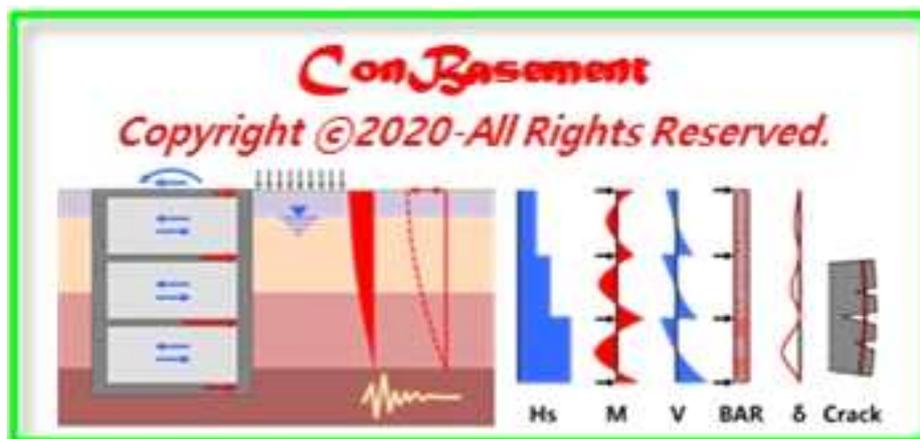


건축물의 지하구조 내진설계 프로그램 **ConBasement**에 의한
지하구조물 지진력저항시스템의 구조 해석과 설계 방법

2020년 6월 1일
(2020년 7월 8일 up date)



ConBasement(ver20-1)

머리말

이 보고서는 건축물의 지하구조 내진설계에 대한 해석과 설계방법에 대한 많은 문의가 있어서, 이에 대한 응답 목적으로 작성되었습니다. 프로그램 ConBasement의 개발에 적용된 기술적 배경(이론, 원리, 실무지침, 적용성 등)도 설명할 겸, ConBasement의 사용자 위주로 정리하였습니다.

ConBasement(ver.20.1)는 현행 건축구조기준 [KDS 41 17 00\(2019.3\)](#)의 '14. 지하구조물의 내진설계' 및 건축물의 지하구조 내진설계 지침([2020년2월3일 수정판 Rev.1](#), 대한건축학회)에 따라서 정적 횡토폰 및 지진 횡토폰을 산정하여 1방향 휨부재로서의 지하외벽(안전성, 사용성, 내구성)을 설계하고, 정적 횡토폰, 지진 횡토폰, 지하층의 지진 관성력 영향(사용자가 입력한 각 층 유효중량 및 중량중심 위치) 및 지상층의 지진 관성력(사용자가 입력한 1층 밑면 전단력, 전도모멘트) 영향을 고려하여 전단벽으로서의 지하 외벽 및 내벽(안전성)을 설계하며 지진횡토폰에 의해 발생하는 각 층의 횡변위와 휨부재의 국부변위를 계산합니다. 필요시 말뚝의 휨모멘트와 전단력도 산정합니다. 지상구조물의 지진 관성력 영향에 의한 지하층의 층 전단력은 사용자가 입력한 1층 밑면 전단력과 전도모멘트를 이용하여 1층 바닥과 기초바닥이 전도모멘트에 대해 짝힘으로 저항한다고 가정한 단순해석법에 의해 산정합니다. 각 지하 외벽 및 내벽에 작용하는 면내 전단력(직접 전단력 + 비틀림 전단력)은 벽의 면내 전단강성에 따른 하중분배와 벽그룹 강성중심과 횡하중 합력중심 간의 편심거리를 고려합니다. 또한 지반종류가 S_1 , S_2 혹은 S_4 에 속하면 기초하부 지반을 분석하여 기초저면에서의 전단파 속도가 260m/s 이상인 경우에는 지반-지하구조의 영향을 고려하여 지상구조물설계를 위한 유효지반증폭계수, 설계응답스펙트럼 및 내진설계범주를 결정합니다.

ConBasement는 응답변위법기반(이중코사인)에 의한 지반변형과 수평지반반력계수에 의한 지진토폰을 산정합니다. 휨부재로서의 지하외벽 해석에는 유한요소해석법(수직으로 10mm 간격)을 적용하였고, 전단벽으로서의 지하 외벽과 내벽 해석에는 각층 높이와 분할요소 길이로 한 유한요소해석법을 적용하였습니다. 이 프로그램은 각 층의 다이아프램은 큰 개구부가 없는 강체로 간주하고 면내 강성과 강도가 모든 하중전달 경로에 충분하다고 가정하고 해석합니다.

이 프로그램의 주된 개발목적은 휨부재로서의 지하외벽과 전단벽으로서의 지하 외벽 및 내벽을 보수적으로 간편하게 설계하기 위한 것으로 벽체의 축력에 관련된 해석과 설계는 수행하지 않습니다. 또한 터널과 같이 전단벽이 없는 관형 구조물은 적용할 수 없습니다.

설계 대상 구조물이 앞에 기술한 **ConBasement** 프로그램의 가정조건과 해석방법에 적합하지 않는 경우나 더 경제적인 설계가 요구되는 경우에는 정밀 해석이 가능한 범용 프로그램 사용을 권장하며, **ConBasement**이나 **ConWall**은 보조적으로 사용하시기 바랍니다.

ConBasement를 포함한 **ConExpert**는 뉴테크구조기술사사무소에서 개발한 다른 프로그램(**ComExpert**, **SteelExpert**)과 마찬가지로 다음과 같은 기본원칙과 목표를 설정하고, 다양한 경험을 한 여러 구조설계 실무자들과 오랜 기간 동안 협의하면서 직접 개발하고 검증하였습니다.

1. 구조기준(안전성, 사용성, 내구성)에 따른 정확한 설계
2. 구조기준(친환경성, 경제성)에 적합한 합리적인 설계
3. 실행과정의 정확성과 합리성을 직감적으로 확인하기 위한 설계과정 시각화
4. 실행결과를 항목별로 일목요연하게 검토할 수 있는 3종류의 구조계산서 작성

일반적으로 건축물의 지하구조는 내부 모멘트골조, 지하층을 둘러싼 지하외벽 및 바닥격막으로 구성되어 있습니다. 지하구조에서 모멘트골조는 지하외벽에 비해 횡력저항강성이 현저히 작기 때문에 대부분의 횡력

은 지하외벽시스템으로 전달됩니다. 이러한 배경으로 건축구조기준 14.6(6)에서도 “지하구조에 대한 근사적인 설계방법으로, 설계지진토압을 포함하는 모든 횡하중을 횡하중에 평행한 외벽이 지지하도록 설계할 수 있다.”라고 기술하고 있습니다. 이를 근거로 하여 지하구조의 지진력저항시스템은 지하층을 둘러싼 지하외벽으로 구성된 전단벽시스템이 총전단력의 100%를 저항한다고 간주할 수 있으므로 ConBasement에서도 내부모멘트골조의 구조요소는 무시하고 해석합니다.

