

지반조건을 고려한 브레이스된 강골조 구조물의 내진 최적설계

Optimum Design of Braced Steel Framed Structures Considering Soil Condition Under Earthquake Loads

박 문 호* 김 기 욱** 이 승 조*** 박 정 활****
Park, Moon-Ho Kim, Ki-Wook Lee, Seung-Jo Park, Jung-Hwal

Abstract

This study is structural analysis and continuous, discrete optimum design of braced steel frame structures under earthquake loads considering soil condition. The program which is able to perform simultaneously structural analysis and continuous, discrete optimum design, it is applied steel frame structures using unbraced, Z-braced, and X-braced types and analyze the program about static loads and seismic loads. The purpose of this study is to present proper braced type for seismic effects by comparing and analyzing results of analytic method about various cases using specially Newmark-Hall design spectrum, ATC design spectrum and ATC equivalent static analysis and finding minimum weight and design variables which satisfy the ultimate strength requirements of AISC-ASD specifications, the serviceability requirements and allowable story drift requirements of ATC-3-06 and various constraints.

요 지

본 연구는 지반조건을 고려한 브레이스된 강골조 구조물의 연속 및 이산화 내진 최적설계에 관한 내용이다. 지반조건을 고려한 구조해석과 연속 및 이산화 최적설계를 동시에 수행할 수 있는 내진 최적설계 프로그램을 개발하여 이를 브레이스가 없는 경우, Z-형, X-형의 브레이스 배치형태를 사용한 강골조 구조물에 적용하였고, 정하중, 지진하중을 고려하여 해석하였다. AISC-ASD 시방규정과 ATC-3-06에 규정한 사용성, 허용층간변위 및 다양한 제약조건을 모두 만족하는 최소중량, 설계변수 등을 도출하고, 특히 Newmark-Hall 설계스펙트럼 해석과 지반조건을 고려한 ATC 설계스펙트럼 해석 및 ATC 등가정적해석의 해석결과를 비교·분석함으로써 보다 내진에 적합한 브레이스 배치 형태 및 적용한 해석방법이 최적설계에 미치는 영향을 찾고자 하는데 그 목적이 있다.

Keywords : Optimum design, Steel structure, AISC-ASD, ATC-3-06, SUMT

핵심 용어 : 최적설계, 강구조물, 허용응력설계법, ATC-3-06, 축차무제약최소화기법

* 정희원, 경북대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 정희원, 교신저자 Post-doc, The Ohio-state University, 공학박사
** 정희원, Post-doc, Purdue University, 공학박사
** 정희원, 상무, 한도엔지니어링, 구조기술사, 박사수료

E-mail: ce5@korea.com 1-614-688-9033

•본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내주
시면 2006년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

강구조물은 콘크리트구조물보다 자중면에서 유리하여 경량이면서 높은 내하력이 요구되는 고층구조물에 거의 지배적인 구조형식으로 사용되고 있다. 강구조물로 축조할 경우 재료비, 인건비의 문제를 기계화 시공 및 공장제품화에 의해 공사기간을 단축하고, 설계와 시공면에서 복잡하고 난해한 과정이 필요치 않기 때문에 건설공사의 질적 이미지 향상 및 공사관리가 용이한 장점이 있다. 이러한 장점 등으로 강골조 구조물에 대한 많은 연구와 그 결과를 이용한 실구조물의 시공이 활발히 이루어지고 있으나, 지반조건과 지진하중을 고려한 브레이스된 강골조 구조물의 최적설계에 대한 연구는 다소 미흡한 편이다.

1998년 발표된 논문⁽²⁾에는 UBC규정에 의한 LRFD (Load Resistance Factor Design)설계였으나, 본 연구에서는 ATC-3-06 규정⁽³⁾에 의한 ASD⁽⁴⁾ (Allowable Strength Design) 설계법으로 프로그램을 구현하여 최적설계를 수행하였으며, 2004년 발표된 논문⁽¹⁾보다는 지반조건을 고려하고, 설계스펙트럼 해석을 이용한 동적설계 항목을 추가하였다. 그리고 얼마전 국내 대기업 APT현장에서 처음으로 ATC규정에 의해 구조안전성 검토를 수행한 것을 볼 수 있었으나, 철근콘크리트 구조물로서 최적설계는 아니었다. 그러므로 본 연구에서는 지반조건을 고려한 브레이스된 강골조 구조물의 연속 및 이산화 내진 최적설계에 관한 내용을 다루었다. 즉 지반조건을 고려한 구조해석과 연속 및 이산화 최적설계를 동시에 수행할 수 있는 내진 최적설계 프로그램을 개발하여 이를 브레이스가 없는 경우 및 Z-형, X-형의 브레이스 배치형태를 사용한 강골조 구조물에 적용하였고, 정하중, 지진하중을 고려하여 해석하였다. AISC-ASD 시방규정과 ATC-3-06에 규정한 사용성, 허용충간변위 및 다양한 제약조건을 모두 만족하는 최소중량, 설계변수 등을 도출하고, 특히 Newmark-Hall 설계스펙트럼해석과 지반조건을 고려한 ATC 설계스펙트럼해석 및 ATC 등가정적해석의 해석결과를 비교·분석함으로써 보다 내진에 적합한 브레이스 배치형태 및 적용한 내진해석 방법이 최적설계에 미치는 영향을 찾고자 하는데 그

목적이 있다.

2. 지반조건을 고려한 내진구조해석

2.1 지반계수(S)

심층부의 단단한 지반에서 출발하여 연약한 토질층을 통과하는 지진파는 대체로 도달된 지면에서 증폭된 지반 운동을 한다.

