

버팀보지지 가시설구조물의 이산화 최적설계 Discrete Optimum Design of the Strut Supported Temporary Structures

박순응*, 박문호** 김진규***
Soon-Eung Park*, Moon-Ho Park**, Jin-Kyu Kim***

<Abstract>

This study is to develop the structure analysis and optimization algorithm of the strut supported temporary structure for underground constructions. Developed algorithm performs the analysis and the optimization of each strut, wale, and H pile of temporary structures separately. The design variables of nonlinear optimization consist of the cross-sections of temporary structures such as strut, wale, and H pile and the solution of the nonlinear programming is searched using for the method of successive unconstrained minimization technique. The weight of the structure is used for the object function of nonlinear programming. the constraints are derived from the specification of the temporary structures as compressive axial, bending, shear, composite stress and serviceability. The structural analysis is performed based on the elastoplastic beam theory. This developed program can be used to evaluate the applicability, convergence, and effectiveness of the temporary structures.

Keywords : *Strut, temporary structure, Earth pressure, Optimum design*

1. 서론

최근 산업화에 따른 인구의 급격한 증가, 인구의 도시집중, 그에 따른 토지 면적의 부족 등으로 도심지 고층건물과 지하시설물의 안전하고 효율적인 시공, 관리를 위하여 지반의 변형과 흙막이 구조물의 상호작용, 그리고 그에 따른 주변지반의 침하를 보다 효과적으로 예측, 관리할 필요성이 증대되고 있다.

지하 굴착면에서 설치되는 흙막이 구조물 설계시 가장 중요한 요소 중의 하나는 구조물에

작용하는 측방토압이다. 흙막이 구조물에 작용하는 측방토압은 흙막이 벽체의 변형, 흙막이 벽체와 지반사이의 상호작용에 의하여 결정되므로 지반조건, 굴착 깊이, 벽체의 강성, 구속조건, 시공방법 등과 같은 여러 가지 요인에 의하여 영향을 받는다. 연성벽체인 토류벽의 경우, 변위의 형태와 지반의 조건에 따라 변하는 토압을 산정하기 위하여 Terzaghi -Peck¹⁾(1967) 및 Tschebotarioff²⁾(1973) 등에 의해 산정된 토압분포선과 Winkler이론을 적용한 탄소성해석 방법, 유한요소법에 의한 방법등이 있다. 토류

* 정회원, 정회원, 영남이공대학 토목과 겸임교수, 工博

** 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수, 工博

*** 교신저자, 정회원, 영남이공대학 토목과 교수, 工博

E-mail : jkkim@ync.ac.kr.

* Adjunct Professor Dept. of Civil Eng, Ph. D. Yeungnam College of Science & Technology

** Professor, Dept. of Civil Eng, PhD Kyungpook National University.

*** Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Eng, PhD Yeungnam

벽체의 굴착단계별 수평변위와 토압산정을 위해 보-기둥의 이론을 적용한 Winkler모델은 흙막이 벽체는 탄성보, 지보공은 탄성스프링으로 지반은 탄소성스프링으로 모델링하여 토류벽체의 거동을 나타내는 미분방정식에 유한차분법을 적용하여 전단력과 휨모멘트를 구하는 방법이다.

본 연구에서는 실제 대구 지하철 2호선³⁾ 건설공사를 기준으로 하여 지반굴착에 따른 토류구조물의 응력해석 및 설계 프로그램인 EXCAD⁴⁾로 구조해석을 수행하여 지하철 가시설구조물의 설계기준을 기준으로 하여 H형강 단면설계의 다제약 다설계변수를 갖는 가시설구조물의 최적화를 위해 각 부재별로 최적화를 실시하여 부재를 모두 조합하여 전체 구조물이 최소중량의 최적설계가 되도록 하고, 이 부재별 단면을 이용하여 반복 구조해석을 수행하여 다음 단계의 부재별 최적화를 실시하여 반복과정에 의하여 최종 최적 설계변수를 결정하는 다단계 동적계획법⁵⁾을 적용하였다.

