



결합재 종류에 따른 해양 콘크리트의 강도 발현, 염화물 확산 및 단열온도 상승 특성에 대한 비교 연구

배준영¹⁾ · 조성현²⁾ · 신경준¹⁾ · 김윤용^{1)*}

¹⁾충남대학교 토목공학과 ²⁾한일시멘트 테크니컬센터

A Comparative Study on Strength Development, Chloride Diffusivity and Adiabatic Temperature Rise of Marine Concrete Depending on Binder Type

Jun-Young Bae,¹⁾ Sung-Hyun Cho,²⁾ Kyung-Joon Shin,¹⁾ and Yun-Yong Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾Hanil Cement Technical Center, Daejeon 306-802, Korea

ABSTRACT Recently, in order to reduce a damage of chloride attack and hydration heat in marine concrete structures, blended cement in mixing the marine concrete is widely used. Long term strength development is distinct in concrete with blended cement and it also has excellent resistance to chloride attack and reduction of hydration heat. However, blended cement has a characteristic of relatively low compressive strength in early age of 28 days. On the other hand, a high level of compressive strength is required in the Standard Specification for marine concrete mix design. Such concrete mix design satisfying Standard Specification is effective to chloride attack but disadvantageous for hydration heat reduction due to large quantity of binder. In this study, the material properties of marine concrete considering water-binder ratio and binder type are experimentally investigated. Through the research results, compressive strength in blended cement at the age of 56 days is similar although it has smaller compressive strength at the age of 28 days compared with result of OPC (ordinary portland cement). Even though blended cement has a large water-binder ratio and small unit of binder content, chloride ion diffusion coefficient is still small and hydration heat is also found to be reduced. For meeting the required compressive strength in Standard Specification for marine concrete at 28 days, the increased unit content of binder is needed but the increased hydration heat is also expected.

Keywords : marine concrete, blended cement, compressive strength, chloride diffusivity, adiabatic temperature rise

1. 서 론

우리나라는 국토의 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 지정학적 특성으로 인하여 해상교량, 항만, 조력발전소, 해상도시 등 다양한 해양 콘크리트 구조물 건설이 활발하다.^{1,2)}

해양 콘크리트 구조물은 바닷가로부터 유입되는 염소 및 황산염 이온 등에 의한 화학적 침식과 해상의 파력, 풍력, 건습 반복 등에 의한 물리적 침식을 복합적으로 받는다. 특히 염해(chloride attack)는 콘크리트 내의 철근을 부식시켜 구조물의 성능을 현저하게 저하시킨다.^{3,4)} 한편

해양 콘크리트 구조물은 대부분 매스콘크리트 구조물로서 콘크리트 타설로 인하여 발생하는 수화열(heat of hydration)이 많다.⁵⁾ 수화열은 콘크리트의 온도균열발생 가능성을 높이므로 이에 대한 대책이 반드시 필요하다. 이와 같이 해양 콘크리트 구조물은 염해 및 수화열에 대한 대책을 동시에 고려해야 한다.⁶⁾

국내 건설현장에서는 해양 콘크리트 구조물의 염해 내구성 확보 및 수화열 저감을 위한 재료적 대책의 일환으로 혼합시멘트(blended cement)의 사용이 증가하고 있다.⁷⁻¹¹⁾ 또한 현행 콘크리트 표준시방서에서도 내해수성이 우수하고 수화열이 적은 이점을 고려하여 혼합시멘트의 사용을 명기하고 있으며,¹²⁾ BS 및 ACI Code에서도 염해 내구성 향상을 위하여 무기질 혼화재를 적절히 사용하도록 제안하고 있다.^{13,14)} 따라서 향후 혼합시멘트의 해양 콘크리트 구조물 적용은 더욱 증가될 것으로 예상된다.

*Corresponding author E-mail : yunkim@cnu.ac.kr
 Received December 12, 2012, Revised March 20, 2013,
 Accepted March 20, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

한편 현행 콘크리트 표준시방서 및 구조설계기준에서는 해양 콘크리트의 최대 물-결합재비를 0.40, 최소 설계기준 압축강도를 35 MPa로 규정하고 있어,¹⁵⁾ 압축강도를 기준으로 해양 콘크리트의 배합설계를 하도록 유도하고 있다. 그러나 혼합시멘트는 상대적으로 1종 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement: OPC)보다 재령 28일까지의 콘크리트 압축강도 발현이 작기 때문에, 압축강도를 기준으로 해양 콘크리트 배합을 결정하면 최소 설계기준 압축강도 만족을 위한 단위결합재량이 증가될 수밖에 없다. 단위결합재량이 증가하면 염해 내구성 확보에는 유리하지만 과도한 수화열 발생을 야기할 수 있다. 따라서 혼합시멘트를 해양 콘크리트에 적용하기 위해서는 압축강도와 염해 및 수화열을 동시에 검토하는 연구가 필요하다.

이 연구에서는 물-결합재비 및 결합재 종류가 해양 콘크리트의 압축강도, 염화물 확산계수 및 단열온도 상승량에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다. 또한 결합재 종류에 따른 해양 콘크리트의 적용성 평가를 실시하여 혼합시멘트의 재료적 특성을 검토하였다. 이를 통하여 향후 혼합시멘트를 해양 콘크리트에 적용시 기초자료로 제시하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

해양 콘크리트의 재료적 특성을 검토하기 위한 실험계획 및 콘크리트 배합은 Table 1과 같다. 현행 콘크리트 표준시방서에 규정되어 있는 일반현장 환경구분에 따른 해양 콘크리트의 최대 물-결합재비를 감안하여 이 연구의 물-결합재비는 48, 43, 38%의 3수준으로 설정하였다.¹²⁾ 사용 결합재는 OPC, 고로슬래그시멘트(blast-furnace slag cement: BSC) 및 삼성분계 혼합시멘트(ternary blended cement: TBC)로 하였다.

