

# 전기로 산화 슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 팝아웃현상 및 보수공법 제안

## Proposal of Repair Method and Pop-out Phenomenon of Concrete Incorporating Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Fine Aggregate

(2007년 2월 23일 원고접수, 2007년 4월6일 심사완료 / Received February 23, 2007, Accepted April 6, 2007)

이건철\* 이문<sup>1)</sup> 이세현<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 건축구조재료연구소

Lee, Gun-Cheol<sup>1)</sup>, Lee, Mun-Hwan<sup>1)</sup> Lee, Sea-Hyun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Building Structure & Material Research Division, 2311, Daehwa-Dong, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, KICT

### Abstract

Since pop-outs are occurred recently on concrete surface occasionally, it is needed to find out accurate causes and to suggest appropriate methods. On this study, it is investigated the occurrence mechanism of pop-outs caused by electric arc furnace Oxidizing slags as fine aggregate for concrete. As a result, it is investigated the cause of pop-outs that extremely small quantities of free CaO and free MgO in the electric furnace slag react with water to produce Ca(OH)<sub>2</sub> and Mg(OH)<sub>2</sub>, so that their volumes are expanded and erupted about two times. As a resolution, it is needed to remove the potential cause of expansion by replacing the deteriorated concrete section up to the depth to secure the safe of structural element with repairing polymer mortar, especially more than 50MPa.

키워드 : 전기로 산화슬래그, 팝아웃, 콘크리트 보수공법

Keywords : Electric Arc Furnace Oxidizing Slag, Pop-Out, Concrete repair methody

## 1. 서론

지금까지 보고된 콘크리트의 팝아웃(pop-out) 원인은 알칼리골재반응, 동결융해의 반복현상 등에 의한 것이 대부분으로 알려져 왔다. 특히, 콘크리트용 골재로서 화강암을 주로 사용하는 국내의 경우 알칼리골재반응에 의한 팝아웃 사례는 거의 보고되고 있지 않다.

한편, 콘크리트용 골재부족의 심각성이 부각되고 있는 현시점에서 다양한 골재의 수급방법이 검토되고 있으며, 이와 관련하여 일부에서는 슬래그 골재의 활용에 대한 검토가 활발히 진행되고 있다. 이중 전기로 슬래그는 천연암석골재보다 밀도가 높고 경질이며 내마모성이 우수한 반면 제조 공정상 생석회(CaO)가 함유되어 있어 물과 반응할 경우 체적팽창으로 균열이나 팝아웃을 발생시킬 수 있기 때문에 콘크리트 시방서에서는 콘크리트용 골재로서의 사용을 금지하고 있다<sup>1)</sup>.

그러나, 2007년 제정된 KS기준<sup>2)</sup>에서는 전기로 산화슬래그 잔골재(이하, EFS잔골재)의 적용범위와 기준을 명확히 구분하고, 충분한 에이징 과정을 거쳐 안정화 시킨 골재에 대하여 사용하도록 하고 있다. 단, 본 규정에서는 EFS잔골재의 전공정에 있어서 환원슬래그가 혼입되지 않는 시스템을 갖춘 공장에서 제조된 것으로 한정하고 있기 때문에 콘크리트용 골재로 사용하기 위해서는 품질관리에 있어서 충분히 주의해야 할 필요가 있다. 특히, 이와 관련하여 EFS잔골재를 콘크리트용 잔골재로 일부 치환 사용한 콘크리트 구조물에서 팝아웃현상 발생하는 실례가 보고되고 있어 골재생산 및 관리 등 품질관리에 있어서 특별한 주의가 요구된다.

본 연구에서는 국내에서 팝아웃이 발생한 국내 건축물의 조사사례를 통하여 팝아웃의 원인이 전기로슬래그에 의한 것임을 확인하는 분석방법 및 이에 의한 발생 균열 및 메카니즘을 정리 하고, 검증실험에 의해 팝아웃 현상이 발생한 부재의 안전성을 유지·보완할 수 있는 실현 가능한 적정 보수공법을 제시하고자 하였다.

\* Corresponding author

E-mail: gcllee@kict.re.kr

## 2. Pop-out 발생 원인 분석

### 2.1 Pop-out 현상 관찰

반응성 골재의 사용에 의한 콘크리트의 팽아웃현상 발생은 골재 중에 돌로마이트 클링커의 수화팽창, 사문암 셰석을 사용한 콘크리트에 주로 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 제강 슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하는 경우에도 팽아웃이 발생할 수 있는 것으로 보고되고 있다<sup>3)</sup>.