2. 흙막이 구조물의 해석이론

흙막이 구조의 해석⁶⁾은 벽체의 응력과 변형 및 지보공의 반력을 구하는 계산이며 수치해석 기법의 발달로 벽체변형과 지반거동의 상호작용을 고려하여 실제의 거동을 파악하는데 보다 합리적인 방법으로까지 발달하였다. 탄성법 및 탄소성법은 Rankine-Resal 이나 Coulimb의 삼각형 토압을 사용하여 벽체변위에 따른 가변토압을 측정하여 해석하는 방법으로 지보공의 축력과 흙막이벽의 응력 및 변위를 구할 수 있는 해석법이다. 특히, 탄소성법은 복잡한 지반의 해석과 정보화시공에 적용될 수 있는 장점 때문에 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 해석방법이다.

탄소성법은 Fig. 1과 같이 흙막이 벽체는 탄성보, 지보공은 탄성스프링, 지반은 탄소성스프링으로 모델링하고 초기 토압을 가하여 발생하는 변위를 계산하고 그 변위에 상응하는 지반의 탄소성상태를 판단하고 토압을 보정하여 다시 변위를 계산하는 방법이다.

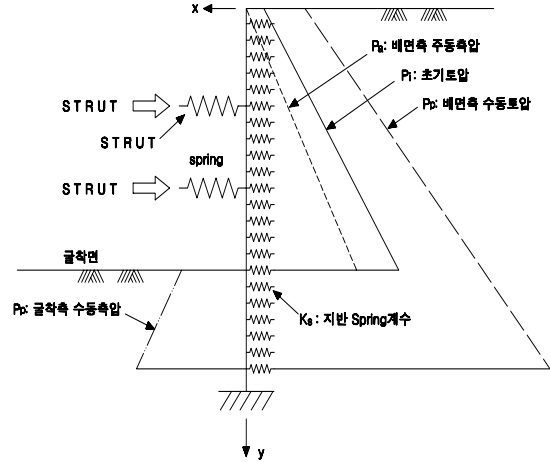


Fig. 1. Structure model of elastic-plastic method.

본 모델에서 하중과 변형에 대한 기본 미분방정식은 다음과 같다.

$$EI \frac{d^4x}{dy^4} + \frac{AE'}{L} \times x = P_i - K_s \cdot x$$

여기서, E : 흙막이 벽체의 탄성계수

I : 흙막이 벽체의 단면 2차 모멘트

A : 지보공의 단면적

E' : 지보공의 탄성계수

L : 지보공의 길이

P_i : 초기토압

K_s : 지반의 수평방향 지반반력계수

x : 깊이 y 지점에서의 벽체의

x 방향변위

위의 미분방정식에서 우변의 $P_i - K_s \cdot x$ 는 초기토압 P_i 에 지반의 변위 x 로 인한 보정치 $K_s \cdot x$ 를 가감한 것이며 최종적으로 작용하는 토압이 된다. 토압 P_i 는 벽체의 변위에 1차적으로 비례하여 증감된다. 그러나 이 토압은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 변위-토압관계에서 주동토압과 수동토압의 범위이내에 있어야 하며, 그 범위를 벗어나는 변위가 발생할 때는 토압으로 되고 지반반력계수를 0으로 한 후 계산이 반복된다.

3. 버팀보 가시철구조물의 해석

본 연구의 대상지역인 대구광역시 지하철 2호선의 지하철 가시철구조물의 해석을 수행하여 결과를 고찰하였다. 흙막이 벽과 같은 지반구조물의 해석에 있어서는 해석대상 구조물의 기하학적 조건 및 물성치 뿐만 아니라 구조물이 위치한 지반의 기하학적 조건 및 물성치에 대한 정확한 입력이 중요하다. Fig. 2는 적용 굴착단면의 단면도를 나타내고 있다.