Table 1 Experimental plan and mix proportion

| W/B (%) | Binder type | Slump (mm) | Air (%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | Test items |
|---------|-------------|------------|-----------|---------|----------------------------------|-----|-----|-----|--|
| | | | | | W | B | S | G | |
| 48 | OPC | 210 ± 25 | 4.5 ± 1.5 | 49.0 | 165 | 344 | 883 | 947 | <ul style="list-style-type: none"> Slump (0, 60 min) Air content (0, 60 min) Compressive strength (3, 7, 28, 56 days) Chloride ion diffusion coefficient (7, 28, 56 days) Adiabatic temperature rise (K, α) |
| | BSC | | | 48.5 | 165 | 344 | 873 | 955 | |
| | TBC | | | 47.5 | 165 | 344 | 839 | 956 | |
| 43 | OPC | | | 48.0 | 165 | 384 | 849 | 948 | |
| | BSC | | | 47.5 | 165 | 384 | 839 | 956 | |
| | TBC | | | 46.5 | 165 | 384 | 804 | 954 | |
| 38 | OPC | 47.0 | 165 | 434 | 812 | 944 | | | |
| | BSC | 46.5 | 165 | 434 | 802 | 951 | | | |
| | TBC | 45.5 | 165 | 434 | 766 | 946 | | | |

실험항목은 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량을 각각 초기 및 60분 경시에 측정하였고, 굳은 콘크리트는 재령별 압축강도, 염화물 확산계수, 단열온도 상승시험을 실시하였다. 콘크리트의 목표 슬럼프는 210±25 mm, 목표 공기량은 4.5±1.5% 수준을 만족하도록 하였으며, 이를 만족하는 범위에서 화학혼화제의 양을 조절하여 투입하였다.

2.2 사용재료

이 연구에서는 국내 H사의 OPC와 포항산 고로슬래그 미분말(blast furnace slag: BFS) 및 삼천포산 플라이애쉬(fly ash: FA)를 사용하였으며 물리·화학적 특성은 Table 2와 같다. BSC는 OPC 50%와 BFS 50%의 비율로 혼합하여 제조하였으며, TBC는 고내구성 해양 콘크리트 배합설계를 위한 기존 연구 결과를 참고하여 OPC 30%, BFS 40%, FA 30%의 비율로 혼합하여 제조하였다.¹⁰⁾ 잔골재는 강모래를 사용하였고, 굵은 골재는 최대치수가 25 mm인 부순 골재를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 3과 같다. 화학혼화제는 폴리카르본산계 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 4와 같다.

2.3 실험방법

2.3.1 콘크리트 비빔 및 공시체 제작

콘크리트 비빔은 강제식 twin shaft 믹서를 사용하여 Fig. 1과 같은 순서로 실시하였다. 먼저 결합재, 잔골재 및 굵은 골재를 믹서에 투입하고, 30초간 건비빔을 실시하였다. 건비빔 후 물과 고성능 AE감수제를 투입하여 90초 동안 비빔하여 배출함으로써 혼합을 완료하였다.

Table 2 Physical and chemical properties of materials

| Material | Density (g/cm ³) | Blaine (cm ² /g) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Ig. loss |
|----------|------------------------------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|----------|
| OPC | 3.15 | 3365 | 20.83 | 5.30 | 3.00 | 62.39 | 2.31 | 2.30 | 2.44 |
| BFS | 2.94 | 4174 | 28.14 | 15.87 | 1.06 | 45.95 | 4.98 | 2.12 | 0.35 |
| FA | 2.20 | 3990 | 50.72 | 20.73 | 6.37 | 3.61 | 1.08 | 0.54 | 3.04 |

Table 3 Physical properties of aggregate

| Classification | Types | G _{max} (mm) | Density (g/cm ³) | Absorption (%) | FM |
|------------------|---------------|-----------------------|------------------------------|----------------|------|
| Fine aggregate | River sand | 5 | 2.55 | 1.14 | 2.91 |
| Coarse aggregate | Crushed stone | 25 | 2.62 | 1.78 | 7.05 |

Table 4 Physical properties of superplasticizer

| Main components | Solid contents (%) | pH | Density (g/cm ³) | Setting time (min) | |
|------------------|--------------------|-----|------------------------------|--------------------|-------|
| | | | | Initial | Final |
| Polycarboxy late | 18.0 | 6.6 | 1.048 | 20 | 30 |

압축강도, 염화물 확산계수 시험용 공시체는 KS F 2403 「콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법」에 준하여 제작하였다. 압축강도 및 염화물 확산계수 시험용 공시체는 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 몰드로 제작하였다. 공시체 양생은 탈형 후 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 수조에서 각각의 재령일 까지 양생하였다.

2.3.2 슬럼프 및 공기량 시험

슬럼프 시험은 KS F 2402 「콘크리트의 슬럼프 시험방법」에 준하여 실시하였으며, 공기량 시험은 KS F 2421 「굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기함유량 시험방법」에 준하여 실시하였다.

2.3.3 압축강도

압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 실시하였으며, 재령 3, 7, 28, 56일에 만능시험기(UTM)를 사용하여 측정하였다.

2.3.4 염화물 확산계수

콘크리트의 염화물 확산계수는 유럽의 Duracrete 모델에 적용되는 전기적 촉진시험법인 NT Build 492 『chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments』¹⁶⁾에 준하여 시험을 실시하였다.