건축물의 지하구조의 내진설계의 궁극적인 주요 목표는 지하외벽의 면내하중 작용 및 면외하중 작용에 대한 부재설계와 지상구조설계를 위한 지하구조의 영향을 분석하는 것이라고 요약할 수 있습니다. 따라서 이 보고서는 주로 이 부분 위주로 작성하였습니다.

2020년 6월 1일

NEWTECH 뉴테크구조기술사사무소 대표 김승원 드림
www.newtechstructure.com/software/

[무단 복제 및 변경 불허] 본 저작물의 무단 복제 및 변경을 금합니다.

목차

표지	1
머리말	2~3
목차	4
1. 건축물의 지하구조 내진설계	5~15
2. 하중과 하중조합	16
3. 평면상 직교하는 두 방향에 대한 지진하중의 조합	17
4. 정적토압	18
5. 지진토압	19~22
6. 지하층 자체의 지진관성력	23
7. 지상층의 관성력 영향	24~31
8. 뒷벽의 횡하중과 횡스프링지지력	32~37
9. 지하외벽시스템의 구조해석	38~40
10. ConBasement의 지하외벽에 대한 설계 내용과 범위	41~45
11. 지하층의 영향을 고려한 지상구조 내진설계용 지반증폭계수	46
12. 일반 범용건축구조 해석/설계프로그램에 의한 설계에 ConBasement의 활용	47~51
[부록-1] 지상구조물 밑면의 전단력과 전도모멘트가 지하구조에 미치는 영향	52~59
[부록-2] Backstay 효과를 평가하기 위한 TBI의 권장강성	60~61
[부록-3] 전단벽의 횡력 분배를 위한 이론적 해석방법에 사용한 식	62
[부록-4] ConBasement에 의한 지하구조의 내진설계 실행 예	63~112
[부록-5] 박홍근 교수의 「건축 지하구조물의 내진설계 기준 및 해설」 강의 동영상 2019.7.17. 약22분	YouTube
[부록-6] 김동관 교수의 「건축 지하구조물의 내진설계 기준 및 해설」 강의 동영상 2019.7.17. 약42분	YouTube

서울대학교 박홍근교수와 청주대학교 김동관교수의 「건축 지하구조물의 내진설계 기준 및 해설」에 대한 강의 동영상(2019년 7월17일)을 볼 수 있도록 연결하였습니다. 강의에 참석하지 못하신 분들은 부록-5와 6을 클릭하여 꼭 시청하시기 바랍니다. 이 공개 동영상(YouTube)은 현행 '건축 지하구조물의 내진설계 기준'을 이해하는데 큰 도움이 됩니다.

1. 건축물의 지하구조 내진설계

ConBasement는 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00), KDS 14 20 10 및 건축물의 지하구조 내진설계지침(대한건축학회, 2020, Rev.1)에 따라서 그림1-1(구조 해석 및 설계 개념도) 및 그림1-2(주요 설계흐름도)와 같이 지하외벽시스템에 대한 면외하중과 면내하중의 산정, 구조/지반에 대한 해석, 부재(지하외벽)설계 및 지하층 영향 유효지반증폭계수 산정 등을 연속적으로 일괄하여 수행한다.

(1) 면외하중에 대한 지하외벽설계

강도, 처짐 및 균열에 대한 해석 및 설계

(2) 면내하중에 대한 지하외벽설계

강도 및 층 횡변위에 대한 해석 및 설계

(3) 지하층 영향 분석

지하층 영향을 고려한 지상구조의 내진설계용 유효지반증폭계수 산정

이외 여러 가지 다른 수행능력이 있으나 이 보고서에서는 다루지 않는다.

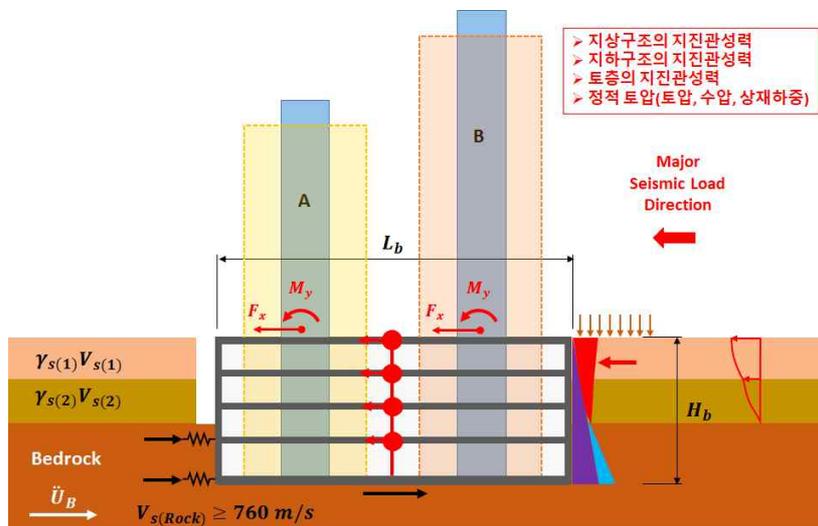
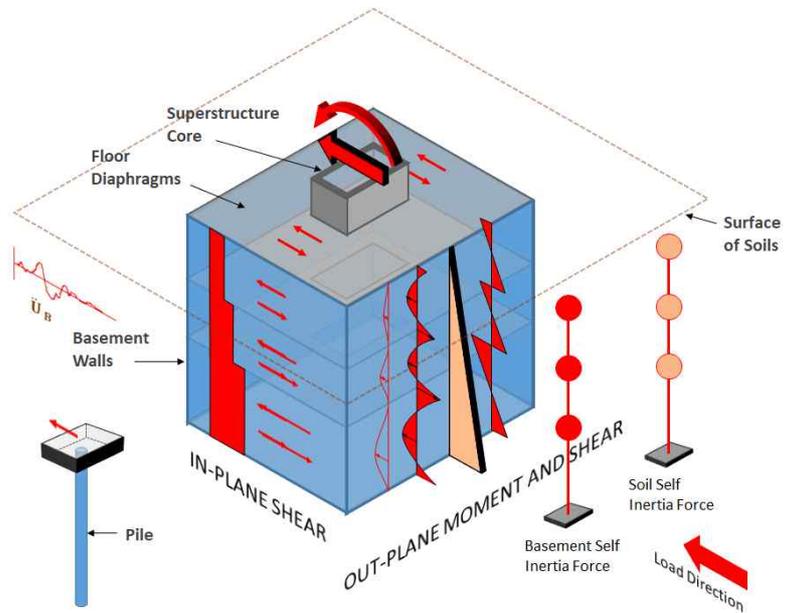


