

# 地下의 철근콘크리트 박스構造物の 解析 및 우각부 設計에 관한 研究

A Study on the Analysis and Corner Joint Design of Underground R.C Box Structure

오 병 환\* · 채 성 태\*\* · 신 호 상\*\* · 김 의 성\*\*  
Oh, Byung Hwan · Chae, Seong Tae · Shin, Ho Sang · Kim, Eui Sung

## Abstract

A basic assumption in the current design and analysis of reinforced concrete(RC) box structures, which are constructed by the open cut and fill method, is that the displacements and forces are uniform in the longitudinal direction of the structure. The solution may be therefore obtained from the analysis of a unit wide strip along longitudinal axis. This strip is said to be in a plane strain condition, meaning that the out of plane deformations are vanished. The current design of box structure is carried out by the result of planar frame model for the sake of simplicity. The purpose of this study is to show more rational design method of box culverts considering a rigid zone of corner joints. The current analysis of box structures will be compared with the plane strain analysis as well as 3-d shell model.

Reinforcement quantity is also determined to resist the tensile force in corner joints of box structures using strut-tie model which has been developed through the elastic analysis

## 1. 서론

지하 박스 구조물의 설계와 해석에 있어 기본적인 가정은 박스 구조물의 종방향으로 작용 하중과 변위가 균등하다는 데 기초를 두고 있다. 깊은 심도에 시공되는 지하 박스 구조물에 작용하는 하중은 이러한 기본 조건을 만족하고 있으며, 이 경우 박스 구조물은 구조적 거동이 종방향으로 독립적인 상태에 있게 되어, 종방향으로 변형이 발생하지 않는 평면 변형 조건을 가지게 된다. 따라서 지하 박스 구조물은 실제적으로 평면 변형 조건에 의한 종방향으로 단위 길이를 갖는 2 차원 해석이 실제 구조물의 거동에 가깝게 이상화한 것이라고 할 수 있다. 현행의 지하 박스 구조물은 부재의 축선을 연결한 단위폭을 갖는 평면 뼈대 구조로 단순화하여 구조 해석을 수행하고 있다. 본 연구는 지하 박스 구조물에 대해 평면 변형 조건에 의해 구조물을 단순화하여 해석을 수행한 결과 및 3차원 구조해석 결과, 현재 실무에서 사용하고 있는 방법 등을 비교하여 지하 박스 구조물에 대해 보다 적합한 모델을 제시하고자 한다.

지하 박스 구조물의 절점연결부(우각부)는 기하학적인 형상의 변화로 인해 응력의 분포가 불연속 교란된 특성을 나타내고 있으며, 본 연구에서는 절점연결부에 대한 힘의 흐름을 반영한 스

트럿-타이 모델을 사용하여 이에 대한 적절한 보강철근량 계산방법을 제시하고자 한다.

## 2. 지하 박스구조물에 대한 구조해석

### 2.1 개요

그림 1에 나타낸 지하 박스 구조물에 대해 동일한 하중 및 경계 조건을 사용하여 평면 변형 조건을 사용한 구조 해석 및 현행의 평면 뼈대에 의한 구조 해석, 쉘 요소를 사용한 3차원 구조 해석을 수행하여, 부재내의 동일 위치에서 발생하는 단면력을 비교하여, 지하 박스 구조물에 대한 현행 구조 해석 모델의 적정성을 살펴본다.

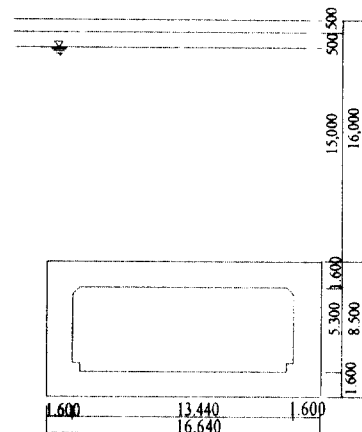


그림1. 구조해석 대상 구조물(BOX2)

\* 정희원 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 서울대학교 토목과 대학원 박사과정

## 2.2 지하박스구조물의 구조해석 예

대단면 1련 지하 박스 구조물에 대한 현행의 해석모델과 강역을 고려한 구조 해석 모델을 그림 2, 3에 나타내었다.

