

콘크리트 장대 교량의 구조해석 기법

교량하부구조 해석 및 설계
- 스트럿-타이 모델 소개 -

Analysis and Design of Bridge Substructure
- Introduction of Strut and Tie Model -



박 찬 민 *

1. 서 론

종래 장경간 교량의 개념이 경간장 50m 이상이라고 할 때, 요즘에는 별 감흥이 있을 수 없다. 구조해석의 발달과 시공기술의 발달로 마음만 먹으면, 물론 용기와 비용이 문제이긴 하지만, 세계 최장의 교량을 건설하는 것도 무리는 아니기 때문이다.

하부구조에 관한 원고청탁을 받고서 당혹함을 느끼면서도 막연히, 평소에, 하부구조에 적극적으로 스트럿-타이 방법(strut and tie method)을 도입하면 어떨까 하는 선부론 의지가 있어 그 한 예로 교각과 말뚝기초의 확대기초(pile cap)에 대해 여

리 문헌을 참고하여 그 타당성을 검토하는 것으로 방향을 잡았다.

스트럿-타이(strut and tie) 모델은 잠재적으로 모든 구조기술자들에게 운용되어 온 것이다. 다만 J. Schlaich도 언급하였듯이 이제 구체적으로, 표면적으로 적용하는 것이 남아있을 뿐이다.

모두가 심증은 가면서도 확신이 없기 때문에 남들보다는 조금 더 철근을 배근하는 부끄러움이 있고, 또한 대부분이 무슨 이유에서인지 고강도 철근(high strength steel)을 사용하기 때문에 그에 따른 겹이음길이를 생각하면 현행 설계 관습은 비경제적이라 단언할 수 있다. 그렇다고 적당한 근거,

* 정회원, 한국도로공사 특수건설처 책임연구원

또는 대안이 없기 때문에 과감한 결정을 하지 못하고 만다.

다행히, 국내에서도, 특히 콘크리트 학회를 중심으로, 스트럿-타이 모델을 통한 설계법(이하 STM)이 소개되기 시작하고 일부 설계사에서는 이미 상당 수준의 설계능력을 보여주고 있어 STM의 일반화가 어려운 상황은 아닌 것 같다.

설계 전반적인 부분에 대해 적용하는 것은 다소 시일이 걸린다 하여도 유한요소해석을 통하여야만 가능한 부분들에 대해서는, 즉 응력흐름이 휨과 전단만으로 쉽게 파악되지 않는 부분들에 대해서는 적극적인 자세로 임하여야 한다.

2. 확대기초(pile cap)

일반적으로 확대기초는 강제로서의 두께를 확보한다. 장대교량에서 말뚝기초를 사용하는 경우, 말뚝선단에 놓이는 확대기초(pile cap)는 하중 또는 기하 경계조건이 휨부재라기보다는 깊은 보(deep beam)의 거동을 나타낸다.

종래의 설계방법은 ACI 318 개념을 따른 것으로 다음의 두 단계로 나눌 수 있다.

(1) 전단설계(ACI 318-95 11.12, 콘크리트 표준시방서 3편 18.7) - 전단 임계단면에 작용하는 전단력보다 콘크리트의 전단강도가 커지도록 확대기초의 최소두께를 정한다.

(2) 휨설계 - 보로 가정하여 휨임계단면에 대한 종방향 주철근을 결정한다.

그러나 실제 확대기초의 파괴모드는 휨파괴에 앞선 전단파괴의 가능성이 지배적이며, 종래의 설계 개념과는 다소 상이한 거동을 가짐을 보여준다.

STM은 깊은 보 혹은 확대기초의 전단거동을 모사하는데 유용하다. 즉, 어느 특정단면의 힘보다는 구조체 내의 완전한 힘의 흐름을 고려한다.

그림 1은 대칭구조인 깊은 보의 응력흐름을 보여준다. 그림 2는 2:1의 각도로 분산되는 두 개의 동등한 흐름으로 인해 발생하는 인장응력을 보여준다.

