

## 3축 가력시스템에 의한 박스형 암거의 파괴거동 분석

Analysis of Failure Behavior of the Box Culvert with 3-Axes Loading System

우 상 균*	권 용 길**	조 준 형***	한 상 훈****
Woo, Sang-Kyun	Kwon, Yong-Gil	Cho, Jun-Hyong	Han, Sang-Hoon

### Abstract

This paper is to investigate the fracture behavior characteristics of box culvert and incremental crack width of upper slab for the incremental loading by the 3-axis loading system. In the 3-axes loading system, loading directions are upper side, left and right side which simulate earth pressure and static traffic load. With the incremental load, crack patterns is investigated on the upper slab, left and right wall. Especially, on the upper slab, crack width is measured by crack gage. Based on the experimental results, structural internal force indices of box culvert are estimated quantitatively.

### 요 지

이 논문에서는 3축 가력상태에 놓인 박스형 암거의 극한파괴실험을 실시하고 박스형 암거의 파괴거동 특성을 파악하고 하중증가에 따른 균열폭의 변화를 측정하였다. 현실적인 외압상태를 모사하기 위해 상부 및 좌,우측부에서 동시에 가력할 수 있는 3축 가력시스템을 이용하여 하중을 재하 하였다. 하중 증가에 따른 상부슬래브 및 좌,우측 벽체에서의 균열양상을 관찰하였으며 상부슬래브에서의 균열폭 증가량을 정량적으로 측정하였다. 이를 통해 균열폭 증가에 따른 구조손상도를 실험적으로 정량화시켜 박스형 암거의 구조내력저하시수를 실험적으로 추정하였다.

**Keywords** : Box culvert, 3-axes loading system, The degree of damage , Structural internal forces index

**핵심 용어** : 박스암거, 3축 가력시스템, 손상도, 구조내력지수

\* 한국전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원

\*\* 충북대학교 건설기술연구소 선임연구원

\*\*\* 한국전력연구원 녹색성장연구소 일반연구원

\*\*\*\* 충북대학교 토목공학과 교수

E-mail : ygkwon@chungbuk.ac.kr 031-477-3661

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

전력구, 터널 등과 같은 지하구조물은 차량이동, 인접 구조물의 신축, 기초지반의 침하 등 다양한 요인들로 인해 상하부 및 측부의 외압이 증가하게 되고 이로 인해 구조물의 변형이 발생한다. 이러한 변형은 지하구조물 내에 균열과 같은 구조적 손상을 발생시키게 되며 발생한 균열은 지하구조물의 내구성을 저하 시킬 뿐만 아니라 지하구조물 내에 존재하는 관련 시설물에도 큰 영향을 미치게 된다<sup>(1)(2)(5)</sup>. 또한, 철근콘크리트 구조물인 박스형 암거의 경우, 타설 초기 단계에서 내포되어 있는 재료수준에서의 미세공극들은 외압의 증가에 따라 확대되고 이로 인해 발생한 균열은 수분의 유입경로를 제공하여 철근을 부식시키는 등 구조물에 치명적인 손상을 야기 시킨다. 이러한 손상의 증가로 인해, 구조물은 급격한 강성저하가 발생하며 구조물의 수명을 단축시키는 결과를 가져오게 된다<sup>(4)</sup>. 따라서 외압의 증가에 따른 균열의 발생과 균열의 진전정도는 구조물의 손상 정도를 파악하고 현재 구조물의 강성을 예측하는데 매우 중요한 요인일 뿐만 아니라 구조물의 수명과 보강대책에 있어 매우 중요한 인자로 인식되고 있다<sup>(4)(7)</sup>.

본 연구는 지하구조물인 철근콘크리트 박스형 암거에 있어, 현재의 손상정도 및 구조물의 강성저하를 판단할 수 있는 정량적인 평가방법을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 본 논문에서는 3축 가력상태에 놓인 박스형 암거의 극한파괴실험을 실시하였다. 실험결과를 바탕으로 박스형 암거의 파괴거동 특성을 파악하고 하중증가에 따른 균열폭의 변화를 측정하였다. 이를 통해 균열폭 증가에 따른 구조손상도를 실험적으로 정량화시켜 박스형 암거의 구조내력저하시수를 실험적으로 추정하였다.