본 조사대상의 팽아웃현상은 Fig. 1 및 2와 같다. 즉, 팽아웃의 발생형상은 최대깊이가 콘크리트 표면에서 약 10mm내외로 원추형이며, 면적은 최대직경이 약 40mm내외 원형의 형태로 발생하였다. 또한, 표면박락부분은 팽아웃 중심부에 백색, 회색 및 황색 분화물질이 존재하는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 1 Example of pop out on concrete surface

### 2.2 Pop-out 원인 분석

팽아웃 결함의 원인을 규명하기 위하여 실구조물에서 팽아웃이 발생된 중심부의 분화물질을 채취하고 그 성분 조사를 실시하였으며, 성분 분석으로는 EDX 및 열분석(TG-DTA)분석을 실시하였다.

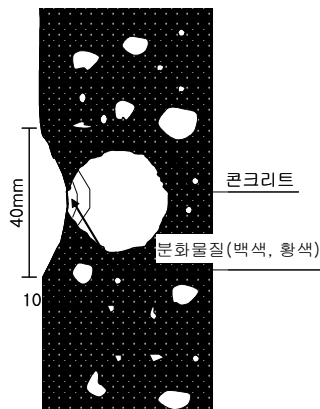


Fig. 2 Sectional view of pop-out phenomenon

Table 1 EDX analysis result of reaction product

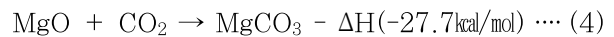
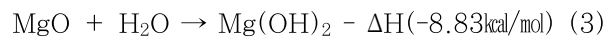
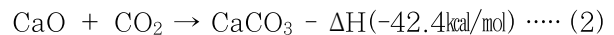
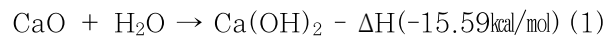
Specimen	Major chemical composition (wt%)							
	Ca	Si	Al	Le	S	K	Mg	Cr
A	75.7	4.35	1.68	1.18	-	-	10.5	-
B	77.9	4.46	1.83	-	-	-	9.73	-
C	67.8	9.09	8.96	-	-	-	2.29	6.49

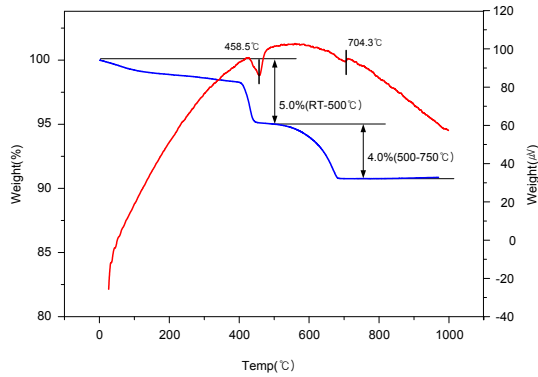
Table 1은 EDX시험에 의한 분석결과이고, Fig. 3은 열분석 결과를 나타낸 것으로 시험편수는 3개의 샘플에 대하여 각각 실시하였다.

Table 1에 나타난 것처럼 팽아웃 원인물질의 주성분은 Ca임을 알 수 있었다. 또한, Fig. 2의 열분석 결과로서 1차 피크는 대체로 450°C 전후에서 발생하였으며, 2차 피크는 700°C 전후에서 발생하였다. 1차 피크 450°C부분의 피크는 수화물 중 Ca(OH)<sub>2</sub>내에 존재하는 OH-가 증발하면서 발생하는 중량감소에 의한 것으로서 반응생성물의 주성분은 Ca(OH)<sub>2</sub>임을 알 수 있었으며, 700°C 전후에서 발생한 미세한 피크는 점토질 계통(dickite)의 원료에 의한 것으로 분석된다. 다만, 시료간의 차이가 관찰되는 것은 팽창 원인물질의 조성차이에 기인한 것으로 추정된다.

