引張主筋이 腐蝕한 RC梁의 耐力性能 評價에 관한 硏究

Study on Evaluation of Strength Properties of RC Beams Damaged by Corrosion of Tension Main Rebar

이 한 승*

Lee, Han Seung

ABSTRACT

This study was carried out to investigate quantitatively the relationship between the degree of rebar corrosion and the strength of reinforced concrete beams. After producing equations for the relationship between both the tensile properties of rebars and bond properties and the corrosion percentage of rebars. Finite element analysis and bending tests were conducted for RC beams damaged by corrosion of tension main rebar. As a result, it was made that the strength of RC beams damged by corrosion could be practically simulated by FEM using experimentally determined material representing the bond properties and the mechanical properties of corroded rebars.

1. 서 론

경년열화한 RC조 건축물의 구조성능에 관한 연구는 재료분야 및 구조분야가 교차하는 연구분야 이기 때문에 계통적인 연구는 거의 없는 실정이고 현상에서는 건축물의 물리적 성능에 기초한 내용성 및 수명 판정은 불가능한 실정이다. 또한, 철근이 부식한 RC구조부재는 철근의 부식원인을 조사한 후 적절한 보수를 실시하는 것이 일반적이나, 철근의 부식정도에 따라서는 보수와 함께 보강을 할 필요가 있고 그 판단 근거로서 철근의 부식정도와 RC구조부재의 구조성능과의 관계를 명확히 할 필요가 있다. 이러한 철근이 부식한 RC구조부재의 내력저하 원인은 피복콘크리트의 균열발생에 의한 콘크리트의 유효단면적의 감소, 철근의 단면감소에 따른 철근의 역학적 성능의 저하 및 철근과 콘크리트의 부착성능의 저하를 들 수 있다. 따라서, 철근의 부식정도를 변수로 하는 각 재료요소의 구성칙을 도출하면 유한요소법(FEM)을 이용하여 철근이 부식한 RC구조부재의 내력저하 메카니즘을 명확히 할 수 가 있다고 생각된다[1]. 그러나, 철근 부식에 따른 RC구조부재의 내력저하 현상을 정성적으로 검토한 연구는 이루어 지고 있으나 FEM해석에 적용가능한 정량적인 연구는 거의 없는 실정이다[2].

본 연구의 목적은 철근이 부식한 RC보의 내력성능을 유한요소해석에 의해 예측 할 수 있는 시스템을 개발하는 것이다. 실험에서는, 철근의 부식정도를 변수로하는 철근 및 철근과 콘크리트의 부착요소의 구성칙을 도출하기 위하여 철근의 인장시험 및 인발 부착시험을 실시하였다. 또한, 철근요소 및 부착요소의 구성칙을 이용하여 RC보의 유한요소해석을 실시하고 그 결과를 철근이 부식한 RC보의 재하 실험결과와 비교하여 각 재료구성칙의 타당성을 검증 하였다.

* 정회원, 한양대학교 초대형구조시스템연구센터 연구 조교수

2. 철근이 부식한 RC보의 유한요소 해석 방법

2.1. 부식철근의 구성칙

일반적으로 FEM해석에서 사용하는 철근의 모델은 그림 1에 나타내는 바와 같이 Bi-Linear모델을 사용하고 있으며 그 구성칙은 철근의 항복점 및 탄성계수로 구성되어 있다. 따라서, 철근의 부식정도를 식(1)과 같이 부식중량감소율 (Δw)로 표현하고 부식철근의 항복점 및 탄성계수를 철근의 부식정도를 변수로하여 산정하면 부식철근의 구성칙을 작성 할 수가 있다.

$$\Delta w(\%) = \frac{\text{부식구간의 부식감량(g)}}{\text{1cm의 철근중량(g)} \times \text{부식구간길이(cm)}} \times 100 \quad (1)$$