그림1-1. ConBasement의 구조 해석 및 설계 개념도

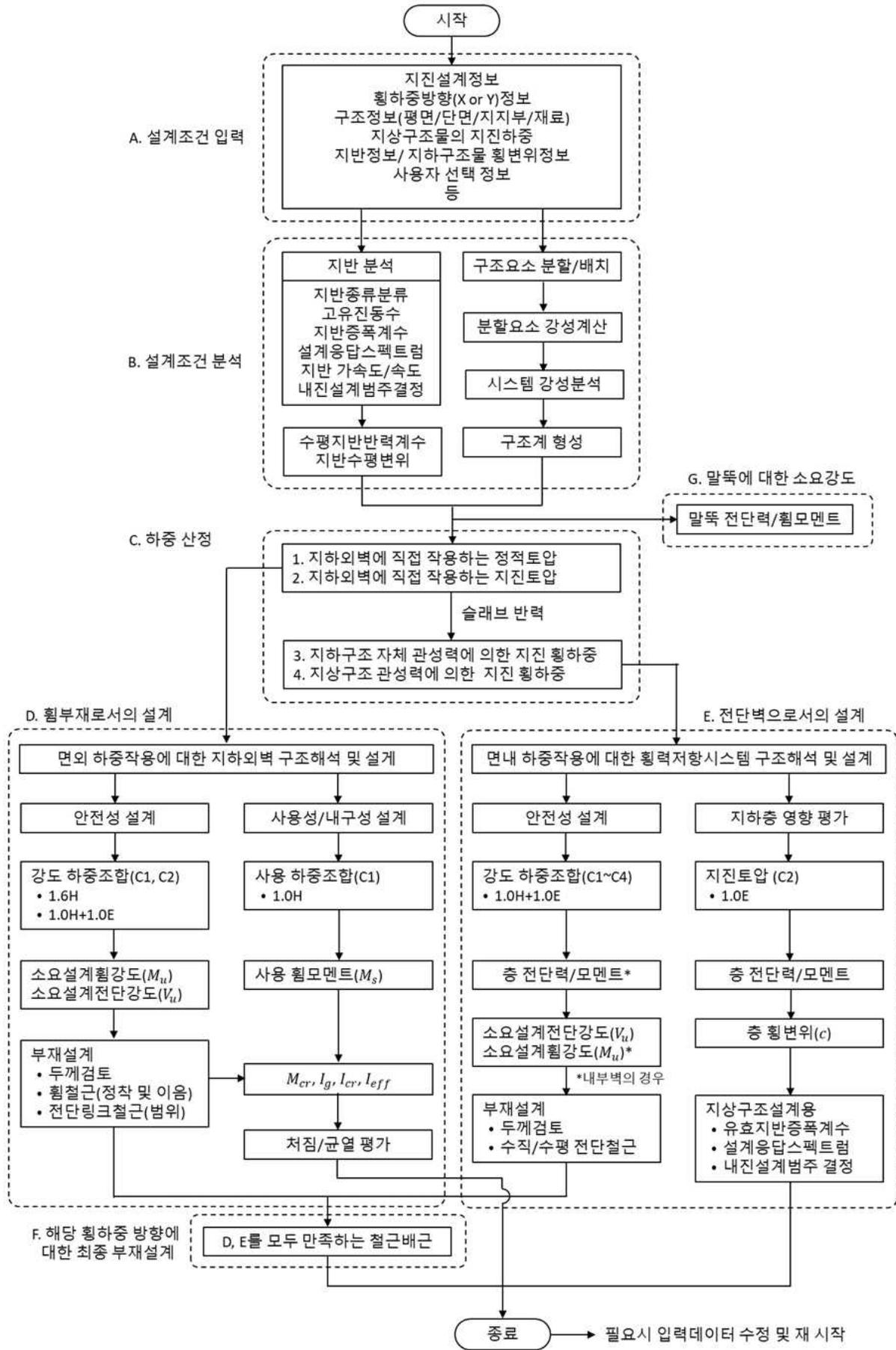


그림1-2. ConBasement의 주요 설계흐름도

ConBasement에 의한 합리적인 설계방법

깊은 지하구조물의 지진토압에 의한 횡변위는 낮은 지하구조물에 비해 크게 발생한다. 이 때, 깊은 지하구조물은 구조의 뒷벽의 기반암의 횡구속조건, 정적횡압 및 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위를 고려한 횡스프링지지력을 추가로 고려하여 합리적으로 설계할 수 있다. 이외 지하구조의 횡강성이 작아 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위가 지반의 지진 횡변위를 초과하는 경우에도 스프링지지력을 추가로 고려하여 합리적으로 설계할 수 있다.