시험을 위해 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 두께 50 ± 2 mm로 절단하고 Fig. 2와 같은 Rubber sleeve와 조립한 다음 양극(+)에는 0.3M의 NaOH 수용액, 음극(-)에는 10%의 NaCl 수용액을 채워 전기적 전위차를 가하였다. 초기 전압 30V를 가하여 최초 인가시의 전류값을 측정한 후 그에 따른 2차 전압을 설정하고 전류값에 따른 시험시간을 결정하였다. 시험 종료 후 시험체를 쪼갠 면에 0.1N의 질산은(AgNO_3) 수용액을 분무하여 은색의 염화물 침전물

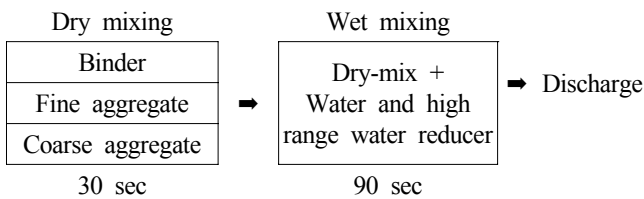


Fig. 1 Concrete mixing process

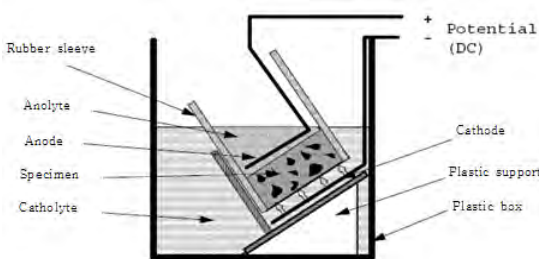


Fig. 2 Non-steady-state migration experimental set-up

이 육안으로 확실하게 나타날 때, 대략 10 mm 간격으로 염화물 침투깊이를 측정한 후 평균값을 산출하였다. 염화물 확산계수는 다음 식 (1)을 사용하여 계산하였다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

여기서, $E = \frac{U-2}{L}$, $\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$

- D_{nssm} : non-steady-state migration coefficient (m^2/s)
- z : absolute value of ion valence, for chloride, $z=1$
- F : Faraday constant, $F=9.648 \times 10^4 \text{ J} (\text{V} \cdot \text{mol})$
- U : absolute value of the applied voltage (V)
- R : gas constant, $R=8.314 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$
- T : average value of the initial and final temperatures in the anolyte solution (K)
- L : thickness of the specimen (m)
- x_d : average value of the penetration depth (m)
- t : test duration (seconds)
- erf^{-1} : inverse of error function
- c_d : chloride concentration at which the colour changes, $c_d \approx 0.07 \text{ N}$ for OPC concrete
- c_0 : chloride concentration in the catholyte solution $c_0 \approx 2 \text{ N}$

2.3.5 단열온도 상승량

이 연구에서는 Fig. 3과 같은 일본 Tokyo Rico사의 단열온도 상승시험 장비를 사용하여 콘크리트 단열온도 상승량을 측정하였다. 먼저 콘크리트 시료를 제조하여 단열용기에 채운 후 항온조 내에 격납한다. 격납된 시료와 항온조 내의 온도차가 없도록 유지하여 콘크리트 시료가 단열상태에 이르게 되면, 콘크리트 자체의 발열량에 의한 단열온도 상승량(T)과 경과 시간(t)을 측정하여 기록한다. 단열온도 상승시험을 통해 얻어진 결과를 아래 식 (2)와 같은 지수함수 형태로 표현할 수 있으며, 최대 단열온도 상승량(Q_∞)과 반응속도(r)를 단열온도 상승량으로 취한다.

$$T = Q_\infty (1 - e^{-rt}) \quad (2)$$

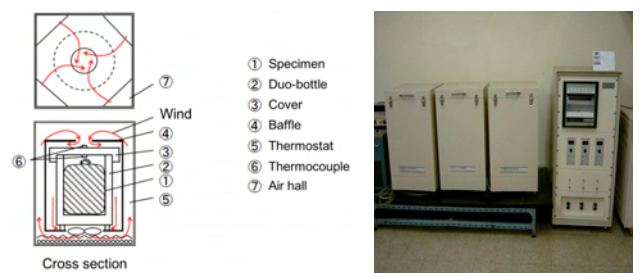


Fig. 3 Adiabatic temperature rise apparatus

여기서, T : temperature rise at time t ($^{\circ}\text{C}$)
 Q_{∞} : maximum temperature rise ($^{\circ}\text{C}$)
 r : reaction factor ($^{\circ}\text{C}/\text{Hr}$)
 t : time (day)

3. 실험 결과

3.1 굳지 않은 콘크리트

3.1.1 슬럼프

Table 5는 목표 슬럼프를 얻기 위한 고성능 AE감수제의 사용량이다. OPC, BSC, TBC 배합 순으로 사용량이 많은 것으로 나타나 TBC 배합의 사용량이 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 TBC 배합의 결합재에서 약 30% 치환된 FA가 불베어링 작용을 함으로써, 적은 양의 감수제 투입만으로도 목표 슬럼프를 얻기 위한 유동성 확보가 가능했던 결과라고 사료된다.¹⁷⁾

Fig. 4는 물-결합재비 및 결합재 종류에 따른 슬럼프 시험 결과이다. 모든 배합에서 목표로 했던 210 ± 25 mm 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 한편 60분 경시 후 슬럼프 손실(slump loss)은 물-결합재비 38%가 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 단위결합재량이 많을수록 화학혼화제의 절대 첨가량이 늘어나, 시간에 따른 슬럼프 유지