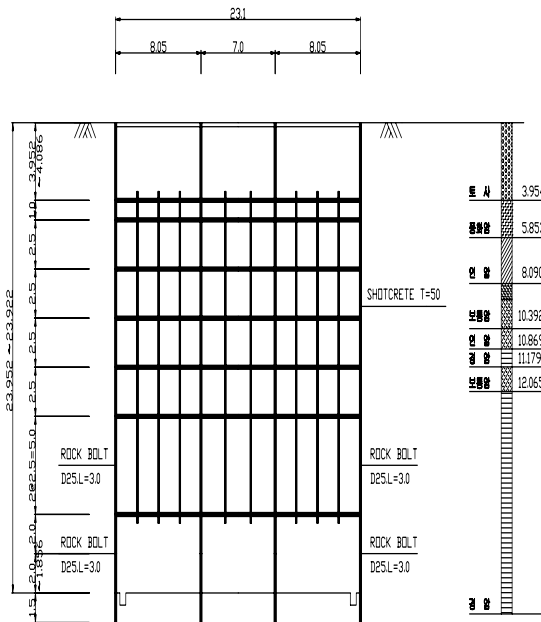


Fig. 2. Section diagram of temporary structure.

3.1 굴착단면의 제원과 입력자료

대구지하철 2호선 구간의 버팀보 지지방식 지하철가시철 구조물의 구성제원은 Table 1과 같으며, 토층이 깊이와 종류는 Table 2와 같다.

토층의 종류는 8개로 이루어져 있으며 내부마찰각 및 점착력 등은 토층에 따라 각각 30~40° 와 0~44.5t/m²의 값을 가지며 길이에 따라서 일정한 값을 가지는 것으로 가정하였다. 지반반력계수는 2500~10000t/m²의 값을 가진다. 스트럿의 설치간격은 굴착깊이 1.5m에서 2.0m의 간격으로 설치되고 나머지 전 굴착깊이에 대해서는 2.5m간격으로 설치되었다.

처음 1단계를 제외한 6단계에서 초기 긴장력이 10t인 스트럿을 설치하였고, 앵커의 초기 긴장력도 2단계에 걸쳐 10t으로 설치하였다. 지하철 가시철구조물의 전체 굴착과정은 12단계로

행하였으며, 마지막 단계는 바닥까지 굴착하는 단계로 30m 깊이까지 굴착하였다.

또한 총 4개의 엄지말뚝과 8개의 스트럿 그리고 2개의 앵커가 설치되었으며 중간말뚝 사이에는 보강재가 설치되어 있다.

Table 1. Section property of temporary structure

엄지말뚝	종류	H-250×250×9×14
	A_s	92.18 cm ²
	I_x	10800 cm ⁴
	Z_x	867 cm ³
	A_w	19.98 cm ²
	W_x	0.07 t/m
	E	21000000 kg/cm ²
버팀보	종류	H-298×299×9×14
	A_s	110.80 cm ²
	I_x	18800 cm ⁴
	Z_x	1270 cm ³
	A_w	24.3 cm ²
	W_x	0.09 t/m
	E	21000000 kg/cm ²
엄지말뚝과 버팀보의 간격		2.0m
띠장	종류	H-298×299×9×14
	A_s	110.80 cm ²
	I_x	18800 cm ⁴
	Z_x	1270 cm ³
	A_w	24.3 cm ²
	W_x	0.09 t/m
	E	21000000 kg/cm ²

Table 2. Depth and type of soil

토층번호	길이(m)	토층종류
1	3.95	토사
2	5.85	풍화암
3	8.1	연암
4	10.4	보통암
5	10.9	연암
6	11.2	경암
7	12.1	보통암
8	30.0	경암

3.2 해석 및 결과 고찰

본 연구에서 각 단계별 굴착을 수행한 결과 수평변위량의 최대치는 12단계인 굴착깊이 23.57m의 부근에서 약 1cm 발생함을 알 수 있었다.

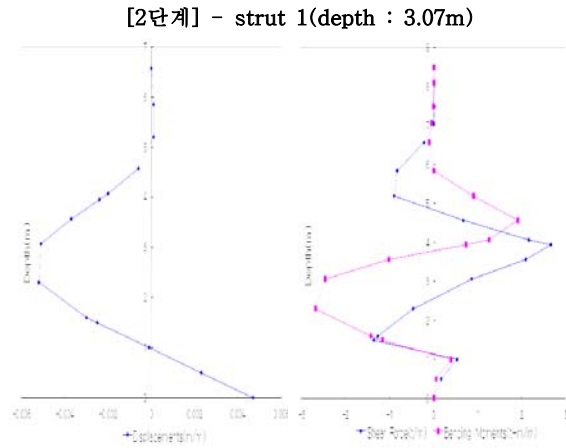


Fig. 3. Displacement & Shear & Moment of step 2.