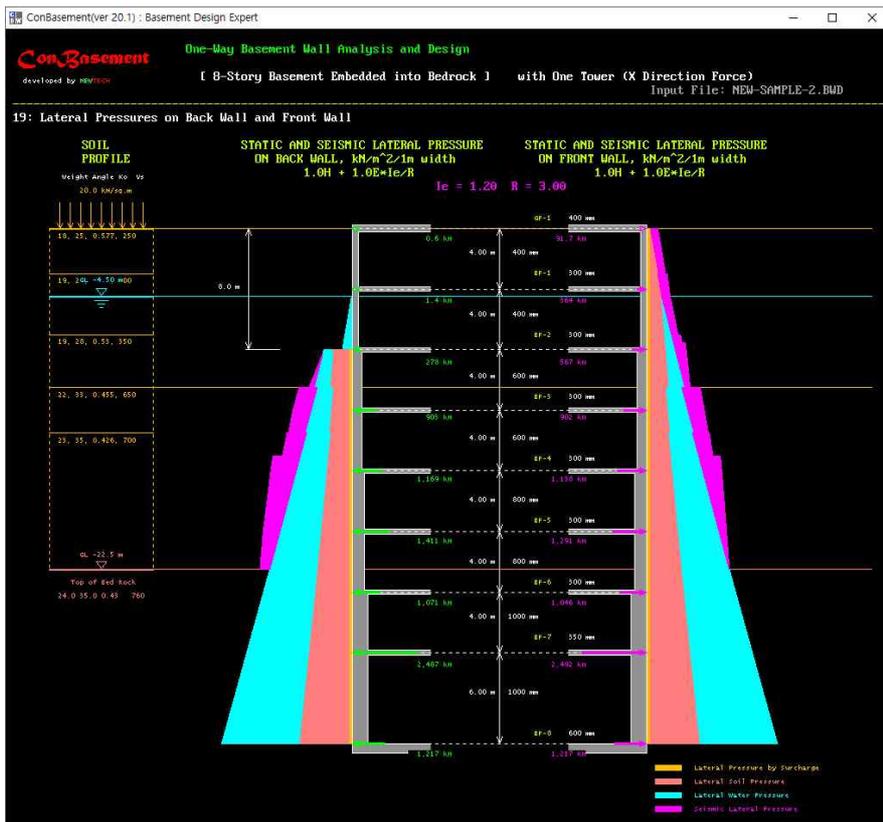
ConBasement는 건축물의 지하구조 내진설계 지침(2020, Rev.1)에 따른 다음과 같은 반복 해석 절차에 의해 합리적인 설계를 할 수 있다. **ConBasement에 의한 2가지 설계 예가 100~112쪽에 포함되어 있다.**

구분		입력 데이터		
		지하구조물의 각층 횡변위	뒷벽의 정적횡압	뒷벽의 횡스프링지지력
1단계	1차 해석	각층의 횡변위를 모두 0으로 입력	CONSIDER	IGNORE
2단계	2차 해석	1차 해석 값의 횡변위를 입력	CONSIDER	CONSIDER

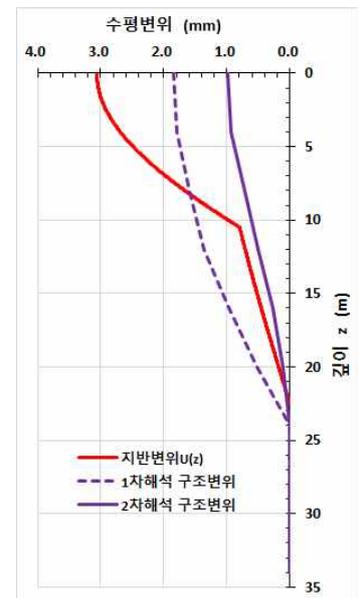
횡스프링지지력을 고려하지 않은 1차 해석에서 지진토압에 대한 지하구조의 횡변위가 지반의 지진 횡변위를 초과하는 경우에는 2차 해석에서 횡스프링지지력을 추가로 고려하여야 한다.

최종 설계 값은 지하구조의 횡변위가 지반의 횡변위를 초과하지 않는 2차 해석에 의한 결과로 한다.

다음 그림1-3은 위 절차에 따른 설계 예이다. 이 예에서 뒷벽에 작용하는 횡압(정적횡압 및 횡스프링지지력)과 기반암의 구속조건을 추가로 고려하였다. 결과적으로 지하구조 횡력저항시스템(전단벽시스템)의 소요 설계강도와 지진토압에 대한 수평변위가 감소되었다. 1차 해석에서는 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위가 지반의 상대변위를 초과하였으나, 2차 해석에 의한 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위는 지반의 상대변위를 초과하지 않는다.



(a) 뒷벽과 앞벽에 작용하는 횡압력과 슬래브 반력



(b) 지반 및 지하구조의 횡변위

그림1-3. 반복 해석 절차에 의한 설계 예

건축물의 지하구조 내진설계 지침(2020, Rev.1)

다음은 이 보고서에 있는 내용을 설명하기 위해 대한건축학회의 ‘건축물의 지하구조 내진설계 지침(2020, Rev.1)’에 있는 관련내용들을 부분적으로 발췌한 것이다.

지침 2.3 지진력저항시스템의 선택

- (1) 지상층구조는 KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준 지진하중에서 정의하는 지진력저항시스템 구조 형식을 따른다. 단, KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준 표 6.2-1의 높이 제한규정 적용시 지하구조물의 높이는 산입하지 않는다.
- (2) 지하구조는 콘크리트외벽으로 둘러싸여 있어서 큰 횡강성과 작은 연성능력을 가지고 있으므로 지하구조물 자체의 관성력에 의하여 발생하는 지진하중 산정 시 설계계수는 지상구조물의 설계계수와 별도로 KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준 표 6.2-1의 10에 따라 반응수정계수($R=3$), 시스템초과강도계수($\Omega_0=3$), 변위증폭계수($C_d=2.5$)를 적용한다.
- (3) 지상층과 연결되어 지상층으로부터 지진하중이 전달되는 지하층영역은 지상층구조로부터 전달되는 지진하중을 전달할 수 있도록 안전하게 설계하여야 하며, 지상층과 연결되는 부위는 지상층과 동일한 연성상세를 사용하도록 설계한다.
- (4) 어떠한 경우에도, 부재의 강도가 초과강도계수를 고려한 특별지진하중보다 큰 경우에는 연성상세를 적용할 필요는 없다.
- (5) 지하층만 있는 지하구조물의 경우에는 $R=3$ 의 콘크리트벽체와 보통골조로 설계한다.