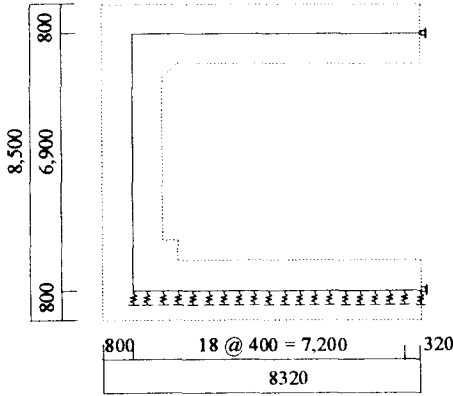


그림 2. 현행 평면뼈대요소에 의한 해석 모델

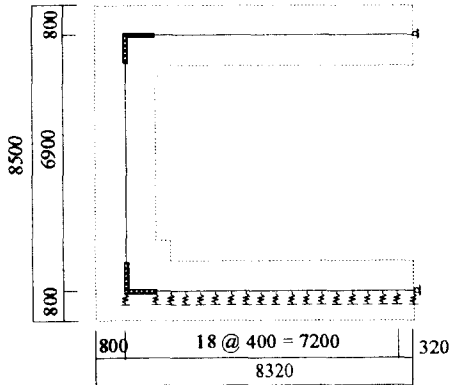


그림 3. 강역을 고려한 구조해석 모델

## 2.3 각 해석 방법에 대한 비교 결과

전 절에서 수행한 지하 박스 구조물에 대한 여러 설계 방법에 따른 구조 해석을 수행하여 현행의 설계법에 대해 각 해석 방법에 있어서 단면력의 비를 표 1~ 표 2에 나타내었다.

표 1. 대단면 1련박스에 대한 해석방법에 따른 현행설계방법과의 축력의 비

위 치	현행 설계방법	평면 프레임 모델		SHELL	
		$R_z = T_w/4$	현치 휩강성	현치 무시	현치 무시
상부슬래브	1.00	1.00	0.97	1.06	1.00
바닥슬래브	1.00	1.00	1.03	0.94	1.00
벽체	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00

표 2. 대단면 1련박스에 대한 구조해석방법에 따른 현행설계방법과의 휨모멘트의 비

위 치	현행 설계방법	평면 프레임 모델			평면형	SHELL
		$R_z = T_w/4$	$R_z = T_w/2$	현치 휩강성	현치 무시	현치 무시
상부슬래브	중앙	1.00	0.93	0.85	0.90	0.92
	L/4	1.00	0.86	0.73	0.80	0.78
	단부	1.00	0.87	0.74	0.69	-
바닥슬래브	중앙	1.00	0.95	0.89	0.91	0.87
	L/4	1.00	0.89	0.77	0.81	0.76
벽체	중앙	1.00	1.14	1.27	1.21	1.07

지하 박스 구조물에 대한 여러가지 구조 해석 방법에 따른 단면력의 결과를 비교한 결과 축력의 크기는 거의 같은 것으로 나타났으나, 휨모멘트의 경우 해석 방법에 따라 크기가 상당한 차이가 나타났다. 현재의 평면 뼈대 요소에 의한 해석과 평면 변형 요소에 의한 해석 결과 및 벽체와 슬래브의 연결부 강역을 고려한 경우를 비교할 때 부재에 발생하는 단면력은 차이를 나타내고 있으며, 대부분의 비교 부위에서 현행의 설계방법은 단면력이 과다 평가되는 결과를 나타내고 있다. 벽체 및 슬래브의 두께가 두꺼운 경우에는 현행의 도로교 시방서에서 제시한 강역을 고려한 평면 뼈대 요소에 의한 설계 방법은 다른 구조 해석 방법의 결과를 비교할 때 설계 측면에서의 안전성은 유지할 수 있는 것으로 나타났으며 강역을 고려하여 설계를 할 경우에는 소요 철근량을 약 10~15% 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