현실적인 외압상태를 모사하기 위해 상부 및 좌, 우측부에서 동시에 가력할 수 있는 3축 가력시스템을 이용하여 하중을 재하하였다. 하중 증가에 따른 상부슬래브 및 좌,우측부 벽체에서의 균열양상을 관찰하였으며, 상부슬래브에서의 균열폭 증가량을 정량적으로 측정하였다. 이를 바탕으로 박스형 암거의

극한파괴 시까지의 거동과 상부슬래브 균열폭과의 관계를 관찰 및 분석하였다.

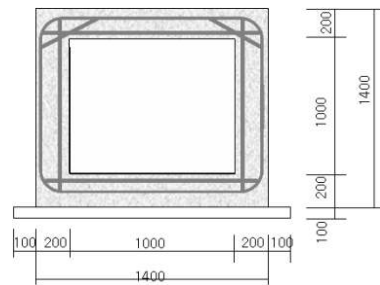
## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

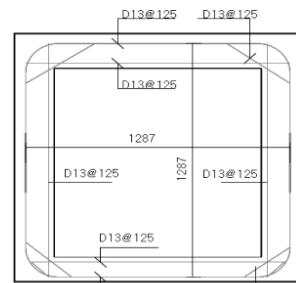
실험체는 보통 포틀랜드 시멘트 1종을 사용하여 제작하였고, 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 박스형 암거의 표준강도인 24MPa를 배합목표강도로 설정하였다. 재령 7일, 28일, 실험당일의 강도를 알아보기 위해 타설과 함께 총 9개의 압축공시체를 제작하였으며 타설 3일 후 수중양생을 실시하였다. 재령 28일에서의 콘크리트 압축강도는 배합강도를 상회하는 26MPa의 압축강도를 나타내었다.

철근의 경우, 항복강도 400MPa의 D13철근을 사용하여 배근하였다.

### 2.2 실험체 형상 및 크기



(a) 실험체 제원



(b) 철근배근도

Fig. 1 실험체 제원 및 철근 배근도

실험체의 형상은 Fig. 1과 같이 실제 사용되고 있는 표준단면을 참고로 하여 대표적인 직사각형 형상(이하 박스형태)을 갖도록 하였으며 표준단면의 1/2 스케일로 제작하였다. 총 3기의 실험체를 제작하였으며 실험체의 제원은 폭 1400mm, 높이 1400mm, 길이 1000mm를 가지며 내부 높이와 폭은 1000mm로 하였다. 측벽과 상하슬래브 모두 200mm의 두께를 가지도록 설계하였으며, D13 철근을 상하부 슬래브 및 측면벽체 모두 동일하게 125mm간격으로 배근하였다.

### 2.3 하중 재하위치 및 지지 조건

실질적인 측부 토압 및 상부 외압상태를 모사하기 위해 Photo 1과 같은 3방향 가력시스템을 이용하여 하중을 재하하였다. 상부에는 단조 증가하중을 재하하여 윤하중 및 상부하중의 증대 가능성에 따른 하중의 증가를 모사하였으며 측면의 토압 분포를 재현하기 위해 일정한 하중(예상최대 하중의 약 33%)을 재하 하였다. 하중 재하위치는 Fig. 2와 같이 하부

받침부에 고무판을 사용하여 하부 지반의 거동을 모사하였으며 상부하중은 순폭의 1/2되는 위치에 재하하였다. 측면 하중의 경우, 전체 높이의 2/3되는 위치에 작용시켜 깊이에 따른 측면하중의 분포를 고려하였다. 또한, 측면하중의 경우 길이 방향으로의 일정한 하중분포를 나타내게 하기 위해 250mm간격으로 3점에 대해 균등한 하중을 재하하였다.