[해설]

- (1) 진동에 의하여 하중(관성력)이 발생하는 지상층 구조의 경우에는 지진하중(관성력)이 구조물의 하중 재하능력에 의하여 제한된다. 따라서 구조물이 붕괴되지 않고 큰 비탄성변형능력을 보유하고 있으면, 이 변형능력(연성도)에 따라서 구조물의 지진하중을 감소시킬 수 있다. 더불어 구조물은 설계저항력보다 큰 초과강도를 가지고 있다. 이러한 점들을 고려하여 지상층의 구조에서는 하중저감계수인 반응수정계수 R 을 도입하여 지진하중을 저감하여 설계한다. R 계수는 KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준 지진하중에 정의되어 있다.
- (2) 반면에 지하층의 경우는 주변 지반과 구조물의 상대변위의 차이에 의하여 구조물에 횡토폰이 발생한다. 횡하중에 대하여 구조물이 유연하면 구조물과 지반의 상대변위가 줄어들 수 있고, 이에 따라서 횡토폰이 감소한다. 그러나, 지하구조는 콘크리트외벽으로 인하여 횡력에 매우 높은 강도와 낮은 변형능력을 갖는 구조로 되어 있어서 횡항복을 수반하는 유연한 구조형식을 나타내기 어렵다. 따라서 지하구조물의 내진설계에서는 구조물의 변형능력의 영향을 제외한 초과강도만을 고려하여 지진하중을 정의하는 것이 바람직하다. KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준에 따르면, 연성도가 낮은 ‘콘크리트기준의 일반상세만을 만족하는 철근콘크리트구조’의 반응계수 $R=3$ 로 정의되어 있고, 따라서 지하구조물의 내진설계에 적용하는 $R=3$ 로 정의하는 것이 바람직하다. 지상층에 사용하는 지진하중에 대해서는 지상층구조시스템의 반응수정계수를 적용하며, 지하층의 횡토폰과 지진하중에 대해서는 $R=3$ 을 적용한다.

ConBasement는 지침 2.3의 관련된 규정들을 고려하여 해석하고 설계한다.

지침 3.3(2)에서 반응수정계수($R=3$)가 적용되지 않은 지진토폰에 의한 지하구조물의 횡변위를 c 로 정의하고 있으나, 건축구조기준의 ‘지하구조물의 지진력저항시스템’의 규정과 지침 2.3(2)에 따라서 반응수정계수($R=3$)를 적용하고 변위증폭계수($C_d=2.5$)를 곱한 횡변위로 정의할 수 있다. 따라서 ConBasement는 지침 2.3(2) 따른 방법으로 c 를 정의한다.

지침 2.4 지진하중과 하중조합

- (1) 지진토압과 토압계수 산정 시 KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준에서 규정하고 있는 2400년 재현주기 최대지반가속도의 2/3값을 사용한다.
- (2) 구조물의 설계를 위한 설계지진토압은 5장, 6장, 또는 7장에 따라 계산된 지진토압을 사용한다. 기반암 이하에서는 지진토압을 고려하지 않는다.
- (3) 지진토압이 포함된 지진하중 조합은 KDS 41 10 15 건축구조기준 설계하중에 제시된 다음 식을 따른다.
- $$1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S \quad (2-1)$$
- $$0.9D + 1.0E \quad (2-2)$$
- 여기서 정적토압은 L 에 포함되고 설계지진토압은 E 에 포함된다. 또한 2.4 (5)항에 따른 하중조합을 고려하여야 한다.
- (4) 지상층이 있는 경우에 지진하중 E 에는 지상층의 지진하중(구조물의 관성력에 의한 하중), 지하층의 지진하중(구조물의 관성력에 의한 하중), 설계지진토압(토사의 관성력에 의한 하중)을 포함한다.
- (5) 지진하중조합에서 건물 좌우의 지하외벽 한쪽 면에 작용하는 정적토압과 지진토압의 합력이 0이거나 다른 면에 작용하는 합력과 반대방향으로 작용하는 경우를 포함한 모든 하중 조합에 대하여 구조물 또는 부재가 안전하게 설계하여야 한다.
- (6) 지하구조물의 한쪽 면에 정적토압과 설계지진토압의 합력이 작용하고 다른 쪽 면에는 토압이 0인 경우, 토압이 0이 되는 면(지진토압작용의 반대면)에 대하여 2.5(3)의 규정을 추가로 고려할 수 있다.
- (7) 지상층에 작용하는 지진하중에 대해서는 지상층구조시스템의 반응수정계수를 적용하며, 지하구조의 자중에 의한 지진하중과 지진토압에 대하여 반응수정계수 $R=3$ 을 적용한다.
- (8) 지상층으로부터 내려오는 수직재가 지하층에서 연속되지 않고 하중전이가 발생하는 경우, 특별지진하중을 적용해야 한다. 이때 초과강도계수는 3.0을 적용한다.
- (9) 평면상 직교하는 두 방향에 대한 지진하중의 조합은 KDS 41 17 00에 따른다.

[해설]

- (9) 평면상 직교하는 두 방향에 대한 지진하중의 조합은 KDS 41 17 00의 8.1.3에 따른다. 내진설계범주에 따라서 조합방법을 결정한다.

ConBasement는 다음과 같이 지침 2.4의 하중 및 하중조합 규정 중에서 수평력만 고려하여 해석하고 설계한다.

지하외벽의 면외하중을 산정하기 위한 횡 하중조합

구분	하중조합
내진설계범주 A ~ D	$1.6H$ $1.0H + 1.0E$

지하외벽시스템의 면내하중을 산정하기 위한 횡 하중조합

구분	하중조합
내진설계범주 A, B, C	$1.0H_x \pm 1.0H_x e_y + 1.0E_x \pm 1.0E_x e_y$ $1.0H_y \pm 1.0H_y e_x + 1.0E_y \pm 1.0E_y e_x$
내진설계범주 C(H-5), D	$1.0H_x \pm 1.0H_x e_y + 0.3H_y \pm 0.3H_y e_x + 1.0E_x \pm 1.0E_x e_y + 0.3E_y \pm 0.3E_y e_x$ $1.0H_y \pm 1.0H_y e_x + 0.3H_x \pm 0.3H_x e_y + 1.0E_y \pm 1.0E_y e_x + 0.3E_x \pm 0.3E_x e_y$

주) H-5 ; 평면 비정형 유형(횡하중방향에 평행하지 않은 외벽(skewed wall)이 있는 경우에 해당)

지침 2.5 지진해석 및 내진설계 방법

(2) 원칙적으로 구조물의 해석모델은 지상층과 지하층구조를 포함하고 기초면 하부가 고정된 해석모델을 사용한다. 부재력을 구하기 위한 해석모델에서 지표면으로부터 기반암 사이 토사에 접하는 지하구조의 측면에 어떠한 구속조건도 사용하지 않아야 하나, 기반암에 접하는 지하구조의 측면에는 수평방향 구속조건을 적용할 수 있다. 지상구조의 지진하중과 주기를 계산하기 위한 해석모델에서는 지반에 의한 지하구조 측면의 구속효과를 고려해야 한다.

(3) 지진토압작용의 반대쪽에 위치한 외벽면에는 다음과 같은 사항을 추가로 고려할 수 있다.