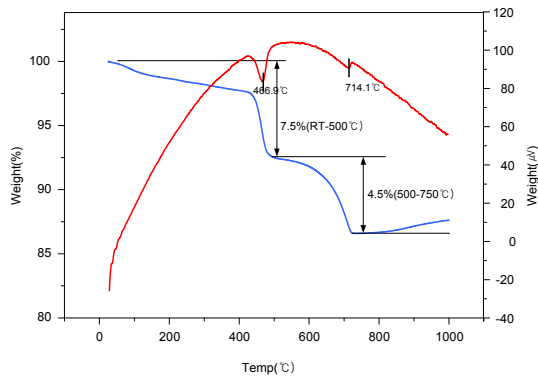
실제로 철의 제강시 내화물의 침식 억제 및 불순물 제거를 위해 부원료로 첨가되는 석회석(생석회) 및 돌로마이트에 의해 슬래그가 발생되며, 이 슬래그 중 35~40%는 CaO이며, 4% 정도는 MgO이다. 이중 free CaO 및 free MgO는 각각의 0.3% 정도로 미량인 것으로 보고되고 있다<sup>3)</sup>.

또한, 통상 CaO는 다음의 식 (1) 및 (2)와 같이 물이나 이산화탄소와 접촉되면 부피가 2배 정도 팽창하는 특징이 있다. 또한, 결함 원인물질에 포함되어 있는 MgO역시 유사한 반응결과를 나타낸다.

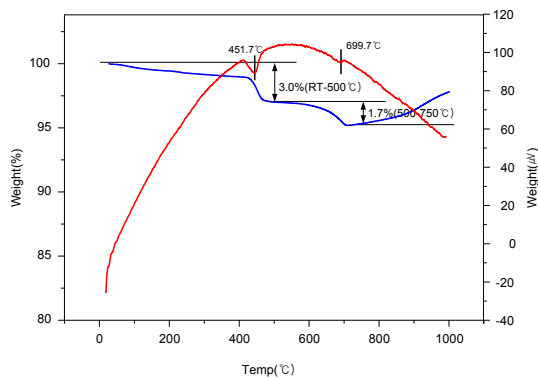




a) A(Peak1 : 458.5, Peak2 : 704.3)



b) B(Peak1 : 466.9, Peak2 : 714.1)



c) C(Peak1 : 451.7, Peak2 : 699.7)

※ Analysis condition

- ① Test range : normal temperature ~ 1000.0°C
- ② Temperature rising rate : 10.0°C/min
- ③ Test condition : in Air(100 mL/min)

Fig. 3 TG-DTA analysis result of reaction product

### 3. Pop-out에 대한 보수공법의 성능확인

반응성 골재의 사용에 의해 발생한 콘크리트의 열화중 진행 가능성이 있는 구조체의 보수 방법은 표면도포, 표면 함침 등에 의한 유기질 표면처리 방법 및 단면치환 또는

이들을 병행하는 방법이 대표적이다<sup>4)</sup>. 그러나, 콘크리트 내부에도 존재하는 물과의 반응조건을 표면처리만으로 완전하게 억제하기는 곤란하다.

이에 본 사례에 대해서는 팽아웃이 집중된 부위나 부재 전체 면적 대비 열화면적 발생률이 높은 부위에 대해 폴리머 보수 모르타르에 의해 단면을 치환하는 단면복공법으로 보수방안의 기본을 정하고<sup>5)</sup>, 표면에 이산화탄소 및 수분의 침투가 억제될 수 있도록 유기질 표면처리를 병행하는 방법을 대안으로 채택하였다.

또한, 위 공법이 팽아웃에 대한 적정공법인지를 확인하기 위하여 팽아웃 원인물질의 분말을 수팽창 캡슐에 충전하여 콘크리트 내부에서 분화시키는 상황을 재현하고 그에 대한 보수 모르타르의 저항성능을 확인하고자 하였다.

### 3.1 보수깊이의 산정

콘크리트 표면의 팽아웃 결함 보수를 실시함에 있어서 콘크리트 표면으로부터 어느 정도의 깊이까지 치핑(chipping)한 후 보수를 실시하는 것이 타당한가에 대해 적정보수깊이를 산정하기 위하여 비선형 FEM 해석을 실시하였는데 본 연구에서 이용한 FEM해석은 RC구조물 전용 해석 시스템인 Total- RC 프로그램을 이용하였으며, 비선형 FEM 해석을 위하여 Fig. 4에서와 같이 요소 분할을 실시하였다<sup>6)</sup>.

이 때, 팽창 원인물질의 입자 크기를 변수로서 다양하게(1mm, 2mm, 3mm, 4mm) 대응시킬 수 있도록 팽창부는 구형으로 계획하였다.