그러나, 그림 2와 같이 부식중량감소율이 동일하더라도 항복점비(건전철근의 항복점에 대한 부식철근의 항복점비 ($\sigma cy/\sigma sy$))는 철근의 부식형태에 따라 다를 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 그림 3과 같이 철근의 공식을 고려할 수 있는 방법으로서 부식철근의 단면적은 건전철근의 단면적과 동일하게 하고 겉보기상으로 부식철근의 기계적 성질을 저하시키는 방법을 사용하였다. 또한, 철근 항복후의 인장경화를 나타내는 제2강성은 탄성계수의 1/1000을 사용하였다[3]. 따라서 부식철근의 구성칙은 부식중량감소율를 변수로하여 식(2), 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\text{항 복 점} : \sigma cy = (1 - \alpha \Delta w) \cdot \sigma sy \quad (2)$$

$$\text{탄성계수} : Ecs = (1 - \beta \Delta w) \cdot Ess \quad (3)$$

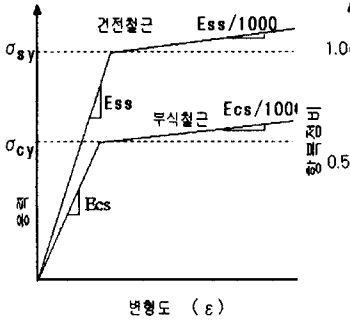

그림1. 부식철근의 구성칙

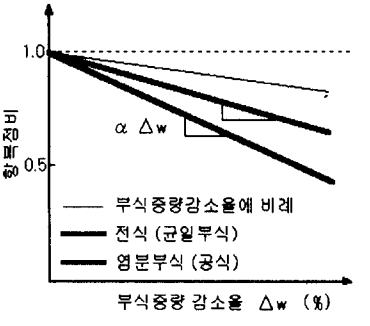

그림2. 부식중량감소율과 항복점비

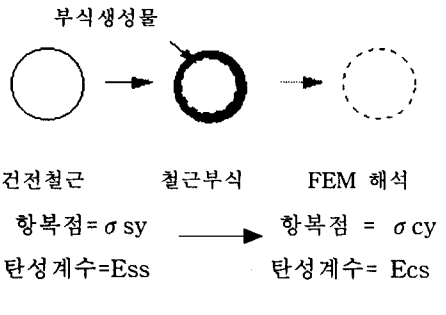

그림3. FEM해석에서의 부식철근 표현

또한, 중성화에 의한 철근부식은 주로 전면균일 부식을, 염해에 의한 철근부식은 주로 공식(pitting)을 발생시키기 때문에, 본 연구에서는 철근의 균일부식을 전식방법에 의해, 공식을 염분을 첨가한 콘크리트에 매설한 철근을 고온건습 반복촉진양생(염분부식)에 의하여 발생시켜 부식정도를 달리한 시험편의 인장시험을 실시하였다. 또한, 부식철근을 10% 구연산 제2암모니움 용액으로 씻어서 부식전후의 중량차로부터 Δw를 산출해 부식철근의 기계적 성질과의 관계를 구했다. 그림 4에 항복점비를 그림 5에 탄성계수비를 (부식철근의 탄성계수/건전철근의 탄성계수) 나타낸다. 동일 부식중량감소율

이라도 염분부식한 철근의 기계적 성질은 전식에 의한 값보다 작은 값을 나타내고 있으며 이것은 염분부식에 의한 공식 발생에 의해 국부부식의 영향이 나타났기 때문이라고 생각된다. 또한, 표 1에 인장시험 결과에 기초한 부식철근의 기계적 성질 산출식을 나타낸다. 따라서, 부식철근의 부식중량감소율을 추정 또는 측정하는 것이 가능하다면 건전철근의 항복점 및 탄성계수를 이용하여 부식철근의 기계적 성질을 산출하는 것이 가능하다. 여기서, α 및 β는 실험정수 이다.