## 3. 절점 연결부(우각부)의 설계

### 3.1 스트럿-타이 모델 (strut and tie model)

#### 3.1.1 기본원리 및 개요

콘크리트 부재에 하중이 가해지면 하중재하점으로 부터 어느 정도의 거리가 멀어지면 응력이 일정한 크기를 가지고 분포되게 된다. 이런 영역을 B영역(Beam 또는 Bernoulli zone)이라 하며 이 영역에서는 하중이 가해지는 동안 평면이 유지된다고 가정할 수 있다. 탄성해석은 균열이 발생하기 전의 모델의 응력 흐름(stress flow)을 정확히 예측할 수 있지만 균열이 발생한 후에는 더 이상의 예측은 불가능하다. 균열이 발생한 철근 콘크리트는 주로 콘크리트의 압축응력과 철근의 인장응력으로 하중을 전달하게 되는데 중요한 균열이 발생한 후에는 주압축응력의 궤적이 직선으로 되는 경향이 있어 이를 압축 스트럿(strut)으로 간략화 할 수 있다. 이와 같이 응력이 교란된 영역을 D영역이라 하며 이 영역에서는 탄성 응력의 궤적에 따라 스트럿-타이 모델을 구성할 수 있고 이렇게 구

성된 스트럿-타이 모델은 구조체의 실제적인 하중 전달 메커니즘을 잘 나타내 준다.

D영역에서의 스트럿-타이 모델 구성은 비교적 간단한 구조체에서 하중의 흐름을 추적하여 구성하는 하중경로법(load path method)과 탄성 유한 요소 해석으로부터 탄성응력 값과 주응력 궤적 방향을 얻어 이를 참고하여 모델을 구성하는 탄성응력 궤적법(elastic trajectory method)이 있다.

스트럿-타이 모델은 압축력을 받는 스트럿과 인장력을 받는 타이를 이용해 구조물 내부의 응력 흐름에 맞추어 가상의 트리스 구조물을 구성하고 이 트리스 구조물을 해석하여 부재의 압축, 인장력을 산정하고 이에 따라 철근의 위치 및 철근량 등을 계산하는 방법이다.

### 3.1.2 스트럿-타이 모델의 구성요소 및 치수 결정(dimensioning)

스트럿-타이 모델은 스트럿(strut), 타이(tie) 및 절점(node)에 의해서 구성되며, 치수결정 작업은 이들 스트럿과 타이 및 절점들이 외부 하중에 의해 전달되는 힘을 지지 할 수 있도록 그 크기를 결정하는 것이다.

#### 1) 스트럿

구조물에 있어 압축응력이 작용하는 영역으로 압축부재의 역할을 수행하며, 안전조건을 만족하는 스트럿의 치수는 식(1)에 의해 결정된다.

$$\varphi A_c f_{2max} \geq N_u \quad (1)$$

여기서,  $\varphi$ 는 강도감소계수이고 압축응력에 대해서는  $\varphi=0.7$ 이다.  $A_c$ 는 스트럿의 유효면적,  $f_{2max}$ 는 스트럿의 유효 압축강도,  $N_u$ 는 하중계수가 곱해진 하중(외력)에 의해 스트럿에 발생하는 압축력이다. 스트럿의 유효 압축강도  $f_{2max}$ 는 절점의 형태에 따라 달라진다. 즉 지압판과 스트럿으로만 구성되는 순수한 압축 스트럿에서는  $0.85 f_c'$ 이지만 인장 타이가 스트럿과 교차되면 인장타이의 변형도에 따라 유효압축강도는 감소하며 이것은 식(2)와 같이 나타낼수 있다.

$$f_{2max} = \frac{f_c'}{0.8 + 170 \epsilon_1} \leq 0.85 f_c' \quad (2)$$

이때 인장 타이와 교차되는 스트럿의 파괴시의 주 압축 변형도를 0.002로 가정하면 주인장 변형도  $\epsilon_1$ 은 식(3)과 같다.

$$\epsilon_1 = \epsilon_s + (\epsilon_s + 0.002) \cot^2 \alpha_s \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_s$ 는 철근의 평균 변형도이고,  $\alpha_s$ 는 타이와 스트럿의 교차각도이다.