ATC-3-06에서는 Table 1과 같이 지반의 종류에 따라서 암반인 경우에 대하여 연약층에 대한 지반계수를 최고 1.5배의 증폭효과가 있는 것으로 간주하고 있으며 이러한 기준이 1985년도 이후 수정된 UBC에서도 추가로 채택되었다. 이후 우리나라의 규준에서도 ATC의 방법을 택하여 지반종류를 3종류로 구분하고 1.0~1.5의 계수를 적용하고 있다.

Table 1 ATC-3-06에 제시된 지반계수

| TYPE | SOIL PROFILE | S |
|----------------|--------------------------------------|-----|
| S ₁ | Rock or shallow stiff soil over rock | 1.0 |
| S ₂ | Deep stiff soil over rock | 1.2 |
| S ₃ | Soft soil | 1.5 |

2.2 설계스펙트럼

본 연구에서는 Fig. 1의 Newmark-Hall의 설계스펙트럼과 Fig. 2의 ATC 설계스펙트럼을 각각 사용하였다.

Newmark-Hall의 설계스펙트럼은 다수의 지진자료들을 이용하여 반응스펙트럼을 구하고, 이를 통계적으로 조합한 후 이렇게 조합한 스펙트럼을 이용하여 단주기, 중간주기, 장주기 영역의 유사 가속도 스펙트럼 값에서 최대 지반가속도에 대한 일정한 배율을 구하고, 이러한 배율(Amplification)을 이용하여 작성한 스펙트럼을 설계스펙트럼으로 제안한 것을 말한다.

ATC 설계스펙트럼은 Fig. 2와 같이 지반종류를 고려하여 3개의 가속도 스펙트럼의 형태로 제안된 설계스펙트럼으로 앞서 언급한 Newmark-Hall 스펙트럼과 함께 설계스펙트럼의 대표적인 형태이다.

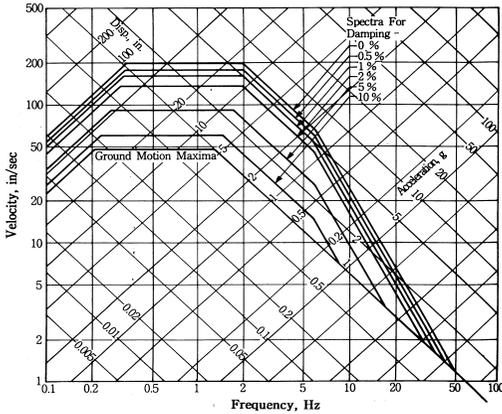


Fig. 1 Newmark-Hall 설계스펙트럼

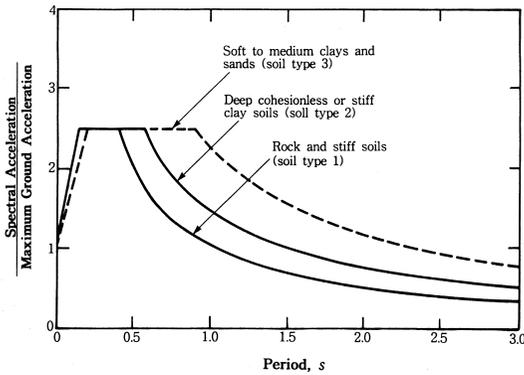


Fig. 2 ATC 설계스펙트럼

2.3 등가 지진하중 산정

ATC-3-06 규정(3)에서는 구조물의 동적특성과 총 무게에 비례하는 밀면 전단력을 구하고, 이 밀면 전단력으로부터 구조물의 각 층에 작용하는 층지진하중을 구한다. 그러므로 구조물에 대한 내진설계에서는 밀면 전단력이 가장 중요한 과정으로 지반의 위치, 구조물의 용도, 고유진동주기, 구조방식, 유효무게 및 지반의 성질에 따라 ATC-3-06(3)에서 다음과 같은 형태로 규정하고 있다.

$$V = \frac{1.2A_v S}{RT^{2/3}} W \quad (1)$$

$$A_a = \frac{EPA}{g} \quad (2)$$

$$A_v = \frac{EPV}{30} \quad (3)$$

$$T_a = C_T \cdot h_n^{3/4} \quad (4)$$

여기서, 식(1)은 밀면 전단력으로 지진하중을 등가의 정적하중으로 환산하였을 때 건물의 밀면 상부에 작용하는 지진하중의 총합을 나타낸다. A_v 는 지역계수이고, S, W, R, T 는 각각 지반계수, 구조물의 전체 중량, 반응수정계수, 기본진동주기를 나타낸다. 식(2)는 지역계수를 표현하며, A_a 는 유효 최대 가속도 (EPA)을 나타내는 지역계수로서 단주기 건물에 활용되며, 식(3)에서 A_v 는 유효 최대 속도(EPV)를 나타내는 지역계수로서 중·장주기 건물에 활용된다. 식(4)는 기본진동주기로서 구조형식과 재료에 따라 구분하고 있으며 C_T 가 철골 구조일 때 0.035이며, h_n 은 밀면으로부터 최상층까지의 구조물의 높이(feet)를 나타낸다.