Table 5 Amount of superplasticizer required for achieving target slump (210 ± 25 mm)

| W/B (%) | Binder type | Superplasticizer (\times wt.%) |
|---------|-------------|-----------------------------------|
| 48 | OPC | 1.17 |
| | BSC | 0.60 |
| | TBC | 0.58 |
| 43 | OPC | 1.05 |
| | BSC | 0.50 |
| | TBC | 0.48 |
| 38 | OPC | 1.15 |
| | BSC | 0.60 |
| | TBC | 0.55 |

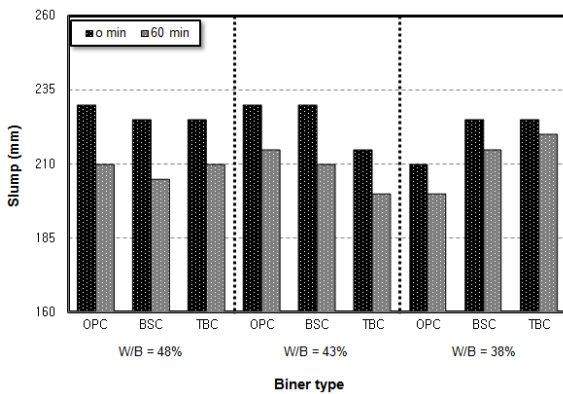


Fig. 4 Results of slump test by binder types

성능이 향상되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.1.2 공기량

Fig. 5는 물-결합재비 및 결합재 종류에 따른 공기량 시험 결과이다. 모든 배합에서 목표 공기량인 $4.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 것으로 나타났다. 한편 TBC 배합의 공기량이 가장 적게 나타났는데, 이는 결합재 내에 포함된 FA의 미연탄소(unburned carbon)가 연행공기(entrained air)를 흡착하여 나타난 결과라 사료된다.

3.2 굳은 콘크리트

3.2.1 압축강도

Fig. 6은 물-결합재비 및 결합재 종류에 따른 재령별 압축강도 시험 결과이다. 모든 재령에서 OPC, BSC, TBC 배합 순으로 압축강도가 크게 나타났다. 특히 재령별 압축강도 발현이 OPC 배합에 비하여 상대적으로 작은 BSC 및 TBC 배합도 재령 56일에는 OPC 배합과 유사한 압축강도를 발현하는 것으로 나타났다. 이는 결합재 내에 다량 치환되어 있는 BFS 및 FA가 잠재수경성 및 포졸란 반응을 일으켜 장기강도 발현이 커진 결과라 사료된다.

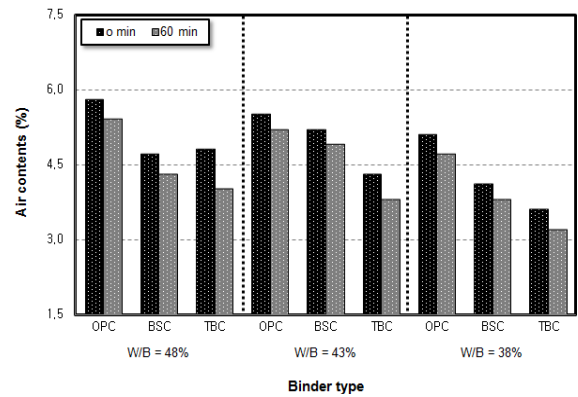


Fig. 5 Results of air content test by binder types

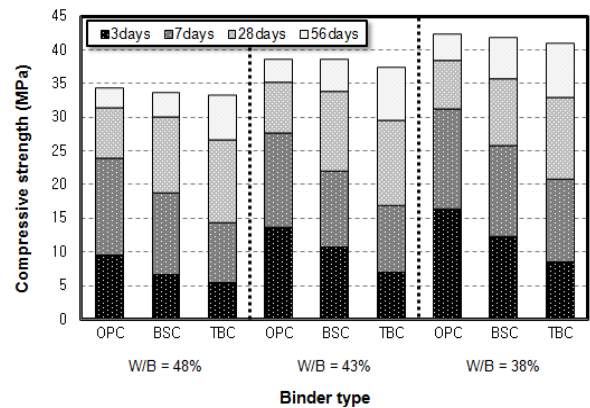


Fig. 6 Results of compressive strength test by binder types

3.2.2 염화물 확산계수

Fig. 7은 물-결합재비 및 결합재 종류에 따른 재령별 염화물 확산계수 시험 결과이다. 모든 물-결합재비에서 TBC, BSC, OPC 배합 순으로 확산계수가 작은 것으로 나타났다. 특히, OPC와 BSC 배합은 물-결합재비가 커짐에 따른 염화물 확산계수의 증가가 크게 나타난 반면, TBC 배합은 모든 물-결합재비에서 염화물 확산계수가 작게 나타났다. 이는 기존 연구^{9,10}에서와 같이 TBC 배합은 우수한 결합재의 영향으로 다소 낮은 압축강도 영역에서도 염소이온 침투 저항성이 우수한 결과와 잘 일치한다. 따라서 해양 콘크리트 배합에 TBC를 사용하면 물-결합재비가 크고 단위결합재량이 적은 배합에서도 우수한 염해 저항성 확보가 용이할 것으로 예상된다.