#### 2) 타이(tie)

구조물에 있어서 인장역할을 담당하는 영역으로 철근, 프리스트레스트 강재로 보강된 보강영역의 중심은 스트럿-타이 모델에 있어서 타이의 축과 일치해야 한다. 타이의 하중수행 능력은 식 (4)와

같이 보강철근의 하중 수행능력과 프리스트레스트 강재가 담당할 수 있는 잔여하중 수행능력의 합으로 계산된다.

$$\varphi (A_s f_y + A_{ps} f_{py}) \geq N_u \quad (4)$$

여기서,  $\varphi$ 는 강도감소계수이고,  $A_s$ ,  $A_{ps}$ 는 철근, 프리스트레스트 강재의 단면적이고,  $f_y$ ,  $f_{py}$ 는 철근, 프리스트레스트 강재의 항복응력이다.

### 3) 절점(node)

절점은 스트럿과 타이이 만나는 곳으로 힘의 흐름이 어떤 길이와 폭을 가지고 전환되는 영역이다. 절점의 크기는 절점영역에서의 콘크리트 압축응력이 아래에 제시한 제한치 이내에 들도록 충분히 커야 한다. 즉, 인장응력의 작용 유무에 따라 다음과 같이 분류하며 인장응력이 교차될수록 강도의 감소를 고려한다. 따라서, 압축 스트럿과 지압판으로 이루어진 절점은  $0.85 \varphi f_c'$ , 한 방향으로 타이가 교차되는 절점은  $0.75 \varphi f_c'$ , 두 방향 이상으로 타이가 교차되는 절점은  $0.60 \varphi f_c'$ 으로 취하며, 이때  $\varphi$ 는 콘크리트의 지압에 대한 강도감소계수 0.7을 취한다. 그리고  $f_c'$ 는 콘크리트의 일축압축강도이다.

## 3.2 박스의 우각부에 대한 스트럿-타이 모델

### 3.2.1 스트럿-타이 모델의 구성

지하 박스 구조물의 현치가 있는 우각부에 부모멘트가 작용하는 경우에 대해 구성한 스트럿-타이 모델을 그림 4에 나타내었다.

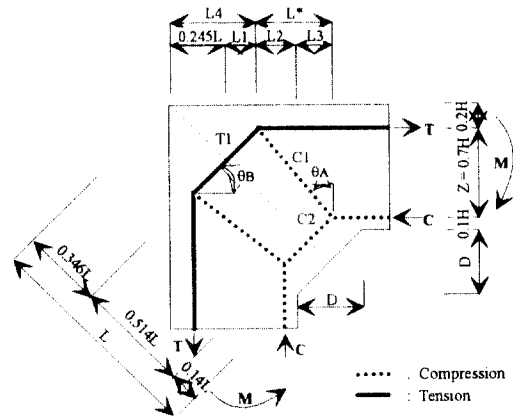


그림 4. 우각부의 스트럿-타이 모델

#### (1) 우각부의 철근량 산정

지하 박스 구조물의 우각부에 부모멘트가 작용하는 경우 스트럿-타이 모델에 의해 절점에서의 힘의 평형 조건인 식 (5)에 따라 타이의 인장력을 구하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} T &= T_1 \cdot \cos \theta_B + C_1 \cdot \sin \theta_A \\ C_1 \cdot \cos \theta_A &= T_1 \cdot \sin \theta_B \\ C_2 &= T_1 \end{aligned} \quad (5)$$

$$T_1 = \frac{T}{\sin \theta_B \cdot (1 + \tan \theta_A)} \quad (6)$$

연결부를 구성하는 두 부재의 두께가 같을 경우  $\theta_B = 45^\circ$  를 이루고 있다. 인장 타이  $T_1$  과 압축스트럿  $C_1$ 의 교차각은  $\tan \theta_A = L^*/Z$  에 의해 구하면 현치가 없는 경우는  $\theta_A$  는  $27.986^\circ$  를 나타내고, 현치가 있는 경우는 그림 7에서  $L = \sqrt{2H+D}/\sqrt{2}$ ,  $L_1 = 0.245L - 0.2H$ ,  $L_2 = H - (0.245L + L_1) = 1.20H - 0.49L$ ,  $L_3 = 0.10H + D - 0.14\sqrt{2}L$ ,  $L_4 = 0.245L + L_1 = 0.49L - 0.20H$ ,  $L^* = L_2 + L_3 = 1.30H + D - 0.688L$  가 되며,  $\tan \theta_A = L^*/Z = 0.467 + 0.734D/H$  로서 현치가 있는 경우  $\theta_A \geq 27.814^\circ$  가 된다. 여기서 H는 부재의 두께, L은 절점연결부의 대각선 거리를 나타낸다.