3. 강골조 구조의 최적화 방법

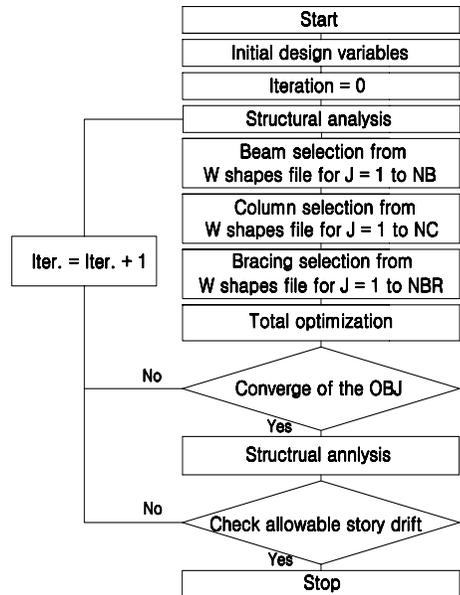


Fig. 3 최적설계 알고리즘

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 최적설계 알고리즘으로 지반조건, P-Δ효과를 고려한 평면골조의 유한요소를 이용한 구조해석⁽⁵⁾과 동적계획법⁽⁶⁾과 축차무제약 최소화기법(SUMT)⁽⁶⁾에 의한 연속 및 이산화 최적설계를 동시에 수행할 수 있도록 하였다. 특히 Fig. 3에서 구조해석부분을 ATC 등가정적하중 해석, ATC스펙트럼 및 Newmark-Hall 스펙트럼해석으로 구분하여 각각의 경우에 대하여 2.3절의 등가지진 해석식과 Fig. 1 및 Fig. 2의 스펙트럼 곡선을 사용하여 지반조건을 고려하였다.

3.1 구조시스템의 최적화 문제 형성

본 연구에서는 AISC 규격의 상용 제품인 W형강(W4×13~W44×335)을 이용하여 이산화 최적설계를 수행하였고, 현장에서 직접 조립·제작하는 형강의 경우는 설계변수를 연속최적화 방법을 이용하여 산출하였다. 그리고 연속 및 이산화 최적화 방법은 구조물의 부재별 최적설계단면을 결정하고, 부재별 최적단면으로 구성된 전체구조가 최적화 되도록 하는 동적계획법⁽⁶⁾을 사용하였고, 최적화 기법은 Penalty 함수를 이용하여 무제약 최소화 문제로 변환시킨 목적함수의 최소해를 가능해의 영역안에서부터 지배적인 제약 조건의 경계부를 접근시켜 최적해를 구하는 축차무제약 최소화기법⁽⁶⁾(SUMT)을 사용하였다.

강골조 구조물의 전체 중량을 최소화하기 위해서 식 (5)와 같이 중량을 목적함수로 하였다.

$$\text{Obj}(x) = \rho \left[\sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NB} (V_b)_{ij} + \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NC} (V_c)_{ij} + \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NBR} (V_{br})_{ij} \right] \quad (5)$$

여기서, $(V_b)_{ij}$ 는 i번째 층의 j번째 보강재의 체적, $(V_c)_{ij}$ 는 i번째 층의 j번째 기둥 강재의 체적, $(V_{br})_{ij}$ 는 i번째 층의 j번째 브레이스 부재의 체적, NS는 전체 구조물의 층 수, NC는 한 층의 기둥 수, NB는 전체 구조물의 경간 수, NBR은 한층의 브레이스 부재 수이다.

3.2 부재의 설계 제약조건식

각각의 부재 설계시 고려해야 할 압축, 인장, 휨, 전단조건 등을 AISC-ASD⁽⁴⁾ 1989의 설계규정에 의거하여 고려하였다.

(1) 허용압축응력의 제약조건식

축방향 허용압축응력 F_a 의 제약조건식은 식 (6)과 같다.

$$G_{ij}(1) = F_a - \frac{12\pi^2 E}{23(Kl/r)^2} \leq 0 \quad (6)$$

압축부재의 세장비는 AISC-ASD E1 시방규정⁽⁴⁾에 따라 다음의 제약조건식인 식 (7)을 만족시켜야 한다.

$$G_{ij}(2) = 200 - \left(\frac{Kl}{r}\right) \geq 0 \quad (7)$$

여기서, Kl/r 은 세장비이다.

(2) 허용인장응력의 제약조건식

축방향 허용인장응력 F_a 의 제약조건식은 식 (8)과 같다.(ASD D1)

$$G_{ij}(3) = F_a - 0.6F_y \leq 0 \quad (8)$$

인장을 받는 부재에서 $\frac{L}{r}$ 은 300보다 작도록 규정하고 있으며, 제약조건식은 식 (9)와 같다.

$$G_{ij}(4) = 300 - \frac{L}{r} \geq 0 \quad (9)$$

(3) 허용휨응력의 제약조건식

허용휨응력은 compact 단면인 경우와 non-compact 단면인 경우로 분리되어 식 (10)과 식 (11)로 정식화된다.

① compact 단면인 경우

$$G_{ij}(5) = F_b - 0.66 F_y \leq 0 \quad (10)$$

② noncompact 단면인 경우

$$G_{ij}(6) = F_b - 0.60 F_y \leq 0 \quad (11)$$

(4) 허용전단응력의 제약조건식

허용전단응력에 대한 제약조건식은

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{380}{\sqrt{F_y}} \text{인 경우 ASD(4) F4-1 시방규정의}$$

로부터 식 (12)와 같이 정식화된다.

$$G_{ij}(7) = F_v - 0.40 F_y \leq 0 \quad (12)$$

3.3 단면형상에 대한 제약조건식

단면형상에 사용된 설계변수는 Fig. 4와 같으며, 사용된 b_f , t_f , t_w 및 d 의 단위는 inch, F_y 의 단위는 lb/in^2 이다.