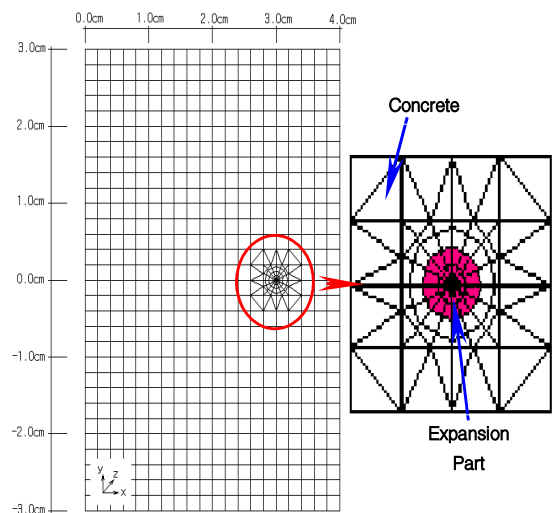


Fig. 4 Mesh partiton of analytic model

또한, 팽아웃을 일으키는 원인물질의 팽창을 해석적으

로 표현하기 위하여 팽창부의 팽창률 0.8%를 선팽창계수로 적용하였다. 여기서, 팽창률은 전기로 슬래그의 수침 팽창률(KS F 2580 “철강슬래그의 80℃ 수침팽창 시험 방법”에 따름) 평균이 0.16%이며<sup>7)</sup>, 이 중 전체의 20% 정도를 차지하는 2mm 이상의 슬래그 입자 크기에서 팽창 반응이 일어나는 점에 착안하여 설정된 값이다<sup>9)</sup>. 이 때, 온도하중은 1℃ 가하여 순간적인 팽창이 이루어지도록 하였다.

해석에서 사용한 콘크리트의 인장파괴에 대한 비선형 재료모델은 Fig. 5와 같다. 콘크리트 인장균열의 경우, 강도별로 계산된 인장강도에 도달하면 순간적인 응력해방이 일어나도록 동시 해방형 모델(Simultaneously Release Model)을 적용하여 해석을 실시하였다.

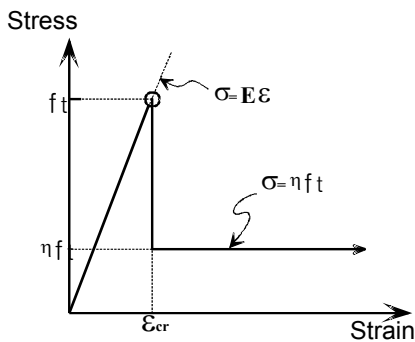


Fig. 5 Nonlinear constitutive model in concrete

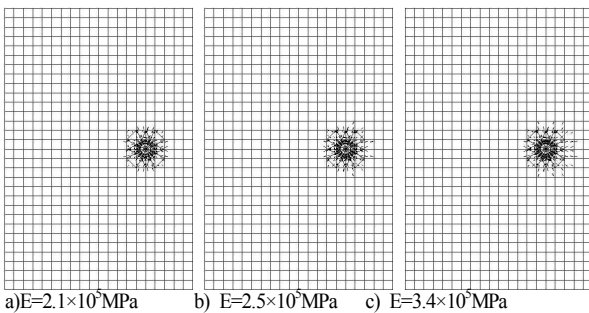


Fig. 6 Elastic modulus alteration of electronic furnace slag to examine expansion crack limits

먼저, 콘크리트 표면에서 팽아웃을 일으키는 원인물질(전기로 슬래그)의 정확한 물성값이 없으므로 현장조사를 통하여 알게 된 평균적 입자크기를 대상으로 역해석을 실시하여 팽아웃 원인물질의 탄성계수를 추정하였다.

즉, 현장에서는 수많은 팽아웃이 발생되어 있으며, 그 중 열화 정도가 가장 심한 경우는 깊이 9.8mm에 열화 중

심부의 분화물질 핵 지름이 2.1mm이다. 동일 핵 지름 이상인 경우에도 열화 깊이가 작은 경우는 수없이 많이 존재하지만, 그보다 열화 깊이가 큰 경우는 존재하지 않았으므로 2.1mm 분화 핵 지름에서 팽아웃이 발생할 수 있는 한계 깊이가 9.8mm 정도라는 가정을 수립한 것이다.