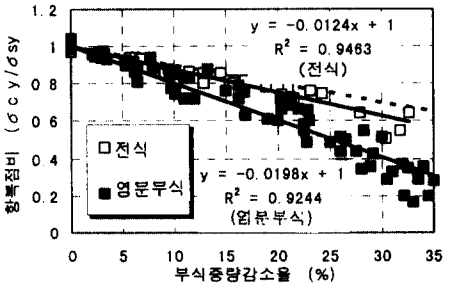

그림 4. 부식중량 감소율과 항복점비와의 관계

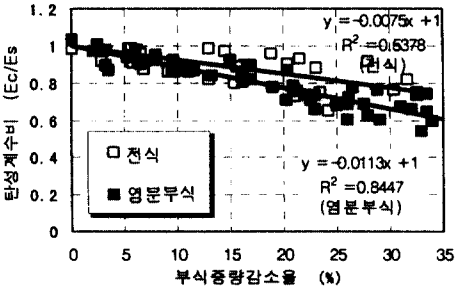

그림 5. 부식중량감소율과 탄성계수비와의 관계

표 1. 부식철근의 기계적 성질의 산출식

기계적 성질	부식형태	부식철근의 기계적 성질의 산출식	저감계수
항복점	균일부식	$\sigma cy = (1-1.24(\Delta W/100)) \cdot \sigma sy$	$\alpha N = 1.24$
	공 식	$\sigma cy = (1-1.98(\Delta W/100)) \cdot \sigma sy$	$\alpha c = 1.98$
탄성계수	균일부식	$Ecs = (1-0.75(\Delta W/100)) \cdot Ess$	$\gamma N = 0.75$
	공 식	$Ecs = (1-1.15(\Delta W/100)) \cdot Ess$	$\gamma c = 1.15$

*항복점, 탄성계수의 산출에는 건전철근의 공칭단면적을 사용한 것으로 겉보기 값임. ΔW:부식중량감소율(%)

2.2. 부식철근과 콘크리트의 부착 구성칙

본 연구에서는 FEM해석에서 사용하는 부착요소로서 그림 6과 같이 부착강도(τmax)와 부착강성(Ds)으로 구성되는 板bond 요소를 사용하였다. 따라서, 철근의 부식정도를 변수로 하여 τmax와 Ds를 산정하면 철근이 부식한 경우의 부착요소 구성칙을 도출 할 수 있다. 또한, 그림 7과 같이 철근부식에 의한 피복콘크리트의 균열발생은 없는 것으로 하고 부착강도 및 부착강성을 변화시키는 것에 의해 피복콘크리트의 균열을 고려하였다. 그림 8에 인발 부착 시험방법을 나타낸다. 철근은 그림 9와 같이 전식방법에 의해 부식시켰으며 그림 10에 부착시험의 인발하중(P)-자유단Slip(S)과의 관계를 나타낸다. 그림 11과 같이 인발 부착시험에서는 재하방향에 따라 부착응력 분포가 생기나, 본 연구에서는 부착구성칙이 탄성체이고(그림 6) 최대응력도달후 변형도의 연화를 고려하지 않기 때문에 최대응력시점까지 철근과 콘크리트의 부착면에 작용하는 평균적인 응력-변형관계를 파악하여 板bond 요소의 구성 파라메타인 τmax와 Ds를 산출 하였다. 또한, 본 연구에서는 그림 15와 같이 인발하중을 철근의 표면적으로 나누어 평균부착응력을 산정하여 τ-S곡선을 작성한 후 여기서 τmax를 산출 하였다. 또한, 자유단 Slip을 板bond 두께 t (본해석 = 1mm)로 나누어 전단변형도 γ를 산출하고 $\tau-\gamma$ 곡선을 작성한 후, 원점과 τmax점과의 구배를 부착강성 Ds로 하였다.