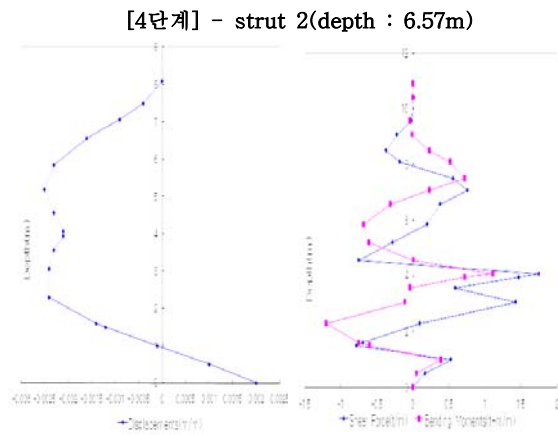


Fig. 4. Displacement & Shear & Moment of step 4

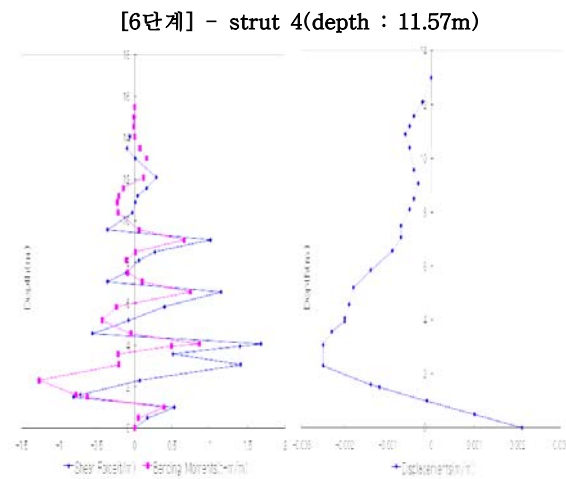


Fig. 5. Displacement & Shear & Moment of step 6

[8단계] - strut 6(depth : 16.57m)

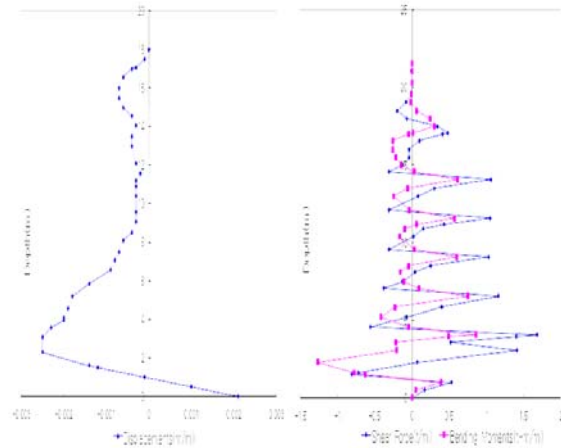


Fig. 6. Displacement & Shear & Moment of step 8.

[12단계] - strut 7(depth : 23.57m)

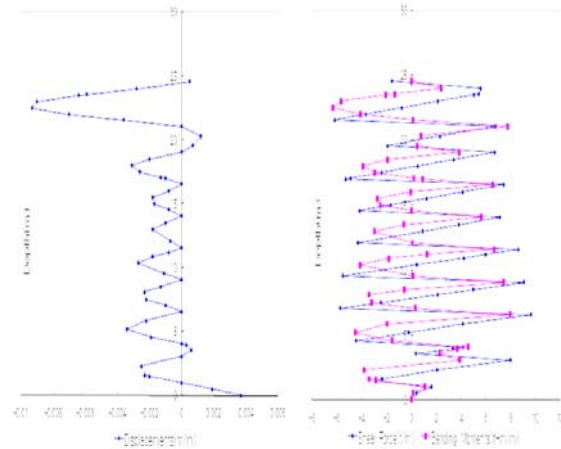


Fig. 7. Displacement & Shear & Moment of step 12.

이 결과는 두부의 허용값 3cm의 범위내에 있으므로 수평변위에 대해서 안전한 것으로 판단되었다. 12단계를 제외한 전 단계에서는 거의 수평변위가 발생되지 않는 양상을 보였다. 굴착 단계별 수평변위량과 전단력, 휨모멘트에 대하여 해석한 결과를 도시하면 Fig. 3~7과 같다.