이 때, 콘크리트의 압축강도는 21MPa, 탄성계수는  $2.1 \times 10^5$ MPa로 현장 조건에 따라 설정하였다. 상기 가정을 바탕으로 전기로 슬래그의 탄성계수를 추정된 역해석 결과, Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 전기로 슬래그의 탄성계수가 약  $3.4 \times 10^5$ MPa에 도달하였을 때 전기로 슬래그의 팽창에 의한 균열이 콘크리트의 표면까지 도달하는 것으로 나타났다.

역해석을 통하여 알게 된 전기로 슬래그의 탄성계수를 근거로, 전기로 슬래그의 입자크기(1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm) 및 콘크리트의 강도(21MPa, 24MPa, 30MPa, 50MPa)를 변수로 하여 변수별 최대 팽아웃 깊이를 알아보았다.

Fig. 7은 전기로 슬래그의 입자크기 3mm, 콘크리트 강도 30MPa인 경우의 콘크리트 깊이별 균열발생 차이를 예시한 것이다.

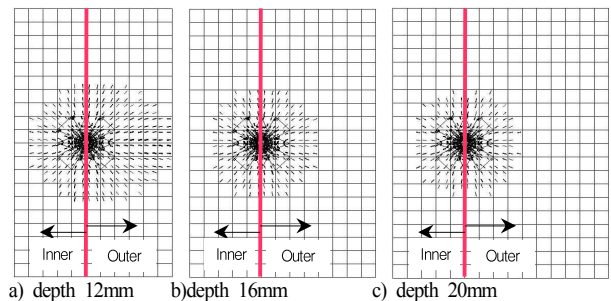


Fig. 7 Crack occurrence condition by location of electronic furnace slag

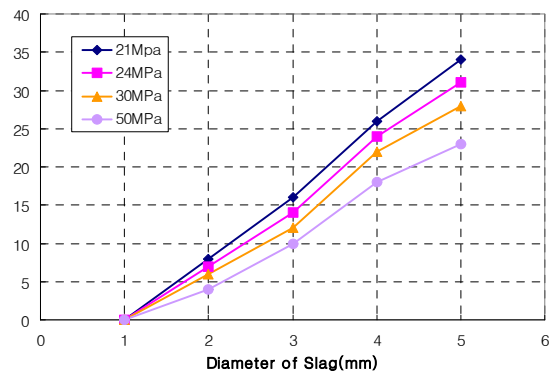


Fig. 8 Analytic result with size of electronic furnace slag and concrete strength

동 그림에서 보는 바와 같이 원인물질이 위치한 깊이에 따라 균열발생 범위 등, 그 양상이 상당히 달라지는 것을 알 수 있다.

해석결과, 콘크리트 강도가 낮을수록, 전기로 슬래그의 입자가 클수록 팽아웃을 일으키는 임계깊이가 깊어지는 것이 확인되었다. Fig. 8은 콘크리트 강도 및 전기로 슬래그의 입자크기를 변수로 한 팽아웃 최대깊이 해석결과를 나타낸 것이다.

이에 따르면, 대상 건물의 콘크리트 강도가 21MPa였을 때, 전기로 슬래그의 입자 크기가 2mm인 경우에는 깊이 약 8mm, 입자 크기 3mm인 경우에는 깊이 약 16mm, 입자 크기 4mm인 경우에는 깊이 약 26mm 전후에 전기로 슬래그 입자가 존재할 경우, 팽아웃이 발생할 가능성이 있는 것으로 해석된다.

콘크리트 내에 존재하는 전기로 슬래그의 최대 입자 크기를 5mm로 간주하고, 적정 보수깊이를 산정하기 위하여 별도의 비선형 FEM 해석을 실시하였다.

이 때, 보수 모르타르(단면복구 폴리머 모르타르)의 강도는 50MPa로 가정하였으며, 원인물질의 입자크기는 잔골재 허용크기인 직경 5mm로 고정하고 원인물질로부터 표면까지의 거리를 변화시켜 가며 균열발생 상황의 변화를 알아보았다.

해석결과, 원인물질의 직경이 5mm일 때, 팽아웃이 발생할 가능성이 있는 콘크리트 표면으로부터의 최대깊이는 약 23mm 전후인 것으로 나타났다. 이 경우, 표면으로부터의 깊이를 30mm 이상으로 변화시켜가며 해석한 결과, 균열발생이 억제되는 것을 알 수 있었다.