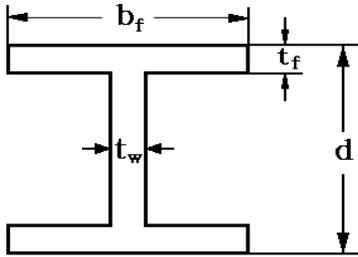


Fig. 4 형강의 단면제원

(1) 보부재의 단면형상에 관한 제약조건식은 식 (13)부터 식 (16)과 같이 정식화 하였다.

$$G_{ij}(8) = (b_f)_{ij} - (b_f)_{i+1,j} \geq 0 \quad (13)$$

$$G_{ij}(9) = (d)_{ij} - (d)_{i+1,j} \geq 0 \quad (14)$$

$$G_{ij}(10) = (t_f)_{ij} - (t_f)_{i+1,j} \geq 0 \quad (15)$$

$$G_{ij}(11) = (t_w)_{ij} - (t_w)_{i+1,j} \geq 0 \quad (16)$$

(2) 기둥부재의 단면형상에 관한 제약조건식은 식 (17)부터 식 (22)까지 정식화된다.

$$G_{ij}(12) = (b_f)_{ij} - (b_f)_{i+1,j} \geq 0 \quad (17)$$

$$G_{ij}(13) = (d)_{ij} - (d)_{i+1,j} \geq 0 \quad (18)$$

$$G_{ij}(14) = (t_f)_{ij} - (t_f)_{i+1,j} \geq 0 \quad (19)$$

$$G_{ij}(15) = (t_w)_{ij} - (t_w)_{i+1,j} \geq 0 \quad (20)$$

$$G_{ij}(16) = (b_{cf})_{ij} - (b_{bf})_{i+1,j} \geq 0 \quad (21)$$

$$G_{ij}(17) = (d - 2t_{cf})_{ij} - (b_{bf})_{i+1,j} \geq 0 \quad (22)$$

(3) 브레이스 부재의 단면형상에 관한 제약조건식은 식 (23)부터 식 (26)과 같이 정립된다.

$$G_{ij}(18) = (b_f)_{ij} - (b_f)_{i+1,j} \geq 0 \quad (23)$$

$$G_{ij}(19) = (d)_{ij} - (d)_{i+1,j} \geq 0 \quad (24)$$

$$G_{ij}(20) = (t_f)_{ij} - (t_f)_{i+1,j} \geq 0 \quad (25)$$

$$G_{ij}(21) = (t_w)_{ij} - (t_w)_{i+1,j} \geq 0 \quad (26)$$

(4) 폭-두께비에 관한 제약조건식

① compact 단면일 경우

W형강 부재가 국부좌굴이 없이 전체 강도를 발휘할 수 있는 compact 단면이 되기 위해서는 아래의 단면 폭-두께비에 관한 제약식인 식 (27)을 만족하여야만 한다.(ASD(4) TABLE B5.1)

$$G_{ij}(22) = \frac{65}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{b_f}{2 t_f} \right)_{ij} \geq 0 \quad (27)$$

② noncompact 단면일 경우

W형강 부재가 국부좌굴이 발생하기 전까지 초기항복에 대응하도록 하는 noncompact 단면이 되기 위해서는 아래의 단면 폭-두께비에 관한 제약식인 식 (28)에서 식 (30)을 만족하여야만 한다.(ASD⁽⁴⁾ TABLE B5.1)

$$G_{ij}(23) = \frac{95}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{b_f}{2 t_f} \right)_{ij} \geq 0 \quad (28)$$

$$G_{ij}(24) = \frac{253}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{d}{t_w} \right)_{ij} \geq 0 \quad (29)$$

$$G_{ij}(25) = \frac{760}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{h}{2 t_w} \right)_{ij} \geq 0 \quad (30)$$

4. 모델 해석 및 결과고찰

4.1 브레이스 배치 형태에 따른 구분

구조물 최적화를 위해 적용한 5층-2경간 강골조 구조물의 형상은 Fig. 5와 같고 설계조건은 Table 2와 같으며, 브레이스는 강접(RIGID)으로 연결하였다.

4.2 브레이스 종류별 최적설계 결과

Fig. 5와 같은 브레이스의 유무와 형상에 따른 서로 다른 3종류의 5층2경간 강골조 구조물에 Table 2의 설계조건을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 각각

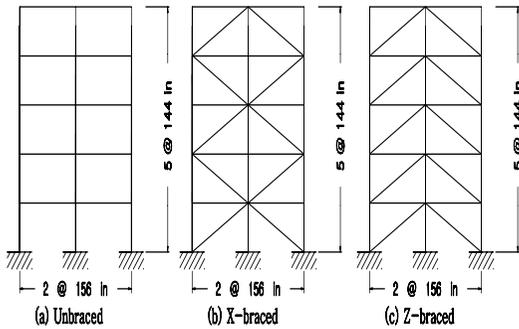


Fig. 5 대상구조물의 형상(Type 별)

Table 2 설계조건

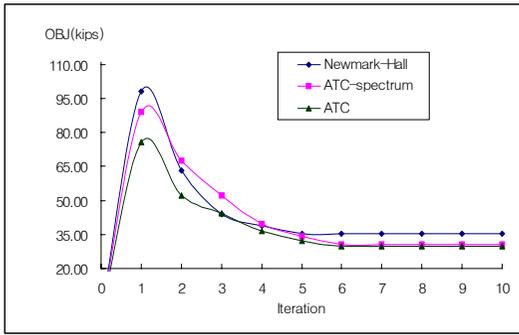
| | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 지역계수 (A_v) | 0.40 |
| 기본진동주기 (T) | 0.638sec |
| 지반계수 (S) | Table 1참조 |
| 반응수정계수 (R) | 6.0 |
| Seismicity Index | 4 |
| Seismic Hazard Exposure Group | II |
| Seismic Performance Category | C |
| E | 29000 ksi |
| 단위중량 | 0.283 lb/in ³ |
| 최소항복응력 | 36 ksi |
| 최소인장응력 | 65 ksi |
| 고정하중 | 400 lb/ft |
| 활하중 | 300 lb/ft |