4. 가시철구조물의 최적화 문제형성

본 논문에서는 지하철 가시철구조물의 강재의 중량을 목적함수로 사용하였으며, 제약조건식은 지하철 설계기준을 기준으로 하여 축 압축응력, 휨응력, 전단응력, 합성응력등의 제약조건과 단면형상에 대한 사용성등을 적용하여 최적화문제를 형성하였다. H형강의 이산화 최적설계를 위한 다단계 동적계획법의 최적화 알고

리즘은 Fig. 8과 같다.

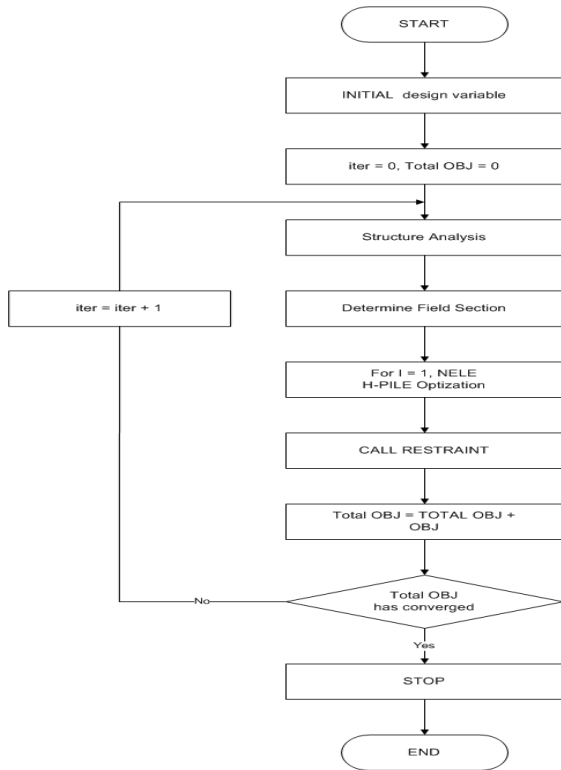


Fig. 8. Flowchart of optimal desing.

H형강의 경우 설계변수에 해당하는 단면의 치수들(b_f, t_f, t_w, d)을 이산화된 범위내에서 최적화 기법으로 최적설계 단면을 결정하도록 하였다. H형강의 단면구성은 Fig. 9와 같다.

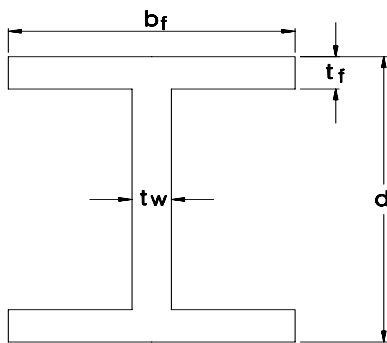


Fig. 9. Section of H pile.

4.1 목적함수

최적화를 위한 목적함수로 전체 구조물이 최소중량의 설계가 되도록 하기 위해 강재의 중량만을 고려한 중량함수를 사용하였으며, 가시 설 구조물의 목적함수는 다음식과 같다.

$$OBJ(x) = \rho \sum_{i=1}^{NS} (V)_i$$

$$(V)_i = (A_s)_i \cdot (L)_i$$

여기서, $(V)_i$ 는 i 번째 부재의 체적
 $(A)_i$ 는 i 번째 부재의 단면적
 $(L)_i$ 는 i 번째 부재의 길이
 NS 는 전체구조물의 부재수이다.