따라서, 보수 모르타르의 강도가 50MPa 이상이고, 그 깊이가 30mm 이상을 확보한다면 팽아웃의 발생 억제 효과를 기대할 수 있을 것으로 추정된다.

또한, 콘크리트 내부에서 발생하는 팽창압에 의한 휨인장력에 효과적으로 보수 모르타르가 저항하기 위해 와이어 메쉬 또는 크립트 철망을 보수 모르타르와 복합 시공할 경우, 균열 및 팽아웃 발생 억제효과가 보다 증진될 것으로 기대된다.

### 3.2 보수공법의 성능검토

#### 3.2.1 실험개요

앞서 기술한 바와 같이 팽아웃이 발생한 건축물의 보수 체계는 팽창 원인물질의 제거를 위해 열화부위 파취 후, 보수 모르타르에 의한 단면치환이 주된 보수공법이다.

이를 위해서는 선행된 해석결과에서와 같이 기존 콘크

리트를 표면으로부터 30mm 이상 제거하는 공정이 필요한데, 이 경우 내부에서 팽아웃 원인물질의 팽창력에 저항하던 콘크리트의 응력 역시 해방되고, 반응조건이 갖추어 지므로 추가적인 팽아웃이 발생될 수 있다.

이에 본 절에서는 팽아웃 원인물질의 분말을 수팽창 캡슐에 충전하여 콘크리트 내부에서 분화시키는 상황을 연출하고 그에 대한 보수 모르타르의 저항성능을 확인하고자 하였다.

이를 위해 일반 미장 모르타르에 의한 단면복구와 폴리머 시멘트 모르타르에 의한 단면복구의 성능 비교는 물론, 보강 철물(크립트 철망, KS D 7015) 사용 유무에 따른 내부 팽창압 저항성능의 비교 검정을 수행하였다.

### 4.2 실험체 제작 및 평가방법

단면복구 공법의 팽아웃 보수성능을 확인하기 위하여 압축강도 21MPa, 크기 400×600×150mm의 콘크리트 바탕체에 보수모르타르의 적용을 용이하기 위해 시험체 제조시 상부에 400×400×30mm크기의 단면을 절손시켜 제작하였다.

또한 바탕 콘크리트의 제작은 인위적인 위치에서 팽창 분화시키기 위해 전기로 슬래그를 콘크리트에 포함시키지 않고 잔골재는 세척사 만을 사용하였다. 콘크리트 바탕체의 형상은 Fig. 9와 같다.

바탕 콘크리트의 28일 양생이 끝난 후, block-out된 부분을 그라인딩 하고, CaO의 분화가 발생되도록 전기로 슬래그(로 배출 이후 aging 처리되지 않은 시료) 분말을 충전시킨 수팽창 캡슐과 아크릴 반력판 조합 뭉치를 매 시험체마다 5개소씩 Fig. 10과 같은 형상으로 배치하였다.

수팽창 캡슐에 내재된 전기로 슬래그 분말의 팽창분화를 유도하기 위한 수단은 온도 80℃, 상대습도 98%의 촉진분화 방법을 채택하였다<sup>9)</sup>.

Table 2 Experimental plan

요인	수준	
구조체 목표강도	1	21MPa
보수단면크기	1	400×400×30mm
보수방법	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 일반모르타르 마감(1 : 2)</li> <li>· 폴리머시멘트 모르타르마감</li> <li>· 폴리머시멘트 모르타르 + 크립트 철망 마감</li> </ul>

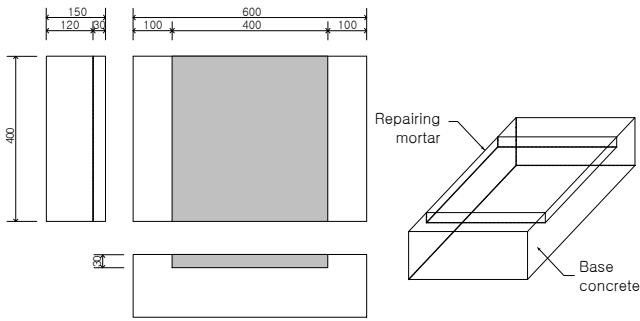


Fig. 9 Detail of base concrete for pop-out resisting test(unit : mm)