Table 3 이산화 최적설계 결과

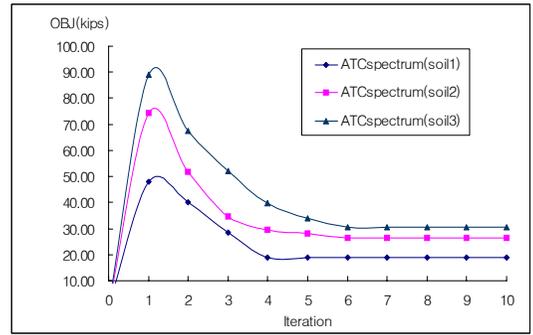
| Discrete optimum design results | | | |
|---------------------------------|-----------------------|--------------|------------------------|
| Bracing type | Newmark-Hall spectrum | ATC-spectrum | Equivalent static(ATC) |
| Weight(Kips) | Unbraced | | |
| BEAM | 14.794 | 12.833 | 13.143 |
| COLUMN | 20.483 | 17.769 | 16.708 |
| BRACING | - | - | - |
| Total OBJ | 35.277 | 30.602 | 29.851 |
| Bracing type | X-braced | | |
| Weight(Kips) | X-braced | | |
| BEAM | 8.362 | 8.330 | 4.355 |
| COLUMN | 15.733 | 14.303 | 9.692 |
| BRACING | 5.693 | 4.212 | 4.431 |
| Total OBJ | 29.788 | 26.845 | 18.478 |
| Bracing type | Z-braced | | |
| Weight(Kips) | Z-braced | | |
| BEAM | 9.283 | 6.989 | 5.492 |
| COLUMN | 17.007 | 15.215 | 9.167 |
| BRACING | 5.772 | 6.263 | 4.833 |
| Total OBJ | 32.062 | 28.467 | 19.492 |

의 대상 구조물에 대해 Newmark-Hall 설계스펙트럼과 ATC Soil 3의 지반조건으로 등가정적해석과 설계스펙트럼해석을 통한 구조해석을 실시하고 그 해석결과를 이용하여 연속 및 이산화 최적화를 수행하였다. 최적설계결과와 목적함수의 수렴과정은 Table 3과 Fig. 6의 (a), (b), (c)와 같다.

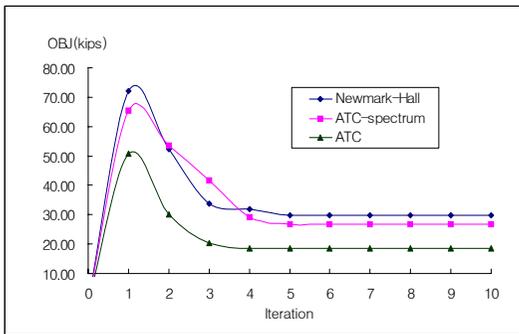
Fig. 6에서와 같이 각 브레이스 타입에서 설계방식에 따른 목적함수는 모두 7회의 Iteration 내에서 수렴하였고, 브레이스 형태별 강골조 구조물의 지진하중에 대한 내진효과를 비교하기 위하여 3종류의 타입에서의 각각의 내진방법에 따른 이산화 최적화를 비교한 결과 Newmark-Hall 스펙트럼을 이용한 방법이 가장 높은 목적함수의 값을 보였고 다음으로 ATC 스펙트럼, ATC 등가정적해석의 순으로 나타났다. 등가정적에 의한 최적값은 Unbraced 구조물에서 브레이스가 있는 구조물보다 약 1.6배의 큰 값을 보였다. 전체적인 브레이스 타입별 결과를 보면 X-braced형의 구조물이 모든 내진설계법에서 가장 경제적인 설계가 되었고, 다음으로 Z-braced, Unbraced 순으로 최적화가 되었다.



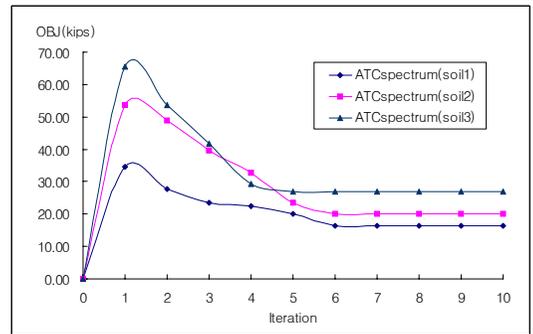
(a) 목적함수의 수렴과정(Unbraced)



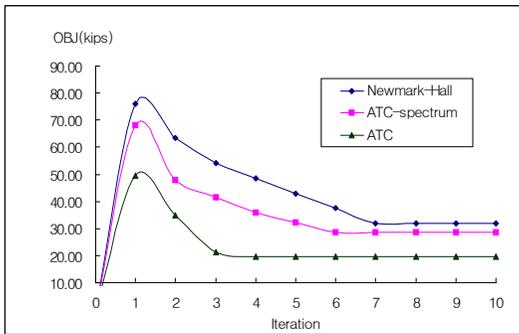
(a) 목적함수의 수렴과정(Unbraced)



(b) 목적함수의 수렴과정(X-braced)

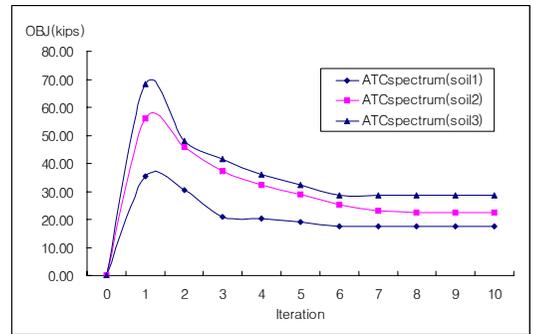


(b) 목적함수의 수렴과정(X-braced)



(c) 목적함수의 수렴과정(Z-braced)

Fig. 6 목적함수의 수렴과정



(c) 목적함수의 수렴과정(Z-braced)

Fig. 7 목적함수의 수렴과정

4.3 지반조건에 따른 최적설계 결과

앞의 예제와 동일한 설계조건으로 ATC Soil 조건에 따른 브레이스별 최적화를 수행하였다. 여기서 구한 최적값을 사용하여 지반타입별 등가정적해석과 스펙트럼해석값을 비교하였다.