4.2 제약조건식

(1) 엄지말뚝과 버팀보의 제약조건식

① 축 압축응력 제약조건식

$(20 < \frac{l}{b} < 93)$ 일 때

$$G(1) = [1750 - 10.5 \times (\frac{l}{b} - 4.5)] \times 0.85$$

$$-\frac{P_{max}}{A_s} \geq 0$$

② 휨응력 제약조건식

- 압축인 경우, $(4.5 < \frac{l}{b} < 30)$ 일 때

$$G(2) = [1750 - 30 \times (\frac{l}{b} - 4.5)] \times 0.85$$

$$-\frac{M_{max}}{Z} \geq 0$$

- 인장인 경우

$$G(3) = 1750 \times 0.85 - \frac{M_{max}}{Z} \geq 0$$

③ 전단응력 제약조건식

$$G(4) = 1000 \times 0.85 - \frac{S_{max}}{A_w} \geq 0$$

④ 합성응력 제약조건식

$$G(5) = (\frac{f_{bc}}{f_{bca}})^2 + (\frac{\tau}{\tau_a})^2 \leq 1.2$$

⑤ 축력과 휨모멘트의 동시 작용에 대한 제약조건식

$$G(6) = \frac{f_c}{f_{cax}} + \frac{f_{bc}}{f_{bca} (1 - \frac{f_{bc}}{f_{cax}})} \leq 1.0$$

$$\text{여기서, } f_{\text{cax}} = \frac{15000000}{\left(\frac{l}{b}\right)^2} \times 0.85$$

(2) 띠장의 제약조건식

① 휨응력 제약조건식

- 압축인 경우, $(4.5 < \frac{l}{b} < 30)$ 일 때

$$G(7) = 2[1750 - 30 \times (\frac{l}{b} - 4.5)] \times 0.85$$

$$-\frac{M_{\text{max}}}{Z} \geq 0$$

- 인장인 경우

$$G(8) = 1750 \times 0.85 - \frac{M_{\text{max}}}{Z} \geq 0$$

전단응력과 합성응력에 관한 제약조건식은 버팀보의 제약조건식과 같다.

(3) 사용성 및 단면형상의 제약조건식

H형강 단면의 사용성 및 단면형상에 대한 제약조건식은 다음과 같다.

$$G(9) = (t_w)_i - 0.09 > 0$$

$$G(10) = (d)_i - 0.25 > 0$$

$$G(11) = (b_f)_i - 0.25 > 0$$

$$G(12) = (t_f)_i - 0.14 > 0$$

(4) 부가적인 제약조건식

말뚝의 두부와 첨단부에서의 변위, 엄지말뚝의 최대유효 좌굴장 및 버팀보의 수평간격 등의 부가적인 제약사항은 Table 3과 같다.

Table 3. Additive constraints

종류	범위
변위	사질토 : 말뚝 두부 3cm, 최종굴착바닥에서 1cm
엄지말뚝	최대 유효 좌굴장 : 4cm
버팀보	수평간격 : 2.5cm

5. 최적설계의 적용 및 결과고찰

버팀보 지지방식의 지하철 가시철구조물의 단면형상을 고려하여 최적설계를 실시하고 본 논문에서 개발된 최적설계 알고리즘을 검증하기 위해 실제 대구지하철 2호선 가시철구조물

의 단면형상과 비교·검토하였다. 대구지하철 2호선 가시철구조물의 최적설계 모델링은 Fig. 10과 같다.

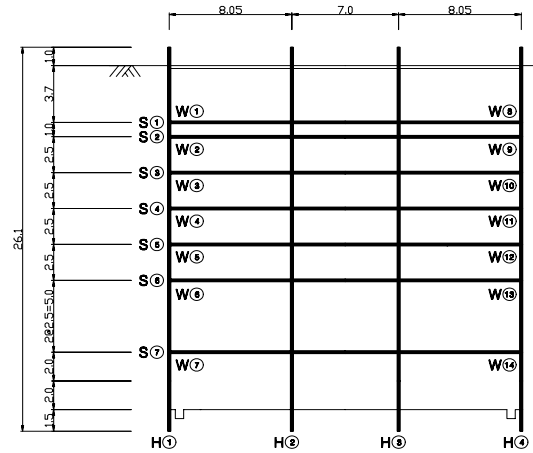


Fig. 10. Optimum design modeling of temporary structure

5.1 최적설계 결과

(1) 엄지말뚝의 최적설계 결과

버팀보 지지방식의 지하철가시철 구조물 중 엄지말뚝에 대한 최적설계 결과는 Table 4와 같으며 엄지말뚝의 목적함수 수렴과정은 Fig .11과 같다.