그림 3은 말뚝이 4개인 확대기초의 간단한 트러스 모델을 보여준다. Sabnis와 Gogate는 ACI 설계방법에 의거, 1/5 축소모델에 대해 등분포한 철

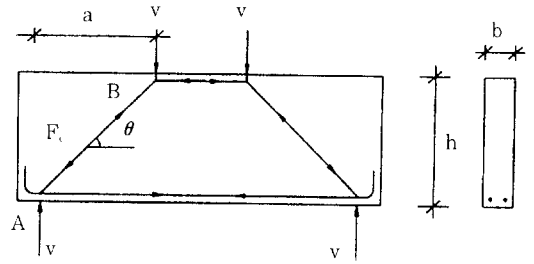


그림 1 깊은 보의 응력흐름

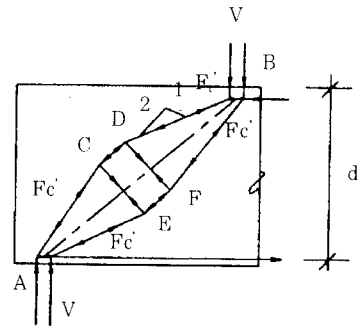


그림 2 확대모델

근량을 변화시키며 파괴실험을 하여 이러한 구조의 전형적인 파괴모델은 그림 4와 같음을 밝혔으며 이는 펀칭전단파괴(punching shear failure)를 뜻한다. 이들은 또한 0.2%의 휨철근량은 필수적이지만 그 이상의 철근은 파괴강도에 별 효과가 없음을 주장하였다.

Collins 등은 말뚝이 4개인 확대기초를 ACI 설계법과 캐나다 설계법(STM 설계)을 따라 배근한

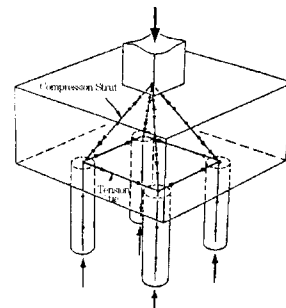
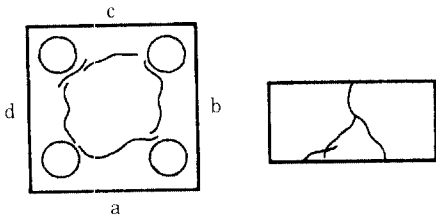


그림 3 말뚝 4개에 지지되는 확대기초



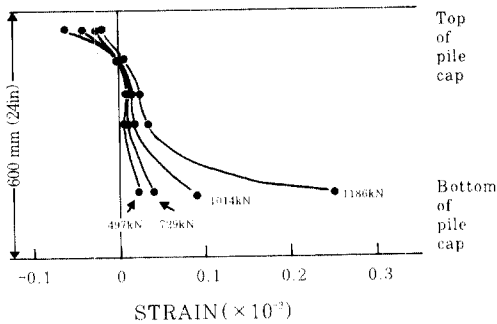
(a) 아래면 (b) 측면

그림 4 파괴형상

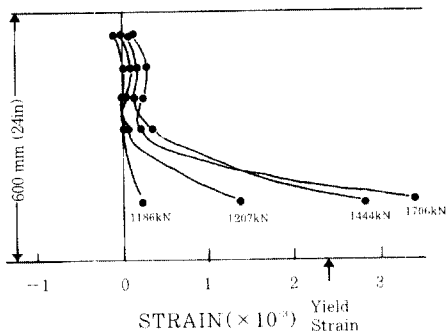
뒤 실험결과와 비교함으로써 STM의 타당성을 입증하였다. 즉,

(1) 깊이와 순지간 비(depth to clear span ratio)가 0.8 이하인 단순보는 변형 전후에 평면을 유지한다는 ACI 가정과는 상반되게 0.4인 확대기초에서 그 변형을 분포는 균열 발생 전후에 비선형성을 보임을 측정을 통해 밝혔다(그림 5).

(2) 보 거동에서 모멘트 분포가 지점에서 0 (zero), 중앙에서 최대가 되고 휨모멘트에 맞추어



(a) 균열 전



(b) 균열 후

그림 5 균열 전후의 변형률 분포

모멘트 팔(arm)은 일정하되 종방향 철근의 인장력이 증가한다. 그러나 측정결과에 따르면 말뚝 선단 즉, 지점의 철근이 최대 인장력의 약 75%를 받는 것으로 나타났다(그림 6). 즉, 말뚝 선단의 철근이 이러한 인장력을 충분히 받을 수 있도록 정착길이를 확보하도록 하는 STM의 개념을 잘 보여주는 한 예이다.