### 2.4 측정위치 및 종류

철근의 변형률을 측정하기 위해 Fig. 3(a)와 같이

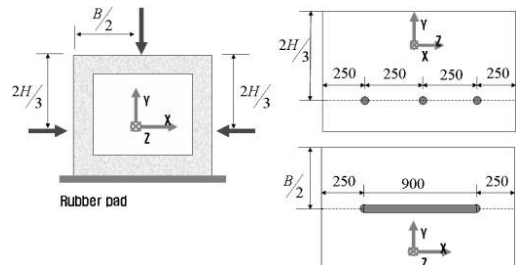


Fig. 2 하중 재하위치 및 방향

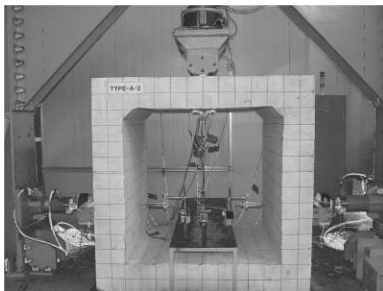
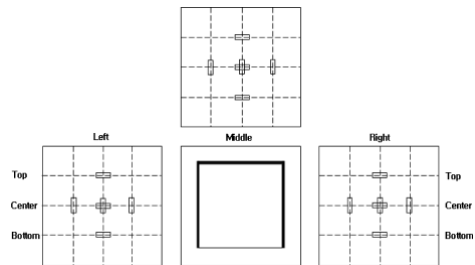


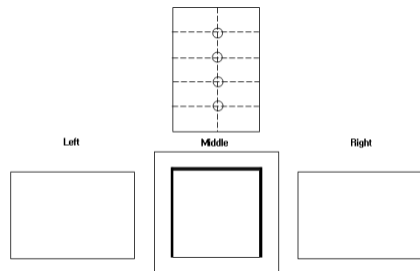
Photo 1 실험체 거치 상황



Photo 2 균열게이지 부착 전경



(a) 철근 게이지 부착위치



(b) 균열게이지 부착위치

Fig. 3 철근게이지 및 균열게이지 부착위치

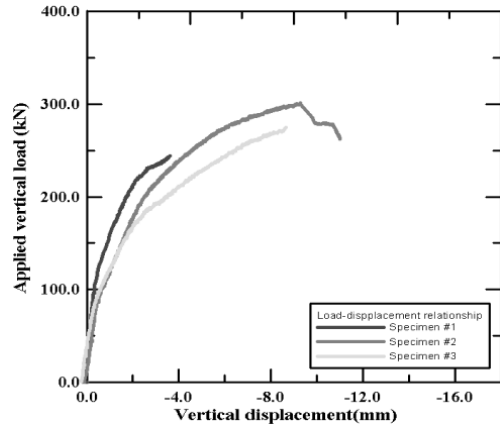
상부슬래브와 좌우벽체에 각각 6개의 매립 게이지를 부착하여 수평, 수직방향 철근의 변형률을 측정하였다. 콘크리트 표면변형률은 총 3개 위치에서 측정하였다. 또한, 실험체의 수평 및 수직방향 변위를 측정하기 위해 좌우측 벽면 내부에 각각 2개, 상부 벽면 내부에 3개의 50mm LVDT를 부착하여 구조물의 변형 거동을 측정 할 수 있도록 하였다.

일반적으로 지중 암거구조물의 경우, 상부 차량하중의 증가 혹은 진동 등의 영향으로 인한 상부 슬래브의 종방향 균열이 구조물의 직접적인 강성 저하를 가져오는 경우가 많다. 따라서 본 실험에서는 상부 하중의 영향으로 인한 균열폭의 증가를 실험적으로 측정하기 위해 Photo 2 및 Fig. 3(b)와 같이 상부 슬래브에 수평균열폭을 측정할 수 있는 균열게이지를 설치하였다. 이때 제한된 영역에서의 균열폭을 측정하기 위해 최소한의 사전균열(폭 2mm, 깊이 8 mm)을 두어 균열폭의 증가량을 측정하였다.

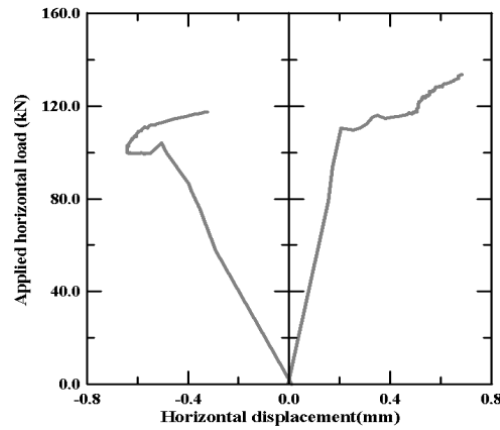
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 하중-변위 관계