Table 4. Optimum design result of soldier pile

제원 방법	Member Group	member ID	Section	Total Weight (kg/m)
기존 설계	엄지 말뚝	1	H250×250×9×14	7370.9
		4	H250×250×9×14	
	중간 말뚝	2	H250×250×9×14	
		3	H250×250×9×14	
최적 설계	엄지 말뚝	1	H248×249×8×13	6663.33
		4	H248×249×8×13	
	중간 말뚝	2	H244×252×11×11	
		3	H244×252×11×11	

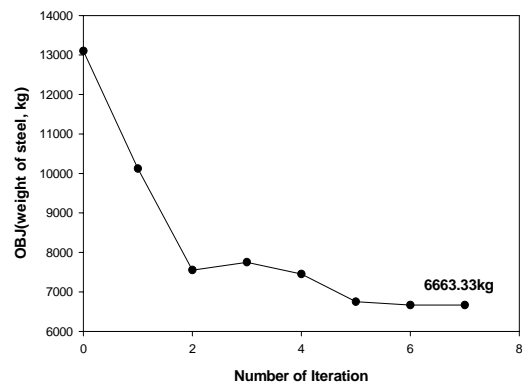


Fig. 11. History of objective function of soldier pile

(2) 버팀보의 최적설계 결과

버팀보에 대한 최적설계 결과는 Table 5와 같으며 버팀보의 목적함수 수렴과정은 Fig. 12과 같다.

Table 5. Optimum design result of strut

제원 방법	Member Group	member ID	Section	Total Weight (kg/m)
기존 설계	버팀보	1	H298×299×9×14	14067.9
		2	H298×299×9×14	
		3	H298×299×9×14	
		4	H298×299×9×14	
		5	H298×299×9×14	
		6	H298×299×9×14	
		7	H298×299×9×14	
최적 설계	버팀보	1	H248×249×8×13	12919.8
		2	H250×250×9×14	
		3	H250×255×14×14	
		4	H250×255×14×14	
		5	H294×302×12×12	
		6	H294×302×12×12	
		7	H298×299×9×14	

(3) 띠장의 최적설계 결과

띠장에 대한 최적설계 결과는 Table 6과 같으며 띠장의 목적함수 수렴과정은 Fig.13과 같다.

Table 6. Optimum design result of wale

제원 방법	Member Group	member ID	Section	Total Weight (kg/m)
기존 설계	띠장	1,8	H298×299×9×14	609.0
		2,9	H298×299×9×14	
		3,10	H298×299×9×14	
		4,11	H298×299×9×14	
		5,12	H298×299×9×14	
		6,13	H298×299×9×14	
		7,14	H298×299×9×14	
최적 설계	띠장	1,8	H244×252×11×11	535.6
		2,9	H298×201×9×14	
		3,10	H250×250×9×14	
		4,11	H250×255×14×14	
		5,12	H250×255×14×14	
		6,13	H294×302×12×12	
		7,14	H298×299×12×12	

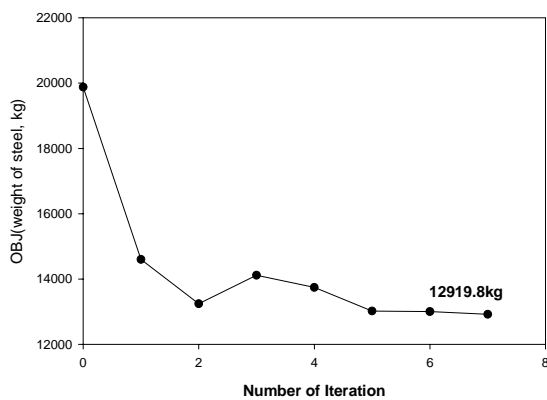


Fig. 12. History of objective function of strut.

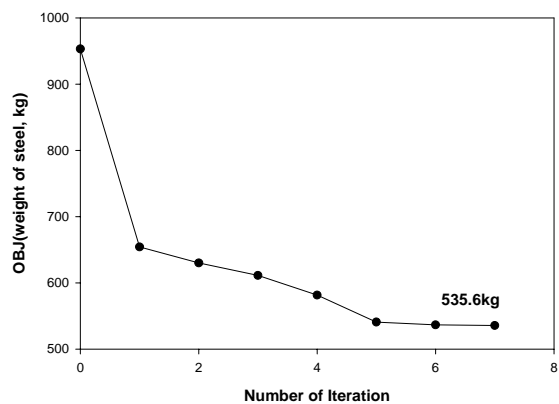


Fig. 13. History of objective function of wale.