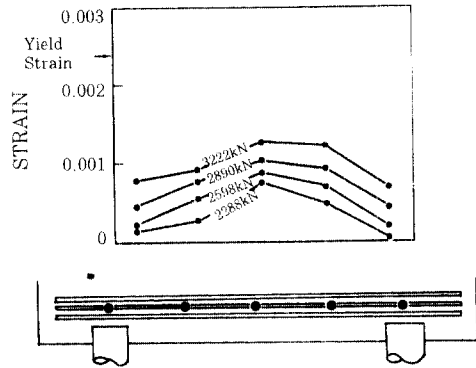


그림 6 철근에 걸리는 변형률 분포

(3) 실험부재의 파괴모드는 편칭전단파괴로 밝혔다. 보이론에 의하여 주인장철근을 확대기초 저면에 고르게 배치하는 것은 같은 양의 철근을 말뚝선단 위에 집중배치하는 것에 비해 약 20% 정도의 파괴강도 저하를 보인다. 또한, 말뚝선단 위의 철근량을 증가시킬 수록 파괴강도가 증가하였다. 즉, 보이론에서(콘크리트시방서 6.11) 2방향 작용에 의한 전단강도는 종방향철근량에 무관하다는 것과 상반된 결과를 보였다. 반면 STM에 의한 철근배근과 strut action으로 표현되는 거동에 잘 일치한다.

(4) 실제 대부분의 확대기초 파괴모드는 스트럿의 확산에 따른 인장발생(그림 2)이 주원인인 편칭전단파괴인 것으로 밝혔으며 균열인장응력과 말뚝선단의 지압응력과의 관계를 연구하여 말뚝선단에서의 지압응력이 $1.0 \sigma_{ck}$ 이하이면 그 파괴를 방지할 수 있다고 주장하였다.

즉, 얇은 확대기초의 경우에는 전단강도가 콘크리트의 두께에 비례하지만, 깊은 기초의 경우 확대기초의 깊이를 증가시키는 것보다 지압면적을 증가시키는 것이 보다 효과적임을 밝혔다.

이러한 지압응력은 유한요소해석 혹은 STM으로

구할 수 있는 값이다. 캐나다 시방에서는 $0.85 \sigma_{ck}$ 로 규정하고 있다.

이와 같이 여러 가지 연구에 의하여 확대기초는 STM으로써 해결하는 것이 바람직하다고 판단하며 STM에 의한 변형된 확대기초 설계 예를 살펴본다.

2.1 휨과 연직력을 받는 확대기초

그림 7과 같이 두 개의 교각을 지지하는 확대기초에서 연직력과 교축방향으로의 휨이 작용할 때 2차원 모델 또는 3차원 모델에 의하여 타이의 인장력을 계산할 수 있다(그림 8).

이 때, 실제 구조계와 이상화된 모델 사이의 구조적 차이를 고려하여 타이의 인장력을 보정하여야 한다(그림 9). 즉, 대칭조건에 의한 경계조건을 고려하여 대칭부에 발생하는 ΔT 와 ΔC 를 계산하고 그림 8(b)에서 $\{T\}^* = T - \Delta C$ 로 조정한다. 그림 10은 위 과정을 거쳐 구한 철근배근 상태를 보여준다.