총 3개의 실험체에 대한 수직하중-수직평균변위 관계를 Fig. 4(a)에 도시하였으며, 수평하중의 증가에 따른 측벽 수평변위의 관계도를 Fig. 4(b)에 도시하였다. 실험결과 약 243kN~301kN까지의 범위에서 최대 수직하중값을 나타내었다. 상부 슬래브 수직변위의 경우, 최초 측면 수평하중의 영향으로 인해 약 0.5mm의 수직상향변위가 발생하였다. 최초의 균열은 수직하중이 약 80~90kN 일 때 상부슬래브의 하단면 중앙부에서 발생하였다. 발생된 균열은 하중증가에 따라 점진적으로 균열폭이 확대되는 양상을 보였다. 2번 및 3번 실험체의 경우, 140kN에서 좌우 벽체 상부에서는 급작스러운 종방향 균열이 발생하였고 이후 수직하중의 증가에 따라 균열폭이 확대되는 양상을 나타내었다. 측벽 수평변위는 최초 수평하중의 재하로 인해 약 1mm의 변위오차를 나타내었으며 수직하중의 증가에 따라 수평하중값이 증가되는 양상을 나타내었다.



(a) 수직방향 하중-변위 관계



(b) 수평방향 하중-변위 관계 (Specimen #2)

Fig. 4 수직, 수평 하중-변위 관계

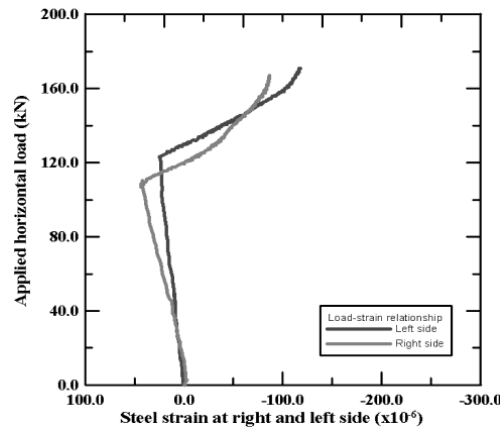


Fig. 5 좌우측 벽체 수직철근의 수평하중-변형률 관계

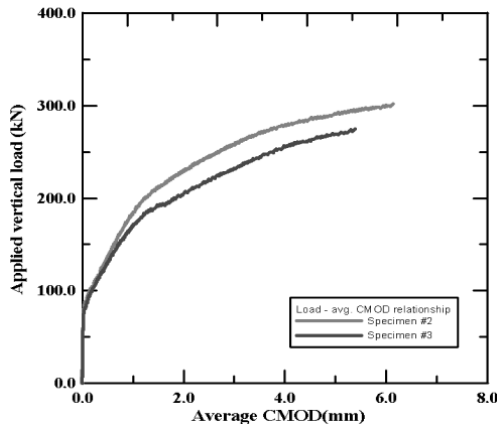


Fig. 6 수직하중-평균 CMOD 관계

### 3.2 수직하중-평균 CMOD 관계

총 4개의 균열계이지로부터 측정된 CMOD값을 평균한 벽체 수직철근의 수평하중-변형률 관계 및 수직하중-평균 CMOD 관계를 Fig. 5 와 Fig. 6에 도시하였다. 좌우측 벽체에 작용한 수평하중은 우측 하중 대비 약 8.5%의 편심이 발생하였다. 모든 실험체에서 수직하중 200kN 이전까지는 약 1mm 미만의 개구변위가 발생하였으나 철근의 항복이후 균열폭이 급격히 증가되는 양상을 나타내어 편심의 영향은 실험 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

### 3.3 균열패턴

Fig. 7에 2번 실험체에서 나타난 균열패턴을 도시하였다. 모든 실험체에서 수직하중이 약 80kN~90kN일 때 중앙부 슬래브의 하단 좌측 및 중앙에서 초기 균열이 관찰되었다. 이후, 130kN일 때 유사한 균열들이 슬래브의 길이 방향으로 슬래브의 하단 중앙부에서 관찰되었다. 수직하중이 160kN일 때 좌, 우측 벽체 및 중앙 슬래브의 외측 상단부에서 외부로부터의 균열이 관찰되었다. 수직하중 210kN 및 240kN 일 때 상부로부터 약 200mm, 250mm 위치에서 벽체의 상단부에서 실험체의 길이 방향으로 균열이 일시에 발생하였으며 수직하중의 증가에 따라

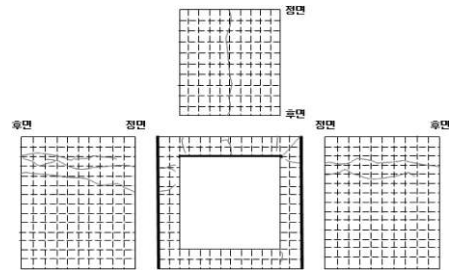


Fig. 7 균열양상 (실험체 #2)