- ① 지진토압작용의 반대면에 정적수압을 고려할 수 있다.
- ② 지표면으로부터 깊이 8m (또는 비슷한 깊이의 지하층 슬래브) 위치의 아래에서는 정적토압과 지반의 횡스프링지지력을 고려할 수 있다.
- ③ 지표면에서 깊이 4m (또는 비슷한 깊이의 지하층 슬래브) 위치의 아래에서 지하구조의 횡변위가 지반의 상대변위(기초위치로부터 각 층 슬래브 위치에서의 변위)보다 큰 경우에는, 지하구조의 변위가 지반의 상대변위를 초과하지 않도록 지표면 깊이 4m (또는 비슷한 깊이의 지하층 슬래브) 아래에서는 지진토압작용의 반대면에 정적토압의 일부 또는 지반의 횡스프링지지력을 고려할 수 있다.

[해설]

(2) 구조물의 해석모델을 위해 해설그림 2-6 모델을 사용한다. 건물이 경사지에 건설되는 경우에는 해설그림 2-7과 같은 모델을 사용한다. 구조물의 지진하중을 계산할 때에는 주기를 보수적으로 평가하여야 하며, 따라서 지하구조에 대한 지반의 횡구속조건을 고려해야 한다.

(3) 지진토압작용의 반대쪽에 위치한 외벽 면에는 다음과 같은 사항을 추가로 고려할 수 있다.

- ① 지진토압작용의 반대면에 정적수압을 고려할 때 수압은 지진토압작용면에 작용하는 수압과 동등 이하여야 한다.
- ② 지하구조가 깊은 경우에는 지반의 관성력이 작용하더라도 지반의 큰 자중으로 인하여 지하구조와 토사지반사이에 간격이 발생하거나 정적토압이 사라지기 어렵다. 따라서 지표면으로부터 깊이 8m (또는 비슷한 깊이의 지하층 슬래브) 위치의 아래에서는 정적토압과 지반의 횡스프링지지력을 지진토압작용 반대면에 고려할 수 있다.
- ③ 지하구조의 횡강성이 작은 경우에는 지반운동과 연동하여 거동이 발생하는데, 이 때 지하구조의 횡변형은 지반운동의 상대변위와 비슷한 수준이 된다. 지진토압작용의 반대면에 정적토압의 일부 또는 지반의 횡스프링지지력을 고려하더라도, 지하구조의 변위가 지반의 상대변위를 초과하지 않아야 한다.

이 지침에서 지진토압작용의 반대쪽에 위치한 외벽면에 ‘횡스프링지지력을 고려할 수 있다.’는 구조해석모델에서 횡하중으로 고려할 수 있다는 의미를 내포하고 있다.

일반 건축구조설계프로그램은 지진력저항시스템에 대한 구조해석모델에서 지반과 구조의 상호작용을 직접 모사할 수 없기 때문에, 횡스프링지지부(수평지반반력계수)를 해석모델에 직접 포함시키지 않아야 한다. 즉, 다음 식에 포함된 지반의 횡변위와 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위를 동시에 직접 해석할 수 없기 때문이다. 따라서, 이 지침에서 지진토압작용의 반대쪽에 위치한 외벽면에 ‘횡스프링지지력을 고려할 수 있다.’는 일반 건축구조설계프로그램에 의한 구조해석모델에 ‘횡스프링지지부(수평지반반력계수)를 직접 포함시킬 수 있다.’는 의미는 아니다.

ConBasement는 다음과 같이 지침 2.5의 규정을 공학적 원리에 따라 합리적으로 적용하여 경제적인 설계를 수행할 수 있다.

다음 그림1-4와 같이 1차 해석에서 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위가 지반의 상대변위를 초과하는 경우에는 지침에 따라서 다음과 같이 뒷벽에 횡스프링지지력을 고려한다.

(a) Case 1

그림1-4(a)는 지하구조의 횡변위가 하부층에서만 초과한 경우이다. 이 경우는 지침 2.5(3)의 ②에 해당되며, 1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위를 직접 적용하여 뒷벽에 발현되는 횡스프링지지력을 산정하여 2차 해석에 고려할 수 있다.

(b) Case 2

그림1-4(b)는 지하구조의 횡변위가 모든 층에서 초과한 경우이다. 이 경우는 지침 2.5(3)의 ③에 해당되며, 1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위를 1층에 해당하는 지반변위에 일치하도록 조정하여 이 조정된 횡변위를 적용하여 뒷벽에 발현되는 횡스프링지지력을 산정하여 2차 해석에 고려할 수 있다.

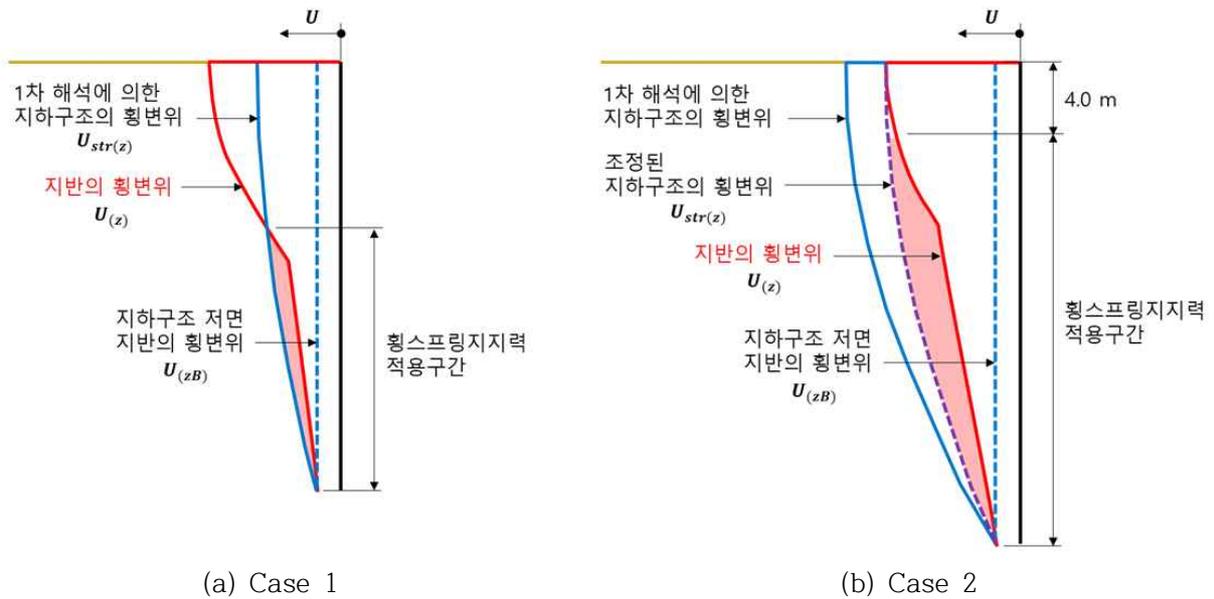


그림1-4. 뒷벽의 횡스프링지지력 적용구간

반대쪽에 위치한 외벽면에 작용하는 횡스프링지지력(횡하중)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$(u_{(z)} - u_{(zB)}) \geq u_{str(z)} \text{인 구간, 횡스프링지지력} = \text{횡하중} = p_{(z)} = 0$$