3.2.3 단열온도 상승량

Fig. 8은 물-결합재비 및 결합재 종류에 따른 단열온도 상승 시험 결과이다. 모든 물-결합재비에서 OPC, BSC, TBC 배합 순으로 Q_{∞} 및 r 이 큰 것으로 나타났다. 단열온도 상승량이 가장 많은 OPC 배합은 조성 화합물인 C_3S 및 C_3A 의 양이 상대적으로 많기 때문에 수화발열량

이 증가한 결과라 사료된다.¹⁸⁾ 반면 단열온도 상승량이 가장 적게 나타난 TBC 배합은 용해열이 낮은 BFS와 FA의 다량 치환으로 수화열 발생이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 특히 작은 물-결합재비에서도 TBC 배합은 단열온도 상승량이 적게 나타나 해양 콘크리트 구조물의 수화열 저감에 용이한 배합인 것으로 판단된다.

4. 시방 기준을 고려한 해양 콘크리트의 성능 예측

4.1 해양 콘크리트의 특성 분석

결합재 종류에 따른 해양 콘크리트의 염해 내구성 및 수화발열 특성을 분석하기 위하여 Fig. 9와 같이 압축강도와 결합재-물비, 압축강도와 염화물 확산계수 및 압축강도와 단열온도 상승량과의 관계식을 각각 설정하였다.

Fig. 10은 물-결합재비 및 결합재 종류에 따른 해양 콘크리트의 재령 28일 압축강도 시험 결과와 결합재-물비, 염화물 확산계수 및 단열온도 상승량과의 관계식을 각각 나타낸 것이다. Fig. 10(a)와 (b)를 살펴보면, 모든 배합에서 재령 28일 압축강도가 증가하면 결합재-물비는 커지

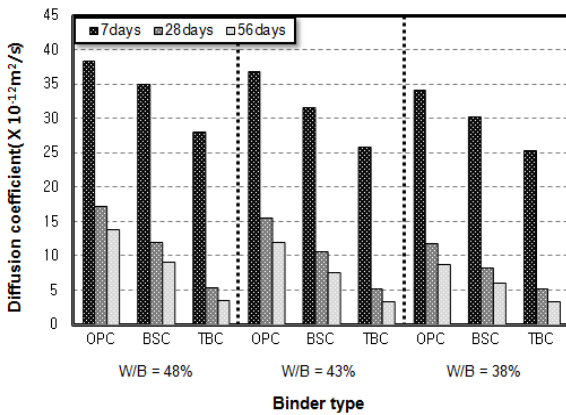


Fig. 7 Results of chloride ion diffusion coefficient test by binder types

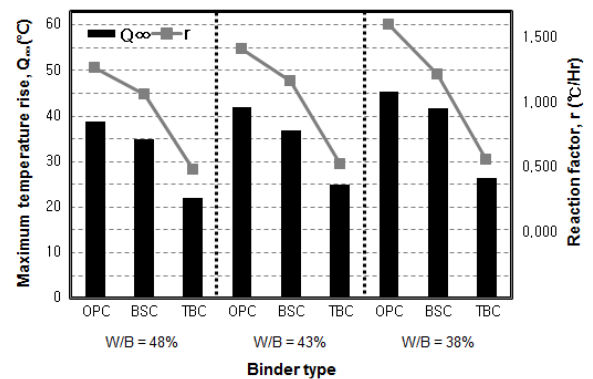


Fig. 8 Results of adiabatic temperature rise test by binder types

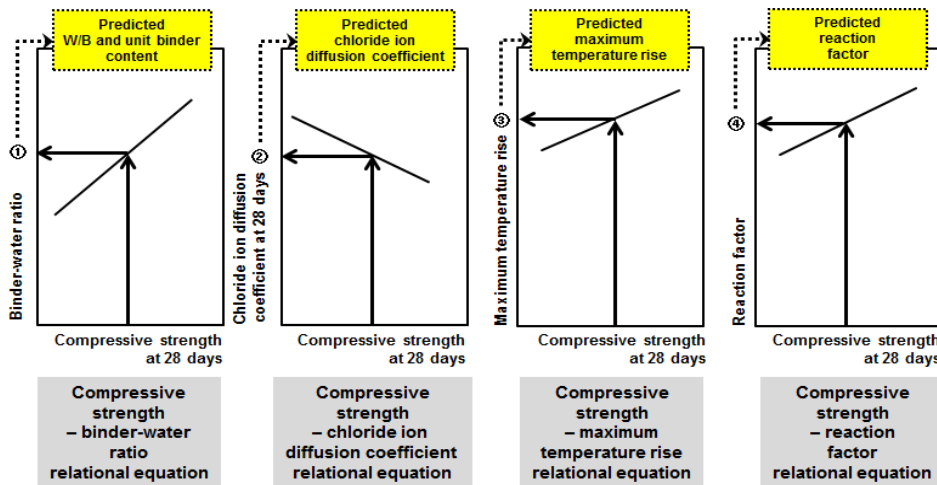


Fig. 9 Prediction process of marine concrete properties for achieving compressive strength at the control age of 28 days

고 염화물 확산계수는 작아지는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 단위결합재량이 많을수록 압축강도는 증가하고 염화물 확산계수는 작아지는 기존의 연구 결과와도 잘 일치한다. 특히, OPC와 BSC 배합은 압축강도가 증가할수록 염화물 확산계수가 상대적으로 크게 감소하는 것으로 나타난 반면, TBC 배합은 모든 배합에서 확산계수가 작은 것으로 나타났다. 이는 물-결합재비가 크고 단위결합재량이 적은 배합에서도 우수한 염해 저항성을 확보할 수 있는 것으로 나타난 앞서 TBC 배합의 실험 결과와도 잘 일치한다. 따라서 TBC를 해양 콘크리트에 적용하면 다소 낮은 압축강도 영역에서도 구조물의 염해 내구성 만족을 위한 염화물 확산계수 확보가 가능할 것으로 예상된다.