5.2 결과 및 고찰

본 연구에서 지하철 2호선의 버팀보 지지방식 지하철 가시철구조물의 해석 및 최적설계의 결과를 중심으로 고찰하면 다음과 같다. 최적설계 프로그램의 흐름도에서 언급한 바와 같이 각 설계변수의 초기 값을 가정하여야 하는데, 가정한 설계변수의 초기 값은 지하철 가시철구조물에 널리 사용되고 있는 H-형강의 표준단면 형상을 적용하였다.

탄소성보법 구조모델링을 적용하므로써 보다 정밀한 구조해석이 가능하였으며 구조물의 정확한 거동을 파악할수 있었다.

가시철구조물의 최적설계는 각 부재의 구조해석결과 발생하는 최대단면력을 기준으로 수행되었다. 지하철 2호선 가시철구조물의 최적설계를 수행하여 기존설계과 비교한 결과 H형강의 중량인 목적함수는 7회의 다단계 반복수행을 거쳐 수렴하는 것으로 나타났으며 엄지말뚝의 경우는 기존설계의 중량은 Table 4에 나타나듯이 7370.9kg인 반면에 최적설계를 수행한 결과는 6663.33kg으로 약 10%의 경제적인 설계를 나타내고 있으며, 버팀보의 경우는 기존설계와 최적설계의 중량은 Table 5에 나타냈으며 각각 14067kg과 12919.8kg으로 약9%의 경제적인 것으로 나타났다.

또한, 띠장의 경우는 기존설계와 최적설계의 중량은 609kg와 535.6kg으로 Table 6에 나타나 있으며 기존설계와 비교하면 약 12%의 경제적인 것으로 나타났으며, 엄지말뚝이나 버팀보에 비하여 더 경제적인 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 EXCAD을 사용하여 대구지하철 2호선 가시철구조물의 건설공사 구간에 대하여 굴착단계별 해석을 수행하였으며, 다단계 동적계획법에 의한 지하철 가시철구조물의 최적설계 프로그램을 개발하고 단면 최적화를 실시하여 현재 가시철구조물의 단면과 비교·검토하였다.

1. 본 연구에서는 버팀보 지지방식의 H형강 형태 가시철구조물을 탄소성법으로 해석하고 최적단면으로 설계할 수 있는 자동화된 이산화 최적설계 프로그램을 개발하여 제시하였다.
2. 최적설계 프로그램을 이용하여 국내에서 생산되는 H형강의 단면최적설계를 수행한 결과 기존에 설계된 H형강의 중량보다 약 9%정도 경제적인 단면으로 설계되어진다. 그러므로 본 연구에서 개발한 최적설계 프로그램을 이용하여 버팀보 지지방식의 가시철구조물을 설계하면 구조적으로 안정하고 경제적인 설계를 수행할 수 있다고 판단된다.
3. 본 연구에서 제안한 최적설계 프로그램을 이용하여 버팀보 지지방식의 가시철구조물을 설계하면 안전성과 경제성이 고려된 Guide Line이 최적의 이산화상태 결과를 제시하며 실 설계자들은 최적설계 결과를 고려하여 구조물의 중량도와 지반상태에 따라 규격제품의 구조체들을 합리적으로 상향조정하여 보다 안전성 있는 구조물의 설계가 가능하리라 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Terzaghi, K. and Peck, R. B. "Soil Mechanics in Engineering practice", 1st Ed., John Wiley and Sons, New York, pp 345-352, (1967)
- 2) Tschebotarioff, G. P. "Foundations Retaining and Earth Structure", Mc Graw-Hill, New York, pp 415-457, (1973)
- 3) 대구지하철 2호선 설계기준, pp.87-112, (1997)
- 4) EXCAD Ver.2.20 사용 설명서, (1993)
- 5) 박순웅, 박문호, 권민호, 장준호, 한국전산구조공학회논문집, **15**, 315, (2002)
- 6) 홍원표, 송영석, 김동욱, 대한토목학회논문집, **24**, 183, (2004)

(2008년 5월 23일 접수, 2008년 8월 22일 채택)