$$(u_{(z)} - u_{(zB)}) < u_{str(z)} \text{인 구간, 횡스프링지지력} = \text{횡하중} = p_{(z)} = [(u_{(z)} - u_{(zB)}) - u_{str(z)}] K_{H(z)}$$

여기서, $u_{(z)}$ = 지반의 지진횡변위, $u_{(zB)}$ = 지하구조물 저면 지반의 지진횡변위, $u_{str(z)}$ = 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위, $K_{H(z)}$ = 수평지반반력계수, z = 지표면으로부터 고려하는 깊이

[유의사항] 지침 해설 2.5(3)의 ③에 의하면 지하구조의 변위가 지반의 상대변위를 초과하지 않아야 한다. 즉, 지반의 상대변위에 따른 지진토압을 적용하여 내진설계 검토 시 각층에 대한 최종 지하구조물의 변위는 각층에 대응하는 지반의 상대변위보다 작아야 한다. 따라서 지하의 지진력저항시스템에 대한 1차 해석에서 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위가 지반의 지진 횡변위 보다 큰 경우에는 뒷벽에 횡스프링지지력을 추가로 고려한 2차 해석에 의해 지하구조의 횡변위가 지반의 횡변위를 초과하지 않도록 하여 합리적인 설계를 도모해야 한다. 또한, 상부 4m 구간에는 횡스프링지지력이 발생하는 조건이라도 횡스프링지지력을 적용하지 않아야 한다.

지침 3.3 지하층의 영향

(1) 다음의 조건을 모두 만족하는 경우, 지하층의 영향을 고려하여 각 지반조사 위치에서의 지반증폭계수를 조정할 수 있다.

지하구조물이 지진토압에 대하여 안전하게 설계되어 있는 경우.

지반종류가 S_1, S_2, S_4 (전단파속도가 260m/s 이상)이고, 지진토압과 지진하중이 기초저면의 지반에 직접 전달될 수 있도록 기초저면에 견고하게 정착되어 있는 경우.

(2) 6장 응답변위법에 의하여 계산되는 지표면에서의 자유장 지반의 횡변위를 a 로 정의하고, 지하구조 바닥에서의 지반의 횡변위를 b , 반응수정계수가 적용되지 않은 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위를 c 로 정의하면, KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준에서 정의하는 지반분류에 따른 지반증폭계수 F 는 다음과 같이 조정할 수 있다.

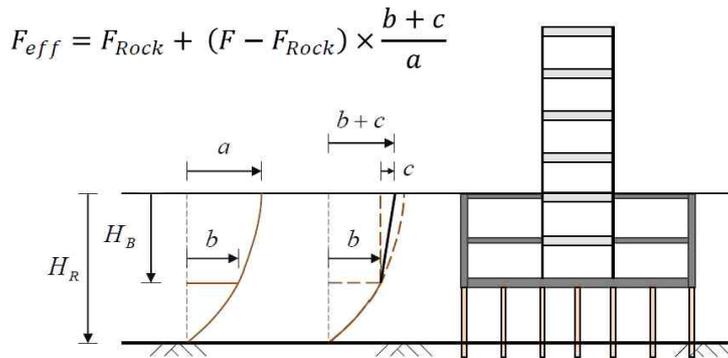
$$\text{유효지반증폭계수 } F_{eff} = F_{rock} + (F_{soil} - F_{rock}) \frac{(b+c)}{a} \quad (3-1)$$

(3) 지하구조물의 강성이 매우 큰 경우에는 식 (3-1)에서 근사적으로 $c \approx 0$ 을 사용할 수 있다.

[해설]

(2) 제시된 방법에서는 지반분류는 지표면을 기준으로 정의하되, 지반증폭계수를 감소시킬 수 있도록 규정하고 있다. 즉, 지하구조물의 강성이 매우 크에 따라 지반의 움직임이 지하구조물의 강성에 의해 제어되는 경우 지상구조물에 대한 영향이 감소하므로 지표면을 기준으로 정의하는 지반증폭계수가 감소될 수 있다.

지진 시 지반운동은 해설그림 3-2와 같은 형태로 증폭되어 지표면의 움직임(a)을 유발한다. 반면에 지하층이 있는 경우, 지하구조에 의하여 지표면의 움직임이 $(b + c) < a$ 로 감소한다. 따라서, KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준의 14 지하구조물의 내진설계에서 요구하는 지하구조물의 안전성을 확보하는 경우, 이러한 지하구조물의 구속효과를 고려하여 식(3-1)과 같이 지반증폭계수를 감소시킬 수 있다.



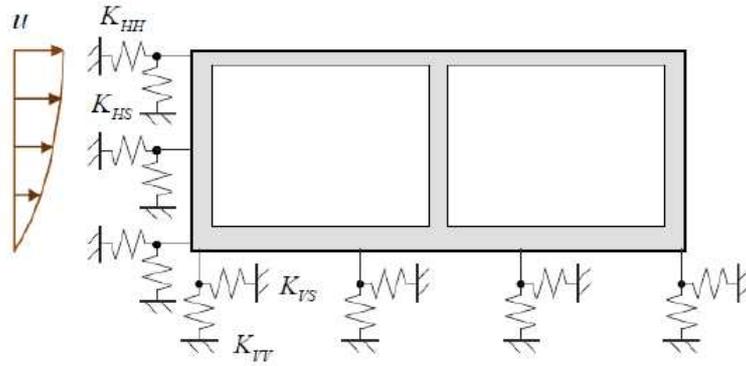
해설그림 3-2. 지반운동에 대한 지하층의 영향

- a = 지표면에서 지반의 횡변위(횡이동)
- b = 지하구조바닥에서 지반의 횡변위(횡이동)
- c = 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위(층 횡변위)
- $b+c$ = 유효지반계수 산정을 위한 지진시 지하구조물의 총 횡변위(횡이동+층횡변위)