최적설계결과에 따른 목적함수의 수렴과정은 Fig. 7의 (a),(b),(c)와 같고 정적해석과 동적해석의 각 Soil 조건에 따른 최적값의 비교는 Table 4에 나타나었다.

Fig. 7은 각 지반조건 따른 브레이스별 최적화를 스펙트럼해석으로 목적함수의 수렴과정을 나타내었다.

목적함수의 수렴값은 모든 브레이스 타입에서 Soil 1의 값이 가장 작게 나타났으며, Soil 2, Soil 3의 순으로 최적값의 결과가 나타났다. 또한 ATC 등가정적 해석에서도 Fig. 7과 같은 형태의 결과가 도출되었다.

Table 4 지반에 따른 최적값의 비교
(a) 등가정적해석에서의 지반별 최적설계 결과

| Discrete optimum design results | | | |
|---|--------|--------|--------|
| Soil type Bracing type Weight(Kips) | Soil 1 | Soil 2 | Soil 3 |
| Unbraced | | | |
| BEAM | 8.207 | 11.251 | 13.143 |
| COLUMN | 10.433 | 14.303 | 16.708 |
| BRACING | - | - | - |
| Total OBJ | 18.64 | 25.554 | 29.851 |
| X-braced | | | |
| BEAM | 3.709 | 4.162 | 4.355 |
| COLUMN | 8.255 | 9.263 | 9.692 |
| BRACING | 3.774 | 4.235 | 4.431 |
| Total OBJ | 15.783 | 17.660 | 18.478 |
| Z-braced | | | |
| BEAM | 6.068 | 7.086 | 5.492 |
| COLUMN | 8.402 | 9.812 | 9.167 |
| BRACING | 1.369 | 1.450 | 4.833 |
| Total OBJ | 15.839 | 18.348 | 19.492 |

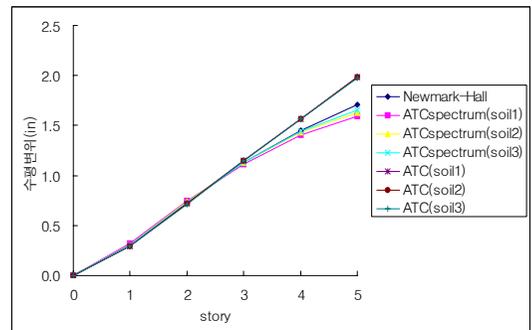
(b) 설계스펙트럼해석에서의 지반별 최적설계 결과

| Discrete optimum design results | | | |
|---|--------|--------|--------|
| Soil type Bracing type Weight(Kips) | Soil 1 | Soil 2 | Soil 3 |
| Unbraced | | | |
| BEAM | 7.878 | 11.122 | 12.833 |
| COLUMN | 10.907 | 15.399 | 17.769 |
| BRACING | - | - | -- |
| Total OBJ | 18.785 | 26.521 | 30.602 |
| X-braced | | | |
| BEAM | 4.353 | 4.737 | 8.330 |
| COLUMN | 8.796 | 10.713 | 14.303 |
| BRACING | 3.360 | 4.657 | 4.212 |
| Total OBJ | 16.509 | 20.107 | 26.845 |
| Z-braced | | | |
| BEAM | 3.754 | 5.562 | 6.989 |
| COLUMN | 9.351 | 11.856 | 15.215 |
| BRACING | 4.391 | 4.933 | 6.263 |
| Total OBJ | 17.496 | 22.351 | 28.467 |

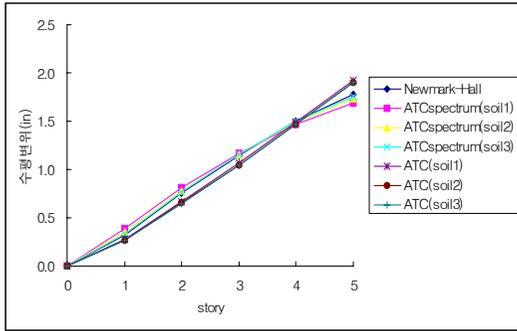
그리고 Table 4의 (a),(b)는 각 브레이스에 대한 ATC 등가정적해석과 ATC 설계스펙트럼해석의 최적값을 지반 타입별로 나타낸 것이다. 여기서 Table 4의 (a), (b)를 서로 비교해 보면 Soil 등급간 최적값의 차이가 12~38%정도 되는 것을 알 수 있으며, Soil 등급간 최적값의 비가 대략 1:1.2:1.5로서 Table 1의 지반계수와 비슷하게 산출되었다. 또한 모든 지반에서 Unbraced의 값이 가장 크게 나타났고, 다음으로 Z-braced, X-braced 순으로 최적화의 결과가 나타났다. 설계방법에서는 모든 지반형태에서 ATC 설계스펙트럼을 사용하였을 경우가 ATC 등가정적해석법의 최적값 보다 크게 나타났고, Unbraced 구조물에서는 정적해석과 동적해석의 최적치 차이가 0.8%~3.7%로 브레이스를 사용한 결과치에서의 12%~20%보다 적게 나타났다.