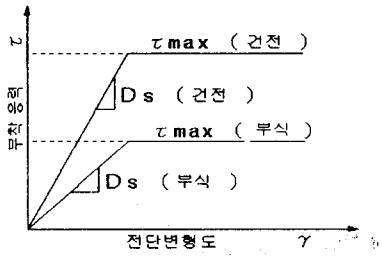

그림 6 板bond 요소의 구성칙

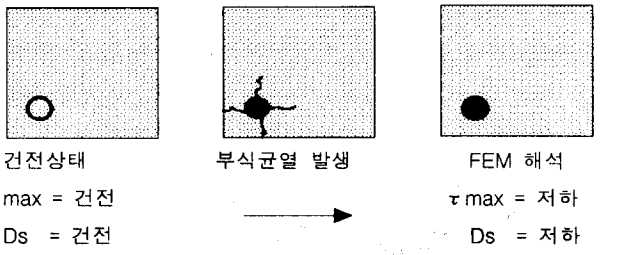

그림 7 FEM 해석에 있어서 부식철근의 부착 표현방법

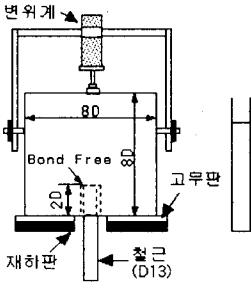

그림 8 인발부착시험

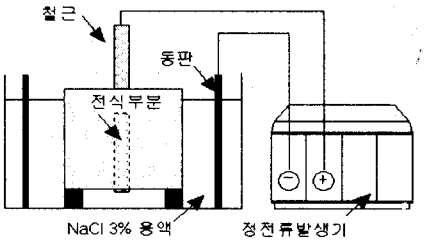

그림 9 전식에 의한 철근부식촉진

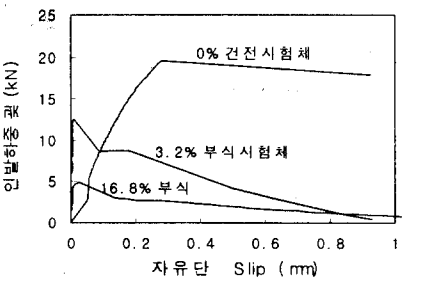

그림 10 인발하중(P)-자유단Slip(S)

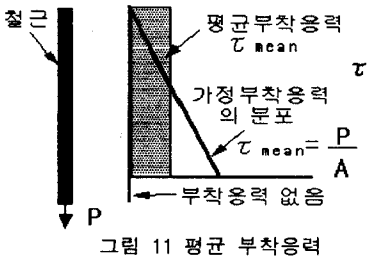

그림 11 평균 부착응력

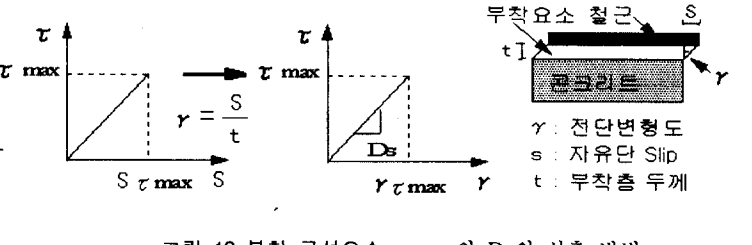

그림 12 부착 구성요소 τ max와 Ds의 산출 방법

그림 13 및 그림 14는 건전시험체(⊿W=0)의 경우, 콘크리트 강도(σ_B)와 τ max 및 Ds와의 관계이다. 또한, 그림 15 및 그림 16에 철근부식에 따른 균열발생 후(⊿W≥⊿Wc), ⊿W와 τ max 및 Ds와의 관계를 나타낸다. σ_B에 관계없이 ⊿W의 증가에 따라 τ max 및 Ds는 감소하고 이들의 상관관계는 매우 높게 나타났다. 따라서, 이들 상관관계를 이용하면 철근부식에 의한 균열 발생 전후의 τ max 및 Ds를 콘크리트의 압축강도 및 부식중량감소율을 변수로 하여 표 2와 같이 나타낼 수 있다.