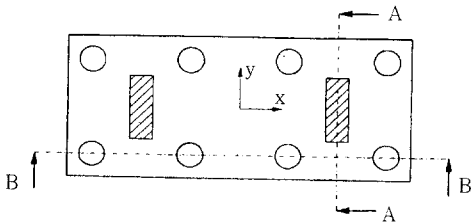


그림 7 확대기초

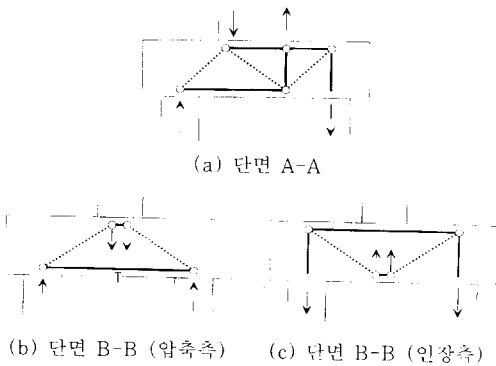


그림 8 스트럿-타이 모델

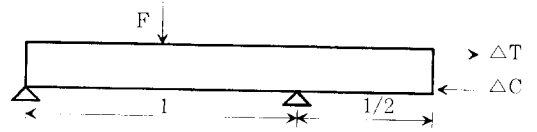


그림 9 대칭경계조건에 의한 추가 내력의 계산

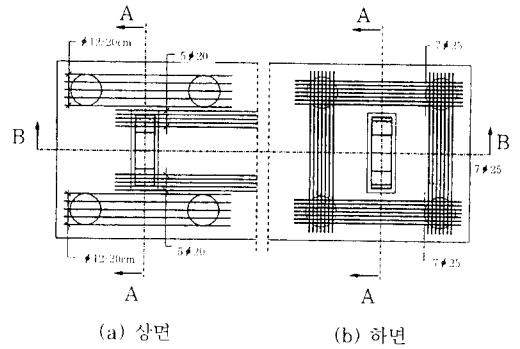


그림 10 확대기초의 철근배근

2.2 말뚝의 강성을 고려하는 경우

암반까지의 도달거리가 상대적으로 긴 경우 큰 상부하중으로 인해 말뚝의 탄성처짐이 만만치 않은 경우가 있다. 이러한 경우에는 그림 11과 같이 탄성지지조건을 검토하여야 할 것이다. 또한 그림 11과 같이 부정정계가 될 때는 유한요소해석의 도움을 받아 처리할 수 있다.

3. 교각 받침부(pier cap)

박스 상부구조의 하중을 받침을 통해 전달받는 교각 상단의 경우 특별한 문제가 있는 구조부는 아니다. 다만 하중집중점에서 병목현상을 보이는 응력의 흐름으로 내부에 과열인장응력(bursting

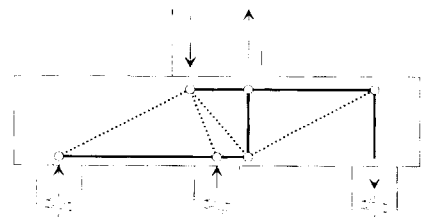


그림 11 말뚝 강성을 고려하는 예

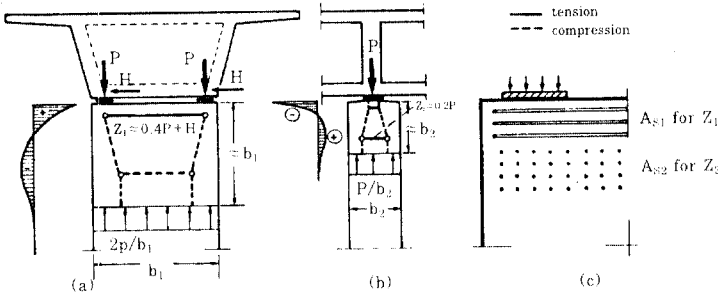


그림 12 교각으로의 하중전달

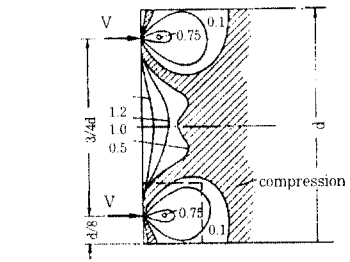


그림 13 파열응력, σ_y 의 분포
($\sigma_0 = \text{Sigma}V/bd$ 의 함수로써)

stress, or splitting stress)이 발생하며 이에 대한 철근배근이 필요한 정도이다.

설계시 오히려 염두에 두어야 할 부분은 유지관리를 위한 배려로서 받침교체시 인상작업이 가능토록 공간을 확보하는 것이 중요하다. 또한 지진지역에서는 면진 또는 내진의 개념이 충분히 검토되어야 한다.

두가지 형태의 교각 상부에 대해 간단히 살펴보면 다음과 같다.

3.1 기본 개념

그림 12와 같이 교각단면이 전 높이에 걸쳐 일정하다면 그 응력흐름은 기존 연구에 의하여 쉽게 알 수 있으며 그림에서와 같이 스트럿과 타이로 구성할 수 있다. 이 경우에도 물론, 스트럿의 압축력 분

산에 의한 인장력(splitting force)을 고려하여야 한다. 3차원 모델을 고려하면 당연히 이 인장력이 분산되어 작아지므로 2차원 모델에 의한 철근배근은 안전측이 된다.

STM에서 타이를 두는 위치는 유한요소해석에 의하거나 Leonhardt 등의 저서에서 얻을 수 있다.