4.4 지반 Type에 따른 수평변위

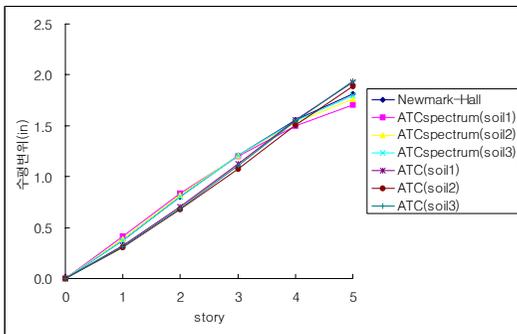
앞에서 구한 구조해석 및 최적설계의 결과를 토대로 하여 각 브레이스에 작용하는 지반 Type별 수평변위를 나타내면 Fig. 8의 (a), (b), (c)와 같다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 구조물의 최적화가 이루어진 단면에서의 각 층별 최대 수평변위의 결과에서는 층의 수가 올라가면서 각 타입별 작용하는 값들이 1차식의 직선적인 값으로 나타났고 각 브레이스 타입에서 Soil 1에 대한 설계스펙트럼 해석값이 가장 작게 나타났지만 각 설계법들마다 값 차이가 크게 발생하지 않았다.



(a) 지반 Type에 따른 수평변위(Unbraced)



(b) 지반 Type에 따른 수평변위(X-braced)



(c) 지반 Type에 따른 수평변위(Z-braced)

Fig. 8 지반 Type에 따른 수평변위

4.5 고층에서의 최적 내진설계

Fig. 9와 같이 X-brace 된 8층과 15층의 고층 강골조 구조물에 대해서 지반조건을 고려하여 ATC 등가정적해석과 ATC 설계 스펙트럼해석법에 따라 이산화 최적설계를 수행하였다.

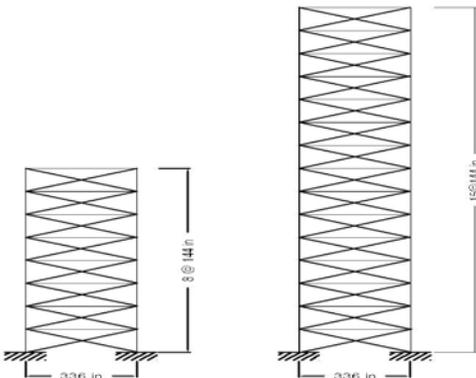
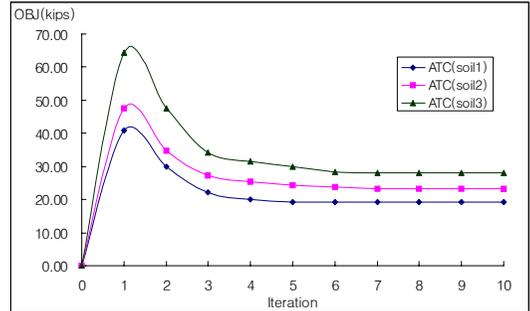
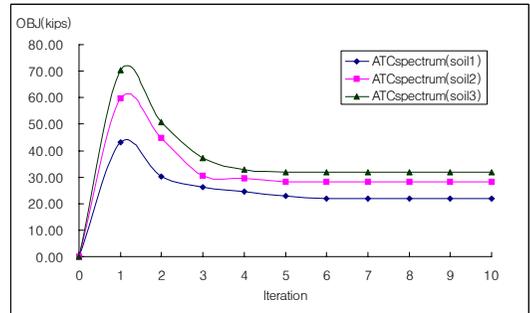


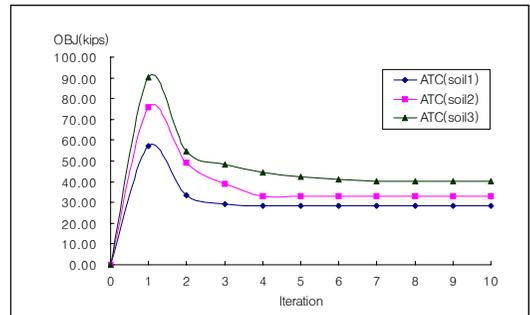
Fig. 9 고층 대상구조물의 형상(X-braced)



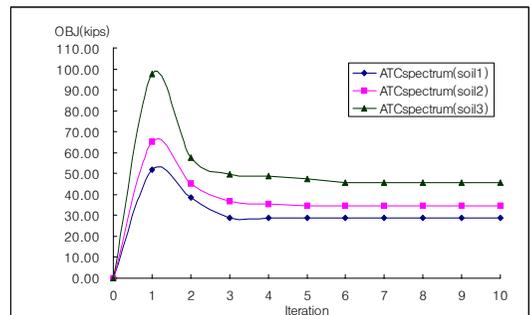
(a) 목적함수의 수렴과정 8층1경간(등가정적해석)



(b) 목적함수의 수렴과정 8층1경간(스펙트럼해석)



(c) 목적함수의 수렴과정 15층1경간(등가정적해석)



(d) 목적함수의 수렴과정 15층1경간(스펙트럼해석)

Fig. 10 고층 구조물의 목적함수 수렴과정

Fig. 10의 (a), (b), (c), (d)는 Table 2의 설계 조건으로 Fig. 9의 고층 구조물의 최적설계를 수행한 후 최적값을 그래프로 나타낸 결과이며, Fig. 11의 (a), (b)는 고층구조물의 각 층에 대한 수평변위의 결과를 나타낸 것이다.