한편 Fig. 10(c), (d)를 살펴보면, 모든 배합에서 재령 28일 압축강도가 증가할수록 Q_{∞} 과 r 도 증가하는 경향으로 나타났다. 이는 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 단위결합재량이 많아지므로 수화 발열량이 증가함에 기인하는 것으로 판단된다. 소요 압축강도 증가에 따른 Q_{∞} 와 r 은 OPC, BSC, TBC 배합 순으로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 앞서 실험 결과에서 단열온도 상승량이 가장 적게 나타난 TBC 배합도 소요 압축강도가 증가할수록 Q_{∞} 와 r 이 크게 증가하는 경향으로 나타났다.

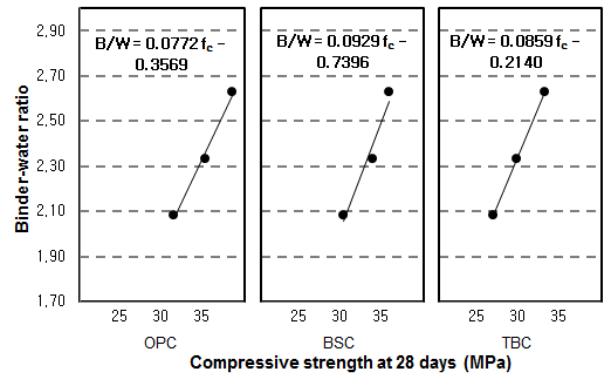
상기의 결과를 종합하면, 모든 결합재별 배합에서 소요 압축강도가 증가할수록 염화물 확산계수는 작아지지만, 단열온도 상승량은 증가하는 경향을 확인하였다. 이와 같이 압축강도 기준의 해양 콘크리트 배합설계는 염화물 확산계수 확보 측면에는 유리하지만, 단열온도 상승량이 크게 증가할 수 있다. 특히 수화열 저감 특성이 우수한 TBC 배합도 소요 압축강도가 증가하면 단열온도 상승량이 크게 증가할 수 있는 것으로 분석되었다.

4.2 해양 콘크리트의 성능 예측 분석

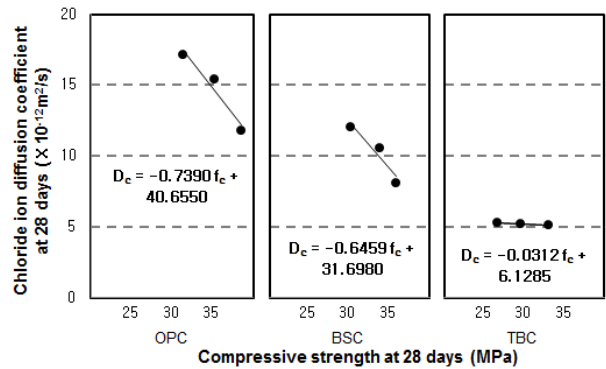
현행 해양 콘크리트의 최소 설계기준압축강도를 만족하기 위한 배합강도(f_c)를 콘크리트 표준시방서 「제2장 일반콘크리트」에 준하여 추정하면 43.5 MPa(35+8.5)이다.¹²⁾

Fig. 10(a)의 관계식을 이용하면 결합재별 해양 콘크리트 배합강도에 해당하는 물-결합재비 및 단위결합재량을 예측할 수 있다. Table 6은 결합재-물비, 물-결합재비 및 단위결합재량 예측 결과이다. 예측 결과 TBC, BSC, OPC 배합 순으로 물-결합재비는 작고 단위결합재량은 많은 것으로 나타났다. 특히 TBC 배합은 해양 콘크리트의 최소 배합강도 발현에 필요한 단위결합재량이 가장 많은 것으로 예측되었다. 이는 앞서 압축강도 실험 결과와 같이 재령 28일까지의 콘크리트 압축강도 발현이 가장 작은 결과에 기인한 것으로 판단된다.

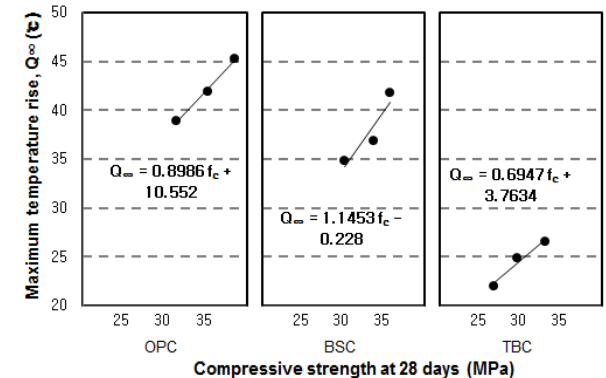
Table 7은 해양 콘크리트의 최소 배합강도를 Fig. 10(b)의 관계식에 적용하여 염화물 확산계수를 예측한 결과이다. 모든 배합에서 염화물 확산계수가 앞서 배합별 염화



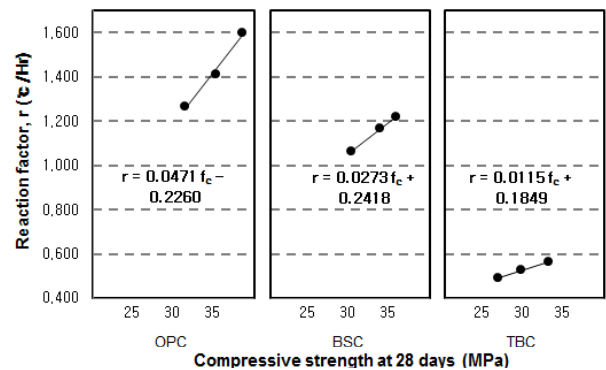
(a) Relations between compressive strength at 28 days and binder-water ratio