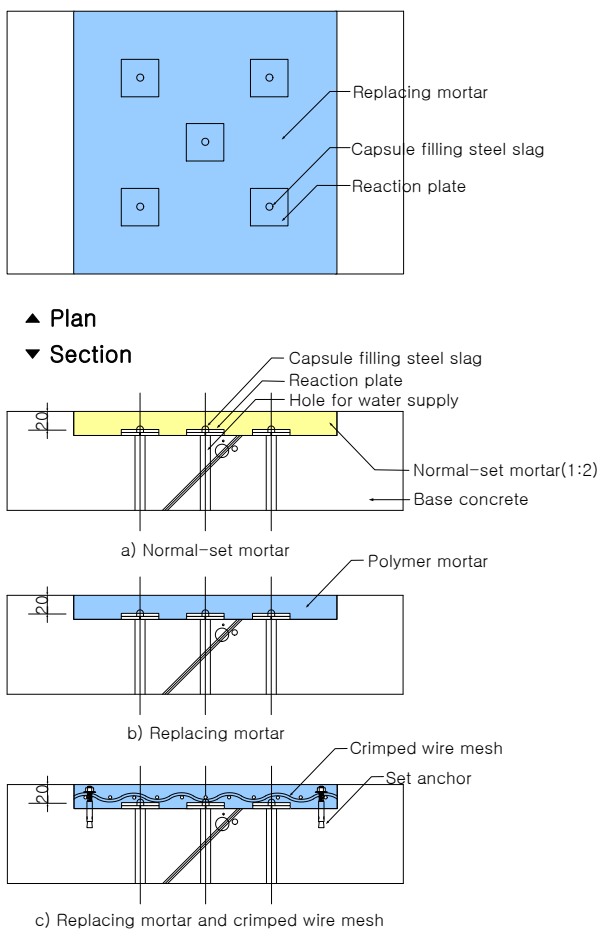


Fig. 10 Experimental patterns of pop-out resisting test

한편, 실험결과에의 평가는 팝아웃 재현 조건인 소정의 축진양생을 진행하다가 팝아웃 발생을 주기적으로 관찰하여 상대적 저항성을 확인하는 방법으로 계획하였다.

#### 4.4 실험결과 및 분석

단면복구 보수 공법의 채용방식을 미장 모르타르, 폴리머 시멘트 모르타르, 또는 크립프 철망 보강 공법으로 변수화하여 팝아웃 저항성을 확인한 결과, 비교용으로 채택된 미장 모르타르의 경우에만 Fig. 11과 같이 보수 표면에 균열 및 들뜸 현상이 발생하였다.

팝아웃 원인물질을 포함시키지 않은 보수 모르타르의 표면에서는 동일 노출 조건에서 전혀 균열 및 들뜸이 발생하지 않았으므로 이러한 열화 증상은 보수재료의 건조 수축 등에 의한 현상은 아닌 것으로 보인다.



Fig. 11 Example of pop-out on normal-set mortar

즉, 시멘트:모래 배합비가 1:2인 미장 모르타르를 20mm 단면치환한 경우에는 팝아웃 직전의 균열 및 들뜸 현상을 관찰할 수 있었으나, 폴리머 시멘트 모르타르를 동일 두께로 단면치환한 경우나 이와 함께 크립프 철망을 보강한 경우에는 팝아웃이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

본 실험에서는 반력판 설치 두께에 의해 유효 보수깊이가 20mm로 제한되었으므로, 실험결과는 선행된 해석결과에서 23mm 깊이의 단면치환이 팝아웃 임계치로 계산되었던 것보다 여유있는 결과를 나타낸 것이다.

이는 보수 모르타르의 28일 발현 평균 압축강도가 57MPa(설계강도 50MPa)이었던 것이 해석상으로 결정된 보수깊이 이내에서 보수 모르타르 저면의 팽창압에 저항할 수 있었던 원인으로 추정된다.

한편, 동일한 조건에서 크립프 철망의 보강 여부에 관계없이 폴리머 시멘트 모르타르로 단면복구한 경우에 균열이나 팝아웃과 같은 열화현상이 관찰되지 않은 점이 특징인데, 이를 통해 크립프 철망의 보강이 필요한 정도로 단면복구 보수 모르타르의 강성이 부족하지는 않은 것으로 판단할 수 있다.



