 영향

Fig. 8은 잔골재의 종류에 따른 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도(대표적으로 수직철근)를 나타낸 것이고, Fig. 9는 부착 강도를 압축 강도로 나누어 비교한 것이다.

Fig. 8에서 담수에서 제작·양생한 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 잔골재로 혼합사를 사용한 것이 하천사를 사용한 것보다 3~6 kgf/cm² 정도 높게 나타났는데, 이것은 해사를 상용수로 세척할 때 미립자가 많이 유실되어 미립자가 많은 하천사가 혼합사보다 수중불분리성 혼화제를 더 많이 흡착하여 압축 강도가 저하되었기 때문으로 생각된다.

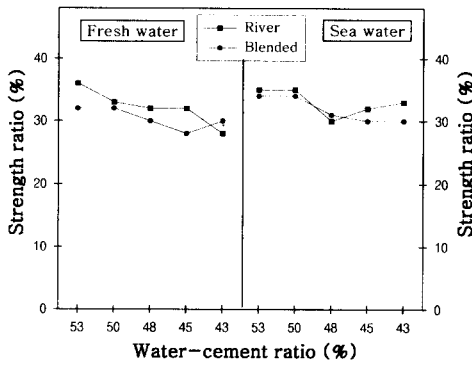


Fig. 9 Strength ratio according to type of sand

Fig. 9에서 강도비는 담수, 해수에 관계없이 전반적으로 하천사를 잔골재로 사용했을 때가 높게 나타났는데, 이것 또한 해수내에 포함된 무기질의 영향이 부착 강도보다는 압축 강도에 더 큰 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다.

따라서 담수에서 수중불분리성 콘크리트를 타설할 경우에는 잔골재로 혼합사를 사용하는 것이 대체골재측면에서나 강도측면에서 더 유리할 것으로 생각되고, 해수의 경우에는 오히려 강도비가 높게 나타난 하천사를 잔골재로 사용하는 것이 더 유리할 것으로 생각된다.

3.2.4 압축 강도의 영향

Fig. 10~Fig. 12는 보통콘크리트와 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도를 철근 배근위치별로

압축 강도의 제곱근에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서의 상관식은 단순회귀분석하여 상관도가 가장 큰 것을 정리한 것이고, ACI 치환식(μ_{aci})과 Orangun 등에 의해 제안된 식(μ_{cal})의 상관도(R^2)는 수중불분리성 콘크리트에 대한 것이다.

본 연구에 의하면 압축 강도 증가에 따른 보통 콘크리트와 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도 특성은 철근 배근위치별로 다소 차이가 있으나, 전반적으로 ACI 치환식과 Orangun 등의 제안식과는 달리 보통콘크리트는 $\sqrt{f_{cu}}$ 보다는 대략 f_{cu} 의 증가치에 비례하여 증가하는 경향을 나타냈고, 수중불분리성 콘크리트는 대략 $(\sqrt{f_{cu}})^{3/2}$ 의 증가치에 비례하여 증가하는 경향을 나타냈다. 즉 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 상기의 두 식들보다 압축 강도의 영향을 더 받고 있다는 것을 알 수 있었다.

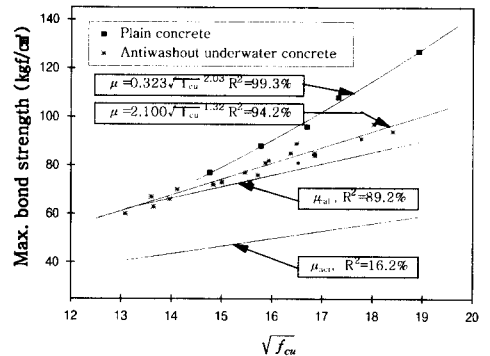


Fig. 10 Max. bond strength according to compressive strength (vertical bar)