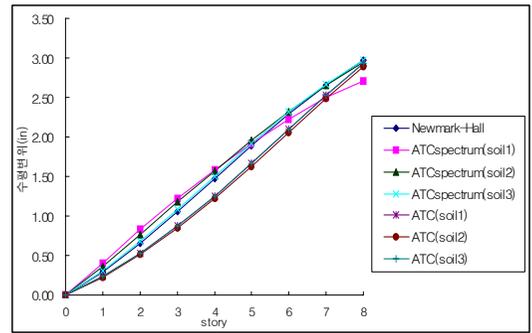
Fig. 11에 나타난 바와 같이 각 층별 최대 수평변위에 있어서는 각각의 구조물에 대해 위층으로 갈수록 거의 일정한 기울기로 증가하였다. 8층·15층에서 같은 층의 값을 비교해본 결과 15층의 값이 8층에서의 값보다 같은 층에서는 최대변위의 값이 작게 나타났다.

그리고 연구대상 구조물인 15층 1경간 X-brace 된 고층구조물과 동일한 비교를 위하여 변형된 z-brace 구조물과 unbrace 구조물의 8층 및 15층 1경간 구조물을 함께 비교하여 보았으며, 최적설계 결과 Fig. 10의 (a), (b), (c), (d)와 Fig. 11의 (a), (b)와 비슷한 형태의 그래프가 도출되었고, 특이하게 다른 점을 발견할 수 없었다.

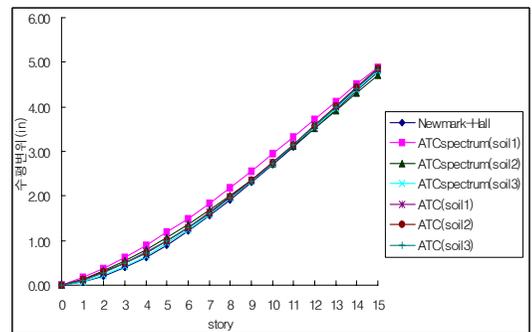
5. 결론

이상에서와 같이 지반조건과 지진하중을 고려한 브레이스된 강골조 구조물의 구조해석과 최적설계에 관한 연구결과와 결과고찰을 통한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) ATC-3-06 규정⁽²⁾에 의한 지반조건을 고려한 강골조 구조물을 등가정적해석법과 스펙트럼해석법을 이용하고 다단계 동적계획법 및 축차무제약최소화 기법을 이용한 이산화 최적설계프로그램을 개발하였다.
- 2) 각 브레이스형태별 강골조 구조물에 등가정적해석과 스펙트럼해석의 최적설계결과 Newmark-Hall 스펙트럼해석의 최적치 가장 높은 목적함수값을 나타내었고, 다음으로 ATC 스펙트럼해석, ATC 등가정적해석 순으로 나타남을 알 수 있었다
- 3) 지반조건에 따른 브레이스별 최적화를 ATC 등가정적해석과 ATC 설계스펙트럼해석으로 나누어 최적설계를 수행한 결과 목적함수의 수렴값은 모든 브레이스 타입에서 Soil 1의 값이 가장 작게 나타났으며, Soil 2, Soil 3 순으로 나타났다. 그리고



(a) 8층 구조물의 각 층별 수평변위



(b) 15층 구조물의 각 층별 수평변위

Fig. 11 고층 구조물의 각 층별 수평변위

Soil등급간 목적함수의 수렴값 차이가 12%~38% 정도 나고, Soil 등급간 최적값의 비가 대략 1:1.2:1.5로서 지반계수와 비슷하게 산출되었다. 이렇게 지반조건에 따른 영향이 크기 때문에 내진 최적설계시 지반의 이력조건을 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

- 4) 지반조건에 따라 브레이스별 최적값을 해석방법에 따라 비교해 본 결과 Unbraced 구조물에서는 등가정적해석과 동적해석의 최적치 차이가 0.8%~3.7%로 브레이스를 사용한 결과치에서의 12%~20%보다 적게 나타났다.
- 5) 동일한 하중조건으로 지반조건을 고려한 ATC 등가정적해석, ATC 설계스펙트럼해석 및 Newmark-Hall 스펙트럼해석법에 의한 최적설계를 수행한 결과, Unbraced, Z-braced, X-braced 강골조 구조물 중에서 X-braced 구조가 가장 경제적인 설계형식으로 나타났다.

-
- 6) 각 층별 최대 수평변위는 층의 수가 올라가면서 각 타입별 작용하는 값들이 1차식의 직선적인 값으로 나타났고, 각 브레이스 타입에서 Soil 1에 대한 설계스펙트럼 해석값이 가장 작게 나타났지만 각 설계법들마다 값 차이가 크지 않았다.

참고문헌

1. 김기욱, 박문호, “강골조 구조물의 내진 최적설계에 의한 브레이스 부재 배치에 관한 연구” 구조물진단학회지, 제9권, 3호, pp. 100~109, 2005.
2. 박문호, 조창근, 김기홍, 장준호, “최적내진설계에 의한 강뼈대구조물의 브레이싱효과” 대한토목학회 논문집, 제18권, 6호, pp. 829~839, 1998.
3. ATC-3-06, “Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings”, 1984.
4. American Institute of Steel Construction's, “Allowable Stress Design and Plastic Design Specification for Structural Steel buildings”, AISC-ASD, 1989.
5. 허택녕, “전산구조해석”, 엔지니어즈, 1994.
6. 박문호, 조효남, 류연선, “구조물의 최적설계”, 한국전산구조공학회, 단행본, 1991.

(접수일자 : 2005년 11월 16일)