예로서, 그림 12(a)의 경우에 대한 응력선은 그림 13과 같다. 그림 12(b)와 같이 집중하중을 받는 경우에는 정착판과 부재의 단면제원에 따라 그림 14와 같은 거동을 보인다.

그림 14(a)는 단면중심선에서 평균압축응력 $\sigma_0 = V/bd$ 의 함수로써의 인장응력(splitting stress) σ_y 를 a/d 에 따라 나타내고 있다. 그림 14(b)는 인장응력이 시작되는 곳과 최대가 되는 곳을 표시하며 인장력(splitting force), Z 를 V 의 함수로써 나타내고 있다.

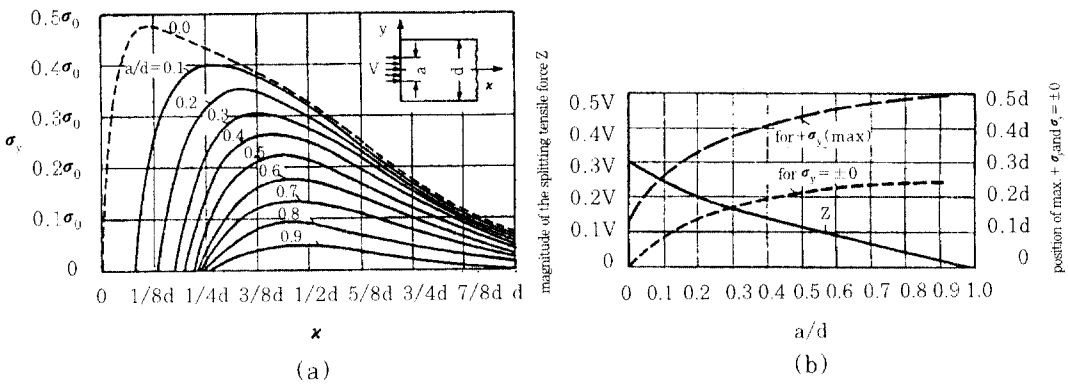


그림 14 파열응력의 분포

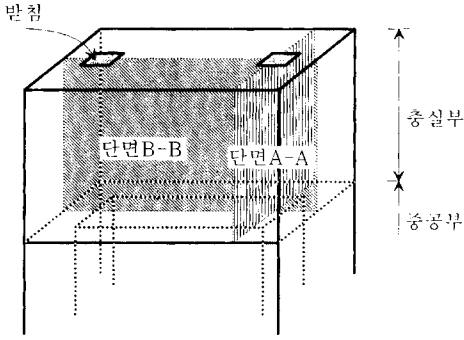


그림 15 단면이 변하는 교각 예

3.2 단면이 변하는 교각

그림 15와 같이 단면이 변할 때, 반침을 통해 전달된 상부하중이 충실부를 통해 중공부까지 전달되는 경로는 매우 복잡해진다. 교각반침에 작용하는 연직반력은 중공부의 벽체에 전달되며 각각의 벽체에 전달되는 반력의 크기는 유한요소해석을 통해 구할 수 있다. 이러한 원리로 단면 A-A, 또는 B-B로서 설계되는 벽체에 작용하는 반침하중을 구하여

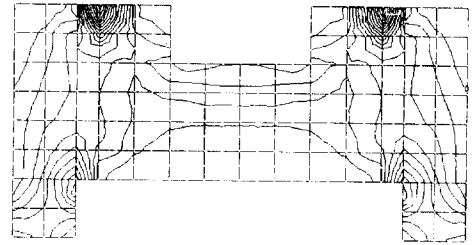


그림 17 단면 B-B의 응력분포

스트럿-타이 모델을 작성한다.

예로서, 단면 A-A 및 B-B에 적용할 수 있는 스트럿-타이 모델은 그림 16과 같다. 단면 B-B의 스트럿-타이를 구성하기 위해 유한요소해석에 의해서 압축응력의 흐름을 그림 17과 같이 얻었다.

그림 B-B에 대한 모델의 예에서 직감할 수 있듯이, 설계자의 감각에 따라 다분히 그 모델링이 변화할 수 있으며 이러한 면이 STM을 사용하는 설계자들에게 신중한 검토 및 검증을 필요로 하는 어려운 부분이다.