(b) Relations between compressive strength at 28 days and chloride ion diffusion coefficient at 28 days



(c) Relations between compressive strength at 28 days and maximum temperature rise



(d) Relations between compressive strength at 28 days and reaction factor

Fig. 10 Relations between compressive strength at 28 days and material properties of marine concrete

물 확산계수 시험 결과보다 작은 것으로 예측되었다. 이는 해양 콘크리트의 높은 배합강도로 인해 단위결합재량이 크게 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 결합재별로는 BSC, TBC, OPC 배합 순으로 염화물 확산계수가 작은 것으로 예측되었다.

Table 8은 해양 콘크리트의 최소 배합강도를 Fig. 10(c), (d)의 관계식에 적용하여 Q_{∞} 및 r 을 예측한 결과이다. 예측 결과, TBC 배합의 단열온도 상승량이 상대적으로 크게 증가하였다. 이는 현행 해양 콘크리트의 높은 배합강도를 만족하기 위한 단위결합재량의 증가가 TBC 배합에서 가장 크게 나타난 결과라 사료된다.

상기의 결과를 종합하면, 현행 해양 콘크리트의 엄격한 설계기준 압축강도 35 MPa를 만족하려면 OPC 배합에 비하여 BSC와 TBC 배합의 단위결합재량이 크게 증가하는 것으로 예측되었다. 이로 인하여 염화물 확산계수는 작아지지만 단열온도 상승량이 증가하므로 해양 콘크리트

트의 온도균열 방지 측면에서는 불리할 것으로 예상된다. 따라서 구조적인 문제가 발생되지 않는 범위에서 현행 해양 콘크리트의 최소 설계기준 압축강도를 35 MPa 보다 완화하는 등의 대책이 필요할 것으로 판단된다. 이 연구에서는 타설 부재에 대한 염해 내구성 및 수화열 해석 등을 수행하여 확보되는 최대 염화물 확산계수와 단열온도 상승량을 기준으로 해양 콘크리트 배합을 규제하는 등의 방안을 마련한다면, BSC 및 TBC와 같은 다양한 결합재를 보다 경제적으로 해양 콘크리트 배합에 적용할 수 있을 것이라 제안하고자 한다.

5. 결 론

물-결합재비 및 결합재 종류에 따른 해양 콘크리트의 재료적 특성을 실험적으로 검토하고, 결합재 종류에 따른 해양 콘크리트의 적용성 평가를 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) TBC 배합은 목표 슬럼프 및 공기량 만족을 위한 고성능 AE감수제 사용이 가장 적은 것으로 나타났다.
- 2) BSC 및 TBC 배합은 OPC 배합 대비 재령 28일까지는 압축강도 발현이 작게 나타났으나, 재령 56일에는 유사한 압축강도를 발현하였다.
- 3) 현행 해양 콘크리트의 최소 설계기준 압축강도를 만족하기 위해서는 단위결합재량이 증가하므로 염화물 확산계수는 작아지지만 단열온도 상승량이 크게 증가하는 것으로 예측되었다.
- 4) 해양 콘크리트의 설계기준 압축강도를 구조적인 문제가 되지 않는 범위에서 설계 염화물 확산계수 및 단열온도 상승량 등을 기준으로 완화하여 규제한다면, BSC 및 TBC와 같은 혼합시멘트를 보다 경제적으로 해양 콘크리트 배합에 적용할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 건설기술연구사업의 연구비 지원(11기술혁신F04)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Kwon, S. J., Song, H. W., and Byun, K. J., "A Study on Analysis Technique for Chloride Penetration in Cracked Concrete under Combined Deterioration," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 3, 2007, pp. 359-366.
2. Koh, K. T., Jang, I. Y., Kim, S. W., and Lee, K. M., "Materials and Construction of Off-Shore Concrete Structures," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 6, 2004, pp. 26-30.

Table 6 Prediction of unit binder content required for achieving compressive strength of 43.5 MPa (constant unit water content of 165 kg/m³)

| Binder type | Relational equation ⁽¹⁾ | B/W | W/B (%) | Unit binder content (kg/m ³) |
|-------------|------------------------------------|------|---------|--|
| OPC | $B/W=0.0772f_c-0.3569$ | 3.00 | 33.3 | 496 |
| BSC | $B/W=0.0929f_c-0.7396$ | 3.30 | 30.3 | 545 |
| TBC | $B/W=0.0859f_c-0.2140$ | 3.52 | 28.4 | 581 |

⁽¹⁾ These are plotted in Fig. 10(a) for each binder type.

Table 7 Chloride ion diffusion coefficient predicted for the compressive strength of 43.5 MPa

| Binder type | Relational equation ⁽¹⁾ | Diffusion coefficient ($\times 10^{-12}$ m ² /sec) |
|-------------|------------------------------------|--|
| OPC | $D_c=-0.7390f_c+40.6550$ | 8.5 |
| BSC | $D_c=-0.6459f_c+31.6980$ | 3.6 |
| TBC | $D_c=-0.0312f_c+ 6.1285$ | 4.8 |

⁽¹⁾ These are plotted in Fig. 10(b) for each binder type.