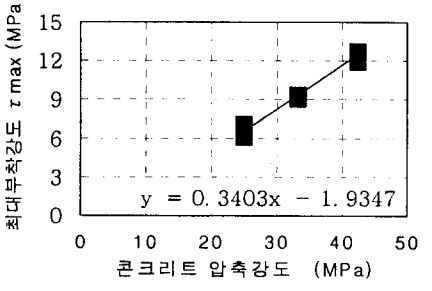

그림 13 콘크리트 압축강도와 τ max와의 관계

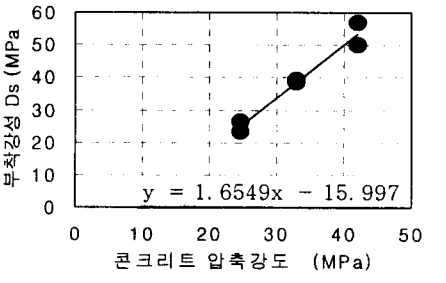

그림 14 콘크리트 압축강도와 Ds와의 관계

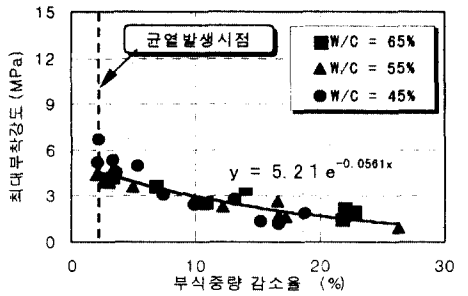

그림 15 부식중량감소율과 τ max와의 관계

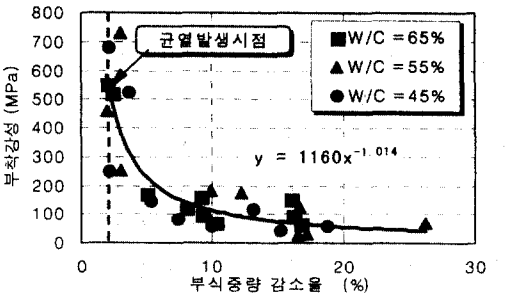

그림 16 부식중량 감소율과 Ds와의 관계

표 2 부식중량 감소율을 변수로 하는 부착요소 (板bond 요소)의 산정식

부식중량 감소율 (%)	최대 부착 강도 (τ max) (MPa)	부착강성 (Ds) (MPa)
ΔW=0	τ max=0.34σB-1.93	Ds=1.65σB-16
ΔW≧ΔWc	τ max=5.21e$^{0.0561\Delta W}$	Ds=1160ΔW$^{-1.014}$

3. 철근이 부식한 RC보의 정적재하 실험 및 유한요소 해석

3.1. 실험 및 FEM 해석의 개요

그림 17에 시험체의 형상 및 재하방법을 나타낸다. 또한 인장주근의 부식정도는 그림 18의 전식방법으로 적산전류량에 의하여 조절하였다. 실험종료후 인장철근을 잘라내어 10% 구연산제2암모니움 용액으로 녹을 제거하고 건전철근과의 중량차로부터 부식중량감소율을 산출 하였다. 또한 시험체의 FEM해석에서는 지지점등의 대칭성을 고려하여 그림 19와 같은 요소분할로 보의 좌측 반을 해석 대상으로 하였다. 해석방법은 재료의 비선형성을 고려하여 2차원 평면응력 탄소성해석으로 하였고 변위증분법을 이용하여 해석을 실시하였다. 또한, 각 재료물성은 철근의 부식정도에 따라 2장에서 구한 재료의 구성칙을 이용하여 산출한 재료정수를 입력하였다.