본 연구에서는 기술하지 않았지만, 폴리머 시멘트 모르타르로 10mm 단면치환한 경우에는 비교적 빠른 시기에 팽아웃이 발생하였는데, 이러한 결과들에 비추어 볼 때, 보수 모르타르의 강도를 고려하여 단면치환 깊이가 결정되는 것이 필요하며, 철물에 의한 강성 보강은 내력 확보 측면에서 그 필요성을 무시하여도 무방할 것으로 보인다.

다만, 단면복구 공법은 대부분 뿔칠 공법에 의해 시공되므로 보수 모르타르의 흘러내림 방지나 균열 저항성 증대, 또한 팽창물질의 다량 잔류에 의한 강성 부족의 보완 및 바탕 콘크리트와의 결합력 확보를 목적으로 와이어 메쉬 또는 크립프 철망의 보강(바탕 콘크리트와의 물리적 정착)이 고려되는 것은 바람직한 방안이라고 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 표면에 발생한 팽아웃 현상의 원인 중, 철의 정련 과정에서 부산되는 전기로 슬래그를 콘크리트용 잔골재로 사용하여 초래된 현상을 예로, 그 발생 메카니즘을 규명하는 한편, 보수를 위한 단면 제거 깊이를 FEM 해석으로 도출하고, 기본적인 검증 실험을 통해 확인하였다.

그 결과, 콘크리트 표면의 팽아웃은 잔골재로 사용한 전기로 슬래그 내부에 미량 존재하는 free CaO 및 free MgO가 물과 반응하여  $\text{Ca(OH)}_2$  및  $\text{Mg(OH)}_2$ 를 생성하면서 부피가 약 2배 정도 팽창하였던 것이 주 원인을 확인하였다.

이러한 팽창력은 콘크리트의 인장응력에 의해 구속되지만, 그 구속력이 미치지 못하는 깊이 이내에서는 균열이 발생하고 팽창력이 가중되어 팽아웃으로 이어지는 결과를 초래한다. FEM 해석결과에서는 전기로 슬래그를 5mm 이하로 선별하여 콘크리트용 잔골재로 사용한 경우에도 콘크리트 표면으로부터 30mm 이상의 깊이까지도 팽아웃이 발생될 수 있음을 추정할 수 있었다.

이에 대한 대책으로는 구조 부재의 안정성이 확보되는 위치까지 콘크리트 단면을 치환하여 잠재된 팽창원을 제거하는 것이 필요하며, 압축강도 50MPa 이상의 폴리머 모르타르를 사용하여 30mm 정도 단면 복구하는 보수 공법이 유효함을 확인하였다. 이 경우 해당 반응의 매개 물질인 물과 이산화탄소가 콘크리트 내부로 침투되는 것의 억제효과를 배가시키기 위해 표면처리 공법을 병행하는 것이 효과적일 것으로 제안한다.

한편, 보수 모르타르는 대부분 슛크리트 또는 뿔칠 공법 등에 의해 시공되는 특징이 있으므로 보수용 모르타르

의 흘러내림 방지 및 내부 팽창압에 대한 휨저항성 보강, 균열 억제 효과 등을 위해 와이어 메쉬 및 크립프 철망 등을 병용하는 것도 보수 효과를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 1) 대한건축학회, “건축공사 표준시방서”, 2007
- 2) 한국표준협회, “KS F 4571 콘크리트용 전기로 산화 슬래그 잔골재”, 2007
- 3) 손진근외 3인, “스테인레스 제강슬래그의 골재 활용연구” RIST연구논문 제13권 제3호, pp.245 ~ 252, 1999
- 4) 한국시설안전기술공단, “콘크리트 구조물의 균열, 누수 보수·보강 전문 시방서”, 2000
- 5) 株式會社建築技術, “建物の劣化診断と補修改修工法”, 建築技術増刊, Vol.4 No.482, pp.20 ~ 33, 1991. 4
- 6) (주)Total Information Service, “콘크리트 구조물 비선형 해석 시스템 Total-RC 이론 및 사용자 매뉴얼”, 2000
- 7) 문한영외 1인, “콘크리트용 골재로서 전기로 슬래그의 적용성에 대한 연구”, 콘크리트학회논문집 제11권 3호, 1999.06, pp.101 ~ 111
- 8) 이정국외 3인, “전기로 슬래그를 이용한 시멘트 모르타르의 강도성상”, 대한건축학회 학술발표논문집 제21권 제1호, 2001.04, pp.345 ~ 348
- 9) 이훈하, “황목사 분화 저감기술 개발”, 포항산업과학연구원, 2005