부모멘트에 의해 우각부에 발생하는 극한 인장력은  $T = M/Z = M/0.7H$  이 되고 타이의 인장력  $T_1$  은 최종적으로 식 (7)에 의해 구해지며, 필요한 인장 철근의 양은 식 (8)에 의해 구할 수 있다.

$$T_1 = \frac{2.020 \cdot M}{(1 + \tan \theta_A) \cdot H} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{2.020 \cdot M}{\varphi \cdot \sigma_y \cdot (1 + \tan \theta_A) \cdot H} \\ &= \frac{2.376 \cdot M}{\sigma_y \cdot (1 + \tan \theta_A) \cdot H} \end{aligned} \quad (8)$$

지하 박스 구조물의 우각부에 부모멘트가 작용하는 경우 현치의 유무에 따라 절점연결부의 철근량은 다소 차이를 나타내고 있으며, 이는 타이와 스트럿이 구성하는 각도와 밀접한 관계를 나타내고 있다.

### (2) 우각부 내측 압축스트럿의 안전성 검토

압축력이 작용하는 절점연결부 내측의 스트럿에 대한 안전성의 확보는 식 (9)에 의해 검토를 하고 이를 만족하지 못할 경우에는 현치의 크기를 증가시키거나 철근으로 보강하여야 한다.

$$\begin{aligned} C_a &= \varphi_b \cdot 0.85 \cdot \sigma_{ck} \cdot (A) \\ &= 0.7 \cdot 0.85 \cdot \sigma_{ck} \cdot (2 \times 0.09L \cdot B) \\ &= 10.710 \cdot \sigma_{ck} \cdot L \geq C_2 = T_1 \end{aligned} \quad (9)$$

본절에서 사용한 부호에 대한 규약은 다음과 같

다.

- L = 코너부의 대각선 길이  
=  $\sqrt{2 \cdot H + D}/\sqrt{2}$  (cm)
- H = 연결부재의 두께 (cm)
- D = 현치의 크기 (cm)
- M = 절점연결부에 작용하는 휨모멘트 (kg-cm)
- $\sigma_{ck}$  = 콘크리트의 설계 기준 강도 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
- $\sigma_y$  = 철근의 항복 응력 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

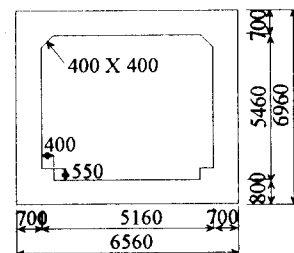
### 3.2.2 현행 설계법과의 비교

지하 박스 구조물의 우각부에 부모멘트가 작용하는 경우 식 (10)에 나타낸 현행 설계법에 의한 철근량 및 식(8)에 나타낸 스트럿-타이 모델에 의한 우각부의 철근량을 비교한 결과 철근량이 약 2.6 % 정도의 미소한 차이를 나타내었다.

$$A_{s,current} = \frac{2 \cdot M_0}{\sigma_{sa} \cdot R} = \frac{2\sqrt{2} \cdot M_0}{\sigma_{sa} \cdot (2H+D)} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{A_{s, strut-tie}}{A_{s,current}} \\ &= \frac{2.020 \cdot (2+D/H)}{2\sqrt{2} \cdot (1.467+0.734D/H)} = 0.974 \end{aligned}$$

동일한 지하 박스 구조물에 대해 구조해석을 수행하여 강도설계법에서 하중조합을  $U = 1.2(\text{사하중}) + 1.8(\text{활하중}) + 1.8(\text{수평토압}) + 1.4(\text{수압})$  을 사용한 경우에 절점연결부에 소요되는 철근량은 현행 규정에 의한 소요량의 80 % 정도에 해당되며, 하중조합  $U = 1.5(\text{사하중}) + 1.8(\text{활하중}) + 1.8(\text{수평토압}) + 1.8(\text{수압})$  을 사용한 경우는 대부분 현행 규정에 의한 소요량의 95 % 이상으로 나타났다. 따라서 스트럿-타이 모델에 의해 절점연결부에 소요되는 철근량을 산정할 경우 지하 박스 구조물의 설계 방법과 관계없이 구조물에서의 다른 부위에서와 같은 정도의 안전도를 절점연결부에서도 유지할 수 있는 것으로 사료된다.