균열폭이 증가되는 양상을 보였다. 이후 수직하중의 증가에 따라 슬래브의 하단부 중앙에 주균열이 길이 방향으로 더욱 진전하고 균열폭도 증가하는 양상을 보였으며 슬래브와 벽체의 접합부에서 길이방향으로의 균열이 관찰되었다. 이후 수직하중이 약 300kN 이후부터는 균열의 폭이 급격히 커지면서 중앙부 슬래브의 하단에서 아치형태의 균열이 급격히 증가하여 최종 파괴에 이르렀다.

### 3.4 실험결과에 의한 구조내력저하시수 추정

본 논문에서는 모형실험을 통해 나타난 구조물의 내력저하(혹은 손상도)를 상부 슬래브 하단에 발생하는 균열폭의 함수로서 표현하고 이를 통해 구조물의 구조내력저하를 추정하였다. 이를 위해 구조내력저하시수를 식(1)과 같이 정의하였다.

$$D(\omega) = 1.0 - d(\omega) = 1.0 - \frac{f(\omega)}{f_{\max}} \quad (1)$$

여기서,

$D(\omega)$  : 구조내력저하시수,  $d(\omega)$  : 손상지수

$f(\omega)$  : 균열폭 증가에 따른 하중 증가량

$f_{\max}$  : 실험에서 구한 최대하중 혹은 설계하중

$\omega$  : 상부 슬래브의 균열폭(mm)

만약  $D(\omega) = 1$ 이면 준공시의 내력을 보유한 것이며,  $D(\omega) = 0.25$ 이면 건전상태보다 75%의 내력저하가 되었다는 것을 의미한다.

실험결과로부터 구한 하중-평균 CMOD 관계로

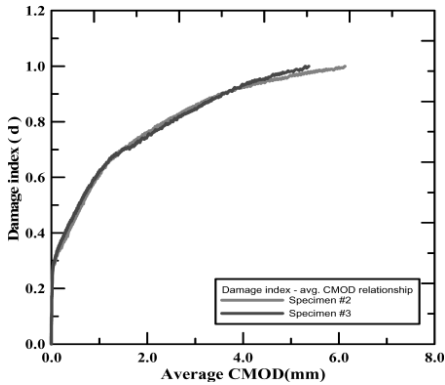


Fig. 8 손상도-평균 CMOD 관계

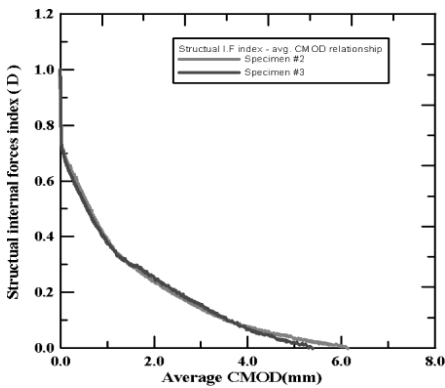


Fig. 9 구조내력지수-평균 CMOD 관계

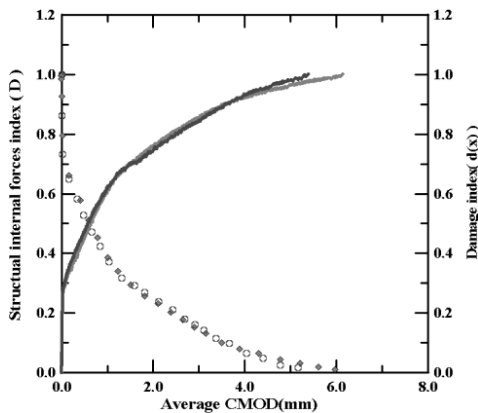


Fig. 10 손상도-구조내력지수-평균 CMOD 관계

부터 2,3번 실험체에 대한 손상지수를 Fig. 8에 나타내었다. 손상지수 값이 0.3의 값을 가질 때까지

Table 1 평균 CMOD에 대한 구조내력지수

구조내력지수	평균 CMOD (mm)
$D > 0.7$	0.3mm 미만
$0.6 < D \leq 0.7$	0.3mm 이상 0.8mm 미만
$0.5 < D \leq 0.6$	0.8mm 이상 1.0mm 미만
$0.3 < D \leq 0.5$	1.0mm 이상 1.2mm 미만
$D < 0.3$	1.2mm 이상

상부 슬래브의 종방향 균열폭은 약 0.3mm 이내로 매우 작은 균열폭 증가를 보였으며, 상부 슬래브의 종방향 균열폭이 약 1.2mm 일 때 약 0.7정도의 손상지수를 나타내고 이후 손상지수의 증가량에 비해 CMOD의 증가량이 커지는 것으로 나타났다.