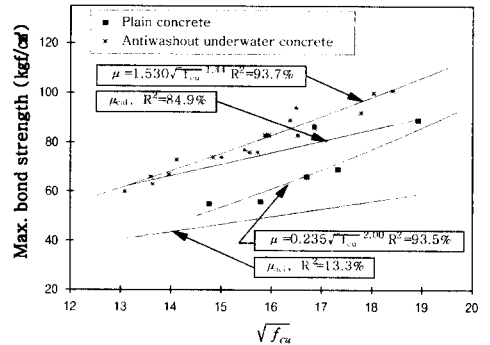


Fig. 11 Max. bond strength according to compressive strength (horizontal upper bar)

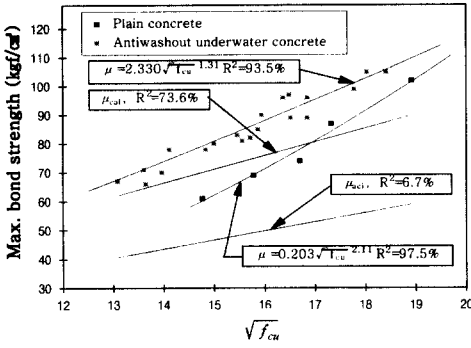


Fig. 12 Max. bond strength according to compressive strength (horizontal lower bar)

Table 7에서 보통콘크리트의 부착 강도는 압축 강도와 철근 배근위치에 관계없이 ACI 치환식에 의한 최대부착 강도에 대해서는 1.20~2.16 배로 안전측으로 나타났고, Orangun 등에 의해 제안된 식에 의한 최대부착 강도에 대해서는 압축 강도와 철근 배근위치에 따라 다르게 나타났다. 수직철근으로 배근된 경우에는 압축 강도에 관계없이 1.33~1.73배로 모두 안전측으로 나타났고, 수평상단의 경우에는 압축 강도에 관계없이 0.79~0.99배로 제안식보다 낮게 나타났으며, 수평하단의 경우에는 압축 강도가 300 kgf/cm² 이상에서만 1.06~1.14배로 나타났다.

수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 ACI 치환식에 의한 부착 강도에 대해서는 철근 배근위치, 제작 및 양생수의 종류, 잔골재의 종류, 그리고 압축 강도에 관계없이 1.49~1.89배로 모두 안전측으로 나타났고, Orangun 등에 의해 제안된 식에 의한 최대부착 강도에 대해서는 전반적으로 0.97~1.24배로 거의 비슷하게 나타났다.

Fig. 13~Fig. 15는 보통콘크리트와 수중불분리성 콘크리트(대표적으로 잔골재는 혼합사, 제작 및 양생수는 담수)의 철근 배근위치에 따른 부착 강도를 ACI 치환식과 Orangun 등에 의해 제안된 식에 대한 비로 나타낸 것이다.

Fig. 13~Fig. 15에서 보통콘크리트와 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 전체적으로 철근 배근위치에 관계없이 압축 강도가 증가할수록 안전측으로 나타났고, 이러한 경향은 보통콘크리트가 수중불분리성 콘크리트보다 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이것은 보통콘크리트의 부착 강도는 f_{cu}

에 비례하여 증가하고, 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 $(\sqrt{f_{cu}})^{3/2}$ 에 비례하여 증가하기 때문으로 생각된다.

따라서 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도를 압축 강도로부터 간접적으로 산정할 경우에는 새로운 산정식이 제안되어야 할 것으로 생각된다.

3.2.5 회귀분석에 의한 예측식 제안

수중불분리성 콘크리트는 수중불분리성 혼화제의 강한 점성에 의한 불리당의 억제효과를 감안하고, Table 7의 각 실험결과들을 회귀분석하여 식 (4)와 같은 부착 강도 예측식을 얻을 수 있었으며, 이때의 상관관계는 Fig. 16과 같다.