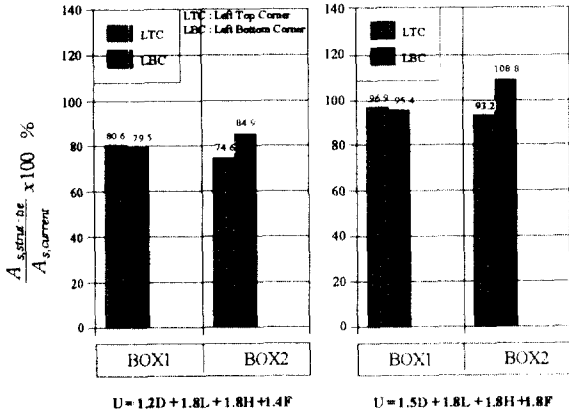


a) 비교 대상 구조물(BOX1)

한 방법을 제공할 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- [1] 오 병환, 김 익현, 이 명규, "스트럿-타이 모델을 이용한 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 박스 거더 교량의 신축이음 세그먼트의 해석과 설계", 대한 토목학회 논문집 제 16권 제1호, 1996년 1월
- [2] Ahmad M. Abdel-Karim, Maher K. Tadros, "Structural Response of Full Scale Concrete Box Culvert", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.119, No.11, Nov. 1993, pp.3238-3254
- [3] Ingvar H. E. Nilsson, Anders Losberg, "Reinforced Concrete Corners and Joints Subjected to Bending Moment", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.102, No. ST6, June 1976, pp.1229-1255
- [4] Brian Mayfield, Fungkwong Kong, Alan Bennison, "Strength and Stiffness of Lightweight Concrete Corners", ACI Journal Vol.69, No.6, Jul. 1972, pp.420-427
- [5] Schlaich J., Schafer K., Jennewein M., "Towards a Consistent Design of reinforced Concrete Structures", PCI Journal Vol.32, No.3, May-June 1987, pp.74-150.
- [6] 대한민국 건설부, "도로교 표준 시방서", 1992
- [7] 대한민국 건설부, "콘크리트 표준 시방서", 1988



b) 우각부에서의 보강철근량의 비 (스트럿-타이모델/현행 규정)

그림 5. 우각부에서의 보강철근량의 비

## 4. 결론

본 연구에서는 깊은 심도에 시공이 되는 지하 박스 구조물의 설계 방법의 개선을 위해 여러가지 방법에 의한 구조 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였으며, 부모멘트에 저항하는 박스 구조물의 연결부에 소요되는 철근량의 결정을 위해 스트럿-타이 모델을 구성하여, 보강 철근량을 결정하였다. 본 연구에 의해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 깊은 심도에 시공되는 지하 박스 구조물에 대한 다양한 해석 방법에 따라 구조 해석을 수행한 결과 단면에 발생하는 축력은 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 휨모멘트의 경우는 지하 박스 구조물을 구성하는 단면의 크기가 일반적인 구조 부재에 비해 크기 때문에 현행의 설계와 같은 평면 뼈대 모델(planar frame model)에 의한 경우 평면 변형 조건 및 3차원 Shell 요소 등의 해석 방법에 따른 해석의 결과에 비해 단면력이 과다 평가되는 것으로 나타났다.

2) 박스 구조물의 연결부에 부모멘트가 작용할 경우에 대한 스트럿-타이 모델을 구성하여 절점연결부에 소요되는 철근량의 계산을 위한 식을 제시하였으며, 연결 부재의 두께가 동일할 경우에 대해 철근량을 구하여 도로교 표준시방서 규정과 비교한 결과, 현행 시방서의 규정뿐 아니라 강도설계법을 사용한 경우에도 적용 가능한 것으로 사료된다.

3) 본 연구는 최근들어 많이 건설되고 있는 지하철 박스 구조물의 설계에 합리적이고 유용