따라서 본 논문에서는 구조적 손상이 시작되는 초기내력손상지수를 0.3으로, 그리고 구조물의 내력이 완전히 저하되는 최종손상지수를 0.7로 가정하였으며 이때의 균열폭은 각각 0.3mm, 1.2mm로 결정하였다. 이를 바탕으로 철근콘크리트 박스형 암거 구조물의 내력지수는 Table 1과 같은 구조내력지수로 산정하였으며, 상부 슬래브의 종방향 균열폭(mm)에 따라 총 5개의 구간으로 각각 나누어 선정하였다.

#### 4. 결론

이 논문에서는 지하구조물의 구조건전성 평가시스템의 개발을 목적으로 이에 필요한 전력구 구조물의 내력을 정량적으로 평가할 수 있는 구조물내력지수를 도입하였다. 이를 위해 총 3개의 박스형 암거 모형실험체를 대상으로 정적 3축 가력시스템을 이용한 파괴실험을 실시하였다. 수직하중 증가에 따른 상부 슬래브 하단면의 균열폭을 측정하기 위해, 상부 슬래브 하단면에 폭 2mm, 깊이 8mm의 사전균열을 제작하고 균열게이지를 통해 균열폭을 측정하였다.

실험결과를 바탕으로 수직하중에 대한 상부 슬래브에서의 수평균열폭 변화량 관계를 얻었으며 이를 바탕으로 균열폭 증가에 따른 구조내력의 저하정도를 파악할 수 있었다.

또한, 구조내력평가 시 필요한 균열폭 대비 내력의 변화양상을 예측할 수 있도록 구조내력지수 개념

을 도입하여 상부 슬래브의 균열폭에 대한 철근콘크리트 구조물의 구조손상지수를 개발하고 구조내력지수를 산정할 수 있는 식을 제안하였다. 이를 바탕으로 전력구 구조물의 구조손상수준을 5단계로 구분하고 각 단계별 상부 슬래브에서의 균열폭을 제안하였다. 현재의 내력상태를 정량적으로 평가함에 있어 해석적 방법에서 사용가능한 손상도 예측함수를 균열폭에 대해 새로이 정의 하였으며 이를 바탕으로 해석적 방법에 의한 현재의 내력을 평가할 경우, 현재의 균열폭만을 사용하여 국소화된 영역 및 전체 구조물의 내력저하정도를 손상 예측함수를 이용하여 묘사하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원 중장기과제인 전력구 구조건전성 평가시스템 개발의 지원 하에 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 本田国保ら : 水平載荷によるボックスカルバートの変形性能の実験的研究, 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1261~1266, 1999.
2. 齋藤など, “水路トンネル健全性評価支援システムの開発” 電力土木, No.304, pp.51~55, 2003.

3. 安保など, “水路トンネル管理システムの開発” 電力土木, No.287, pp.42~46, 2000.
4. 星隈順一ら : 鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.215~232, 2001.
5. 木村など, “水力発電所土木工作物点検管理支援システムの開発” 電力土木, No.292, pp.24~28, 2001.
6. Osako, K., Koiwa, S., Kitahashi, N., Akimoto, E. and Nakatsui, K., “A rehabilitation technology by SPR method and evaluation of load carrying capacity”, Proceedings of JCI Symposium on Repair and rehabilitation of concrete structures, 1998.
7. Shi, Z., Nakano, M., Ishibashi, A., and Yoshida, T., “Assessment of load carrying capacity of tunnel lining with inner reinforcement by the elastic softening model”, Proceedings of JCI Symposium on Repair and rehabilitation of concrete structures, pp.83~86, 1998.
8. Yokoyama, H., Osako, K., Koiwa, S., Kitahashi, N., and Akimoto, E. “A new technique for sewer rehabilitation applicable to noncircular cross sections : Development and Application”, 1997.

(접수일자 : 2009년 6월 8일)

(심사완료일자 : 2009년 7월 26일)