$$\mu = 1.27(\sqrt{f_{cu}})^{3/2} \quad (R^2 = 95.8\%) \quad (4)$$

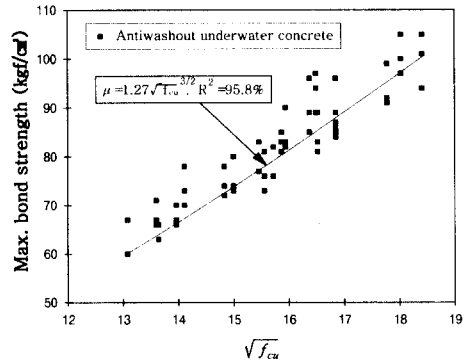


Fig. 13 Max. bond strength ratio (vertical bar)

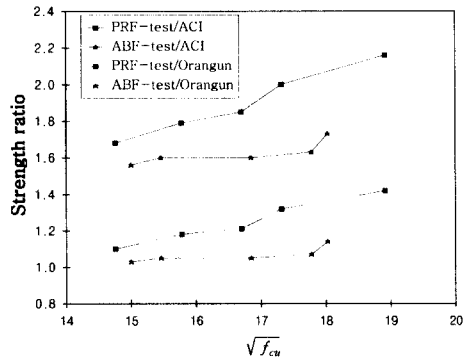


Fig. 14 Max. bond strength ratio (horizontal upper bar)

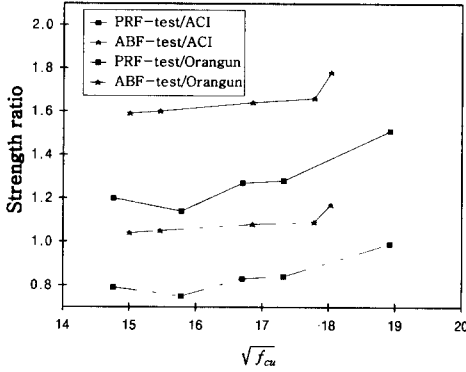


Fig. 15 Max. bond strength ratio (horizontal lower bar)

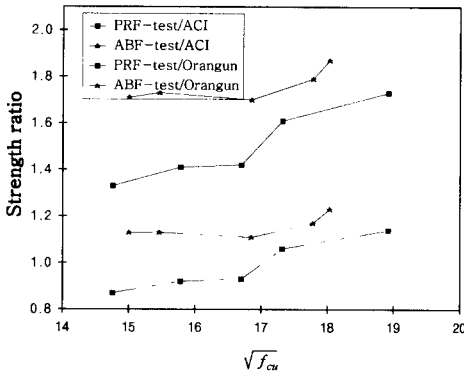


Fig. 16 Relationship between compressive strength and maximum bond strength

4. 결론

철근 배근위치, 제작 및 양생조건, 잔골재의 종류, 그리고 압축 강도를 변수로 하여 수중불분리성 콘크리트의 부착실험을 수행하고, 그 실험결과들을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 보통콘크리트의 경우는 블리딩으로 인해서 수평철근의 하단에 수막이 형성되어 부착력을 저하시키기 때문에 수평으로 배근된 것이 수직으로 배근된 것보다 낮은 부착 강도를 나타냈으나, 수중불분리성 콘크리트의 경우 수중불분리성 혼화제의 강한 점성으로 인하여 블리딩이 억제되었기 때문에 오히려 수평으로 배근된 공시체의 부착 강도가 더욱 양호하게 나타났다.

- 2) 동일한 배합조건으로 담수에서 제작·양생한 공시체가 해수에서 제작·양생한 공시체보다 4~14 kgf/cm 정도 더 높은 부착 강도를 나타냈다. 따라서 해양공사에서 수중불분리성 콘크리트를 배합설계 할 경우에 담수에서 보다는 더 높은 할증계수를 적용해야 할 것으로 생각된다.

- 3) 담수에서는 혼합사를 잔골재로 사용한 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도가 높게 나타났다. 해수에서는 하천사를 사용한 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도가 대체적으로 높게 나타났다. 따라서 담수에서 수중불분리성 콘크리트를 치기할 경우에 잔골재로 혼합사를 사용하는 것이 대체골재측면에서나 강도측면에서 더 유리할 것으로 생각되고, 해수에서는 하천사가 유리할 것으로 생각된다.