Table 8 Adiabatic temperature rise predicted for the compressive strength of 43.5 MPa

| Binder type | Relational equation ⁽¹⁾ | Adiabatic temperature rise | |
|-------------|---|----------------------------|-------------|
| | | Q_{∞} (°C) | r (°C/hr) |
| OPC | $Q_{\infty}=0.8986f_c+10.552$ $r=0.0471f_c-0.2260$ | 49.6 | 1.823 |
| BSC | $Q_{\infty}=0.8986f_c+10.552$ $r=0.0471f_c-0.2260$ | 49.6 | 1.429 |
| TBC | $Q_{\infty}=0.8986f_c+10.552$ $r=0.0471f_c-0.2260$ | 34.0 | 0.685 |

⁽¹⁾ These are plotted in Fig. 10(c), (d) for each binder type.

3. M. Funahashi, "Predicting Corrosion-Free Service Life of a Concrete Structure in a Chloride Environment," *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 6, 1990, pp. 581-587.
4. Kim, Y. G. and Cho, B. Y., "Performance Based Durability Design of Concrete Structures for Chloride Attack," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 4, 2006, pp. 32-40.
5. Chang, C. H. and Jung, Y. W., "The Study on High Performance of Offshore Concrete Using Crushed Stone Fines," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 15, No. 2, 2009, pp. 135-142.
6. Kang, S. P. and Kim, J. H., "Improvement of Durability and Change of Pore Structure for Concrete Surface by the Penetrative Surface Protection Agent," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 1, 2006, pp. 125-132.
7. Seo, S. H., Kim, D. W., Kim, P. S., Kim, Y. J., and Yoon, K. H., "Study on the Properties of Mass Concrete Using the Low Heat Materials," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 1, 2011, pp. 683-684.
8. Kim, Y. R., Song, Y. C., Kim, O. J., Park, J. H., Yoo, J. H., and Jeong, Y., "A Study on the Field Application of Low Heat Concrete Using High Volume Mineral Admixture," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 1, 2011, pp. 303-304.
9. Song, H. W., Lee, C. H., Lee, K. C., Kim, J. H., and Ann, K. Y., "Chloride Penetration Resistance of Ternary Blended Concrete and Discussion for Durability," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 4, 2008, pp. 439-449.
10. Bae, J. Y., Jang, Y. I., Park, S. B., and Kim, Y. Y., "An Experimental Study on the Compressive Strength and Chloride Diffusivity of Mortar Produced with Multiple Mixed Cement by the Experiments Design," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 28, No. 2, 2011, pp. 165-174.
11. Moon, H. Y., Jeon, J. K., and Kim, H. S., "Resistance on the Sulfuric Acid Corrosion of Cement Matrix Containing Mineral Admixtures," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 1, 2005, pp. 225-232.
12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Standard Concrete Specification*, Korea Concrete Institute, 2009, pp. 360.
13. BS 8500, *Concrete Complementary British Standard to BS EN 206-1, Part 1: Method of Specifying and Guidance for the Specifier*, British Standard, 2006,
14. ACI 201, *ACI Manual of Concrete Practice 2000, Materials and General Properties of Concrete, Chapter 2-Aggressive Chemical Exposure*, American Concrete Institute, 2009, pp. 8-12.
15. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code and Commentary*, Kimoondang Publishing Company, 2008, 523 pp.
16. Nordtest Method, NT BUILD 492, *Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials, Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments*, Nordtest, Finland, 1999.
17. Song, R. F., Lee, C. H., Baek, D. H., Han, M. C., Choi, E. K., and Han, C. G., "A Basic Study on the Improvement of the Quality of the Cement Mortar with Recycled Fine Aggregates Based on Fly Ash," *Proceedings of the Korean Recycled Construction Resource Institute*, Vol. 9, No. 2, 2009, pp. 41-44.
18. Kang, S. H., Lee, Y. H., Jeong, H. J., and Park, C. L., "An Experimental Study on the Evaluation of Adiabatic Temperature Rise of Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 7, No. 6, 1995, pp. 186-196.

요 약 최근 해양 콘크리트 구조물의 염해 및 수화열 저감을 위한 재료적 대책으로 혼합시멘트의 사용이 증가하고 있다. 혼합시멘트는 염해 및 수화열 저감 성능이 우수한 결합재이지만 재령 28일까지의 압축강도 발현이 작은 특징이 있다. 그러나 현행 해양 콘크리트 시방 규정은 높은 수준의 설계기준 압축강도를 재령 28일에 엄격히 만족하도록 되어 있다. 따라서 혼합시멘트를 사용하면 물-결합재비는 작고 단위결합재량은 많은 해양 콘크리트 배합이 예상된다. 이와 같이 높은 압축강도 위주의 해양 콘크리트 배합은 염해 내구성 확보에 유리하지만 수화열 저감에는 불리하다. 따라서 이 연구에서는 물-결합재비 및 결합재 종류에 따른 해양 콘크리트의 재료적 특성을 실험적으로 검토하고 예측하였다. 검토 및 예측 결과, 고로슬래그시멘트(BSC) 및 삼성분계 혼합시멘트(TBC) 배합은 1종 보통포틀랜드시멘트(OPC) 배합보다 재령 28일까지의 압축강도 발현은 상대적으로 작지만 재령 56일에는 유사한 압축강도를 발현하였으며 염해 및 수화열에 유리한 것으로 나타났다. 그러나 현행 해양 콘크리트의 최소 설계기준 압축강도를 만족하기 위해서는 단열온도 상승량이 크게 증가하는 것으로 예측되어 이에 대한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 해양 콘크리트, 혼합시멘트, 압축강도, 염화물 확산계수, 단열온도 상승량