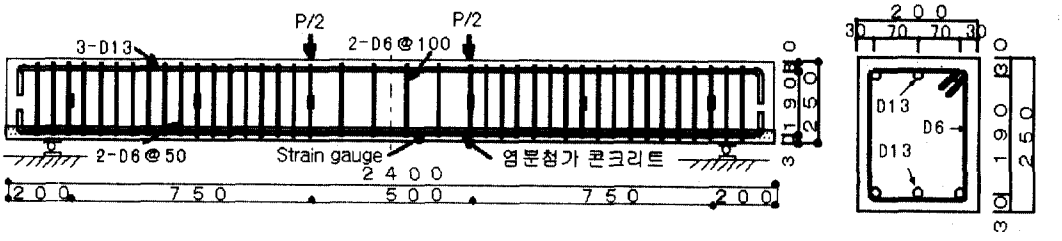

그림 17 시험체의 형상 및 재하방법

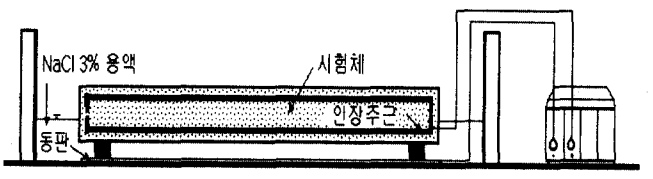

그림 18 시험체의 전식방법

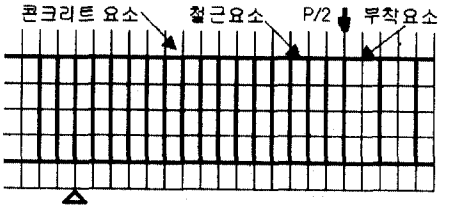

그림 19 시험체의 요소분할

3.2. 결과 및 고찰

그림 20에 건전시험체 및 부식시험체의 붕괴후의 균열성상을 나타낸다. 휨균열은 건전시험체와 마찬가지로 FEM해석에서도 전단구간까지 분포되어 있고 압축콘크리트의 압괴가 나타나 실험결과와 좋은 일치를 보이고 있다. 또한, 철근부식에 의한 부착성능의 저하로 인해 휨균열은 재하구간에 집중되어 있고 휨균열발생도 적게 나타나 실험결과와 일치를 보였다. 또한, 그림 21는시험체의 하중-변형관계를 나타낸다. 건전시험체의 경우 FEM해석결과는 실험결과와 좋은 일치를 보여주고 있고 입력된 각 재료요소의 물성치 및 FEM해석방법의 타당성이 검증되었다. 한편, 부식시험체의 경우 FEM해석결과는 철근부식에 의한 부재의 항복점 저하를 잘 표현하고 있다. 따라서, 2장의 부식중량감소율을 변수로하는 철근요소와 부착요소의 재료물성 산출식으로부터 계산한 철근과 부착의 재료물성을 입력하는 것에 의해 철근이 부식한 RC보의 내력성능을 해석적으로 평가하는 것이 가능 하였다.

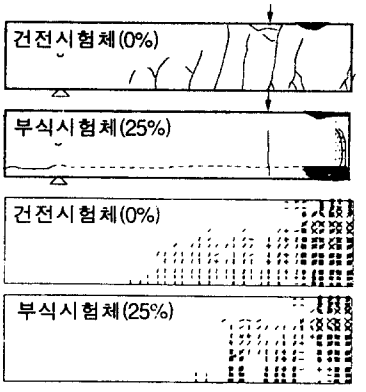

그림 20 시험체 붕괴후의 균열성상

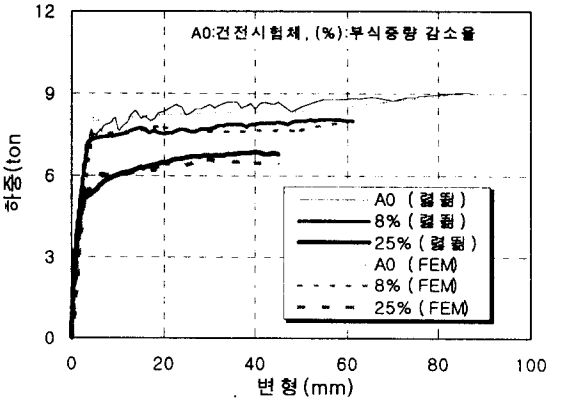

그림 21 하중 - 변형 관계

4. 결 론

이상의 실험 및 해석을 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) FEM 해석에서 필요한 철근요소의 구성 파라메타인 항복점 및 탄성계수를 부식중량감소율 및 부식형태에 따라 계산할 수 있는 산출식을 도출 하였다. 또한, 부착요소의 파라메타인 부착강도 및 부착강성을 계산 할 수 있는 산출식을 철근의 부식중량감소율을 변수로 하여 도출 하였다.

2)철근요소 및 부착요소의 재료물성을 부식중량감소율을 변수로하는 산출식으로부터 계산해 철근이 부식한 RC보의 FEM해석에 적용한 결과, 그 해석결과는 정적재하 실험결과와 좋은 일치를 보여 각 재료물성 산출식의 타당성을 검증하였다. 따라서, 철근이 부식한 RC보의 철근의 부식정도를 조사하면 FEM해석에 의해 그 내력성능을 평가하는 것이 가능하다고 판단된다.

참고문헌

1.橘吉宏,"鐵筋腐蝕によって損傷を受けたRC梁の擧動に關する考察", 土木學會論文集, 第402号 , pp.105-114, 1989.2

2.G.J.Al-Sulaimani외 3인,"Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of RC members, ACI Structural Journal, pp.220-231, 1990

3.鈴木紀雄,"RC構造の非線形FEM解析のためのガイドライン(2)", コンクリート工學, Vol.31, No.9, 1993.9