4. 결 언

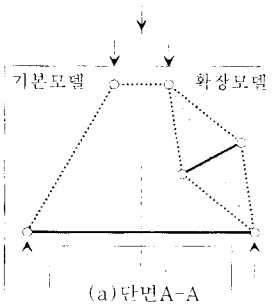
대부분 지진하중이 설계기준이 되는 상황에서, 단지 출력된 결과만에 의하여 거의 무조건적으로 고강도 철근을 선정하게 되는 현행 설계 대신에 합리적이고도 신중한 설계가 이루어진다면 장대교량 혹은 다경간 교량에서는 충분히 경제성을 얻을 수가 있다고 본다.

이러한 확신은 구조물의 정확한 거동을 파악하는 데서 출발하며 하부구조에서도 그 가능성을 찾을 수 있다.

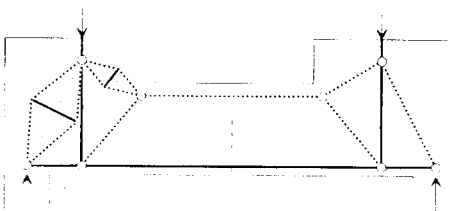
장대교량에 말뚝기초를 적용하는 경우 그 상부하중의 크기로 인하여 확대기초부는 규모가 커지게 되고 깊은 보 거동을 보이게 되며 종래의 휨과 전단 설계로는 그 거동을 올바르게 파악하지 못한다. 반면 STM은 정당성이 있으며 설계자들에게 명쾌한 답을 주리라고 확신한다.

또한 집중하중을 받는 교각상단부도 STM을 통해 그 해를 얻을 수 있는 부분이다.

다만, 국내에 정해진 시방규정이 없고 경험이 부족하여 조심스럽기는 하지만 유한요소해석과의 비



(a) 단면 A-A



(b) 단면 B-B

그림 16 스트럿-타이 모델

교 등을 통한 검증과 외국 사례비교를 통해 한단계씩 접근해야 할 필요가 있다고 판단한다.

여러 가지 항변하고 싶은 것이 많은 국내여건이지만 노선과 모험을 끊임없이 이어가는 설계자들의 노력을 기대한다.

참 고 문 헌

1. Adebar, P., Kuchma, D., Collins, M.P., "Strut-and-Tie Models for the Design of Pile Caps : An Experimental Study," ACI ST V.87, No.1. 1990, pp. 81-92.
2. Schlaich, J., Schafer, K., Jennewein, M., "Towards a Consistent Design of

Structural Concrete," PCI Journal, V.32, No.3, 1987, pp. 1-30.

3. Sabnis, G.M., Gogate, A.B., "Investigation of Thick Slabs(Pilecap) Behavior," ACI Journal, V.81, No.1, 1984, pp. 35-39.
4. ACI 318-95, "Building Code Requirements for Structural Concrete," ACI.
5. IABSE Workshop : Strut-and-Tie Model, Univ. of Stuttgart, 1993, New Dehli, India.
6. Prestressed Concrete-Design and Construction, F. Leonhardt, Wilhelm Ernst & Sohn. □

콘크리트학회 전문서적 보급안내

최신 콘크리트공학(개정판)

■ 한국콘크리트학회 편

이 책은 콘크리트 기본 구성재료의 특성 및 요건 등을 분석하고, 이들 구성재료를 이용한 배합설계, 굳지 않은 콘크리트의 기본성질, 혼합, 운반 및 타설과정의 특기사항, 양생, 콘크리트의 시험, 품질관리, 내구성 뿐만 아니라 최근에 개발되고 있는 새로운 콘크리트의 제조 및 제반 특성에 이르기까지 포괄적인 내용을 실고 있다.

- B5 · 682면/定價 20,000원(회원 10% 할인), 우송시 송료 2,100원 별도부담

고성능유동화제를 이용한 고강도콘크리트의 제조와 특성 및 활용 -본 학회 국제워크숍 교재-

- 집필진 : Pierre-Claude Aitcin, 노재성, Yasuo Tanigawa, 신성우, 오병환
- A4 · 360면
- 보급가 : 회 원 18,000원, 비회원 20,000원

콘크리트 구조물의 진단, 보강 및 유지관리 -제4회 기술강좌 교재-

- 집필진 : 윤우현, Hasegawa Gaoru, 정광량, 오병환, 심종성, 서치호, 연구석, 방명석, 김상석, 이강희, 박승범
- B5 · 368면
- 보급가 : 회 원 18,000원, 비회원 20,000원