- 4) 본 연구에서 실험한 결과 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 철근배근의 위치, 제작 및 양생수, 잔골재의 종류, 그리고 압축 강도에 관계없이 ACI 치환식으로 산정된 부착 강도에 비해 1.49~1.89배로 모두 안전측으로 나타났고, Orangun 등에 의해 제안된 식으로 산정된 부착 강도보다는 전반적으로 0.97~1.24배로 비슷하게 나타났다. 압축 강도가 증가할수록 더욱 안전측으로 나타났다.

- 5) 압축 강도에 따른 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 ACI 치환식과 Orangun 등에 의해 제안된 식의 $\sqrt{f_{cu}}$ 보다는 $(\sqrt{f_{cu}})^{3/2}$ 의 증가치에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

- 6) 다음은 본 연구의 실험결과를 회귀분석하여 수중불분리성 콘크리트의 압축 강도와 철근 배근위치로 부착 강도를 예측할 수 있는 산정식이다.

$$\mu = 1.27(\sqrt{f_{cu}})^{\frac{3}{2}} \quad (R^2 = 95.8\%)$$

참고문헌

1. 김기동, "수중불분리콘크리트의 부착 강도특성에 관

- 한 기초적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1999. 8
2. 김명식, “수중불분리콘크리트의 특성에 대한 기초적 연구”, 한국농공학회지, 제38권, 제6호, 1996., pp.74-82.
 3. 關博, 日本土木學會, 水中不分離性 콘크리트設計施工指針(案) のアウトラインセメント・コンクリート, No.541, pp.49-52, 1992., pp.105-107.
 4. Takeshi Ohtomo 외 3인, “Influence of Materials on the Action of Admixtures in Antiwashout Underwater Concrete”, ACI Materials Journal, Vol. 92, No.3, May-June 1995., pp.315-320.
 5. 어영선, “수중불분리콘크리트의 최적 물-시멘트비에 관한 실험적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1998. 8
 6. 신성우 외 2인, “철근콘크리트의 부착특성에 관한 연구”, 콘크리트학회논문집, 제7권 1호, 1995. 2., pp. 117-125.
 7. ASTM, “Standard Test Method for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel”, ASTM C234-91a, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. USA, 1991.
 8. 문한영, “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준”, 대한토목학회지, 제45권, 제3호, pp.71-77, 1997. 1.
 9. L. Javier Malvar, “Bond of Reinforcement Under Controlled Confinement”, ACI Materials Journal, Vol. 89, No.6, Nov.-Dec. 1992., pp.593-601.
 10. David Drawn 외 3인, “Development Length Criteria : Bars Not Confined by Transverse Reinforcement”, ACI Structural Journal, Vol. 89, No. 6, Nov.-Dec. 1992., pp. 709-720.
 11. ACI Committee 318-89, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI.

요 약

본 연구에서는 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도 특성을 파악하기 위해서, 철근배근의 위치(수직철근, 수평상단철근, 수평하단철근), 제작 및 양생조건(담수, 해수), 잔골재의 종류(하천사, 혼합사(하천사:해사=1:1)), 그리고 압축 강도를 실험변수로 하였다.

또한 부착 강도 실험결과를 ACI 318-89 12.2.2의 기본정착길이 산정식을 치환한 식과 기존의 Orangun 등에 의해 제안된 식에 의해 산정된 부착 강도와 비교하였다.

실험결과, 수중불분리성 콘크리트의 부착 강도는 철근을 수평하단으로 배근했을 때, 혼합사를 사용했을 때, 그리고 담수에서 제작·양생했을 때가 다른 조건에 비하여 대체로 높게 나타났고, 압축 강도에 대해서는 대략 $(\sqrt{f_{cu}})^{3/2}$ 에 비례하여 부착 강도는 증가하였다. 본 연구의 실험결과들을 회귀분석하여 수중불분리성 콘크리트의 압축 강도로부터 부착 강도를 산정할 수 있는 예측식을 제안하였다.

(접수일자 : 1999. 11. 15.)