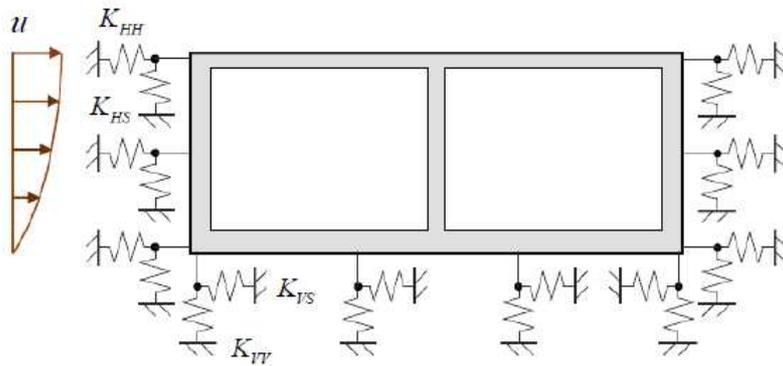
지침 3.3(2)에서 반응수정계수($R=3$)가 적용되지 않은 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위를 c 로 정의하고 있으나, 건축구조기준의 '지하구조물의 지진력저항시스템'의 규정과 지침 2.3(2)에 따라서 반응수정계수($R=3$)를 적용하고 변위증폭계수($C_d = 2.5$)를 곱한 횡변위로 정의할 수 있다. 따라서 ConBasement는 지침 2.3(2) 따른 방법으로 c 를 정의한다.

지침 6.4 지진해석 및 지진토압

(1) 기본적으로 응답변위법은 그림 6-4와 같이 지하구조물과 이를 둘러싼 지반의 영향을 고려한 지반반력계수가 적용된 해석모델에 지진 시 예상되는 지반의 변위를 가하여 스프링모델의 압축력으로부터 토압을 계산할 수 있다. 이 때, 지반과 구조물의 상대적인 움직임에 따라 지진동이 작용하는 배면의 지반반력계수가 역할을 하거나 역할을 하지 않을 수 있다. 이에 따라 하중의 전달경로가 달라지기 때문에 두 가지 경우 모두 검토한다.



(a) 배면의 지반반력계수를 고려하지 않는 경우



(b) 배면의 지반반력계수를 고려하는 경우

그림 6-4. 응답변위법의 적용

- (2) 지하구조물 상부에 위치한 표토층에 의한 전단저항력은 안전측의 설계를 위하여 고려하지 않는다.
- (3) 그림 6-2와 같이 지하구조물과 지반반력계수를 동시에 모사할 수 없는 경우, 지하구조물을 강체로 가정하고 다음 식 (6-11)과 같이 지진토압을 구할 수 있다.

$$p(z) = K_H \times \{u(z) - u(z_B)\} \tag{6-11}$$

여기서,

$u(z)$ = 지표면으로부터 깊이 z 에서 지반변위

$u(z_B)$ = 지표면으로부터 지하구조물 저면의 깊이 z_B 에서 지반변위

K_H = 측벽에 대한 수평지반반력계수

지침 6.4 지진해석 및 지진토압

[해설]

(1) 지반의 변위와 지반반력계수를 고려하여 직접 구조해석을 수행한다. 지반반력계수를 적용한 spring support를 모사하고, 지점(support)에 지반의 변위를 가하여 지진하중을 유발하여 해석하는 방법이다.
 (3) 측벽에 작용하는 지진토압은 위의 식과 같이 지반의 상대변위와 지반반력계수의 곱으로 구하여 구조물만 있는 해석모델에 적용할 수 있다.

그러나, 구조물을 강체로 가정하는 경우, 지진토압을 발생시키는 지반의 변위를 과대평가하여 지진토압을 과대평가할 수 있다. 따라서 경제적인 설계를 위해서는 그림 6-4에 나타난 바와 같이 지하구조물과 지반반력계수를 동시에 고려한 해석모델을 사용하거나 또는 지반반력계수만을 고려하는 경우에는 반복 해석을 수행하여야 한다.

즉, 지반반력계수만을 고려하는 경우에는 1차 해석을 통하여 지하구조물의 횡변위를 계산한 후, 식 6-11에서 지반변위대신에 지반변위에서 지하구조물의 횡변위를 뺀 값을 사용하여 지진토압을 재계산한 후 2차 해석을 통하여 지하구조물을 설계하는 것이 바람직하다.

지침 6.4(1)에서 “이 때, 지반과 구조물의 상대적인 움직임에 따라 지진동이 작용하는 배면의 지반반력계수가 역할을 하거나 역할을 하지 않을 수 있다.”는 다음의 두 조건을 의미한다.

- 배면에 지반반력계수의 역할이 없는 조건 : 지침 그림 6-4(a) 배면의 지반반력계수를 고려하지 않는 경우
 $(u_{(z)} - u_{(zB)}) \geq u_{str(z)}$ 인 변위 조건, 횡스프링지지력 = $p_{(z)} = 0$
- 배면에 지반반력계수의 역할이 있는 조건 : 지침 그림 6-4(b) 배면의 지반반력계수를 고려하는 경우
 $(u_{(z)} - u_{(zB)}) < u_{str(z)}$ 인 변위 조건, 횡스프링지지력 = $p_{(z)} = [(u_{(z)} - u_{(zB)}) - u_{str(z)}] K_{H(z)}$

ConBasement는 지침6.4의 해설(3)에 따라서 다음과 같은 반복 해석 절차에 의해 합리적인 설계를 할 수 있다.

구분		입력 데이터		
		지하구조물의 각층 횡변위	뒷벽의 정적횡압	뒷벽의 횡스프링지지력
1단계	1차 해석	각층의 횡변위를 모두 0으로 입력	CONSIDER	IGNORE
2단계	2차 해석	1차 해석 값의 횡변위를 입력	CONSIDER	CONSIDER

횡스프링지지력을 고려하지 않은 1차 해석에서 지진토압에 대한 지하구조의 횡변위가 지반의 지진 횡변위를 초과하는 경우에는 2차 해석에서 횡스프링지지력을 추가로 고려하여야 한다.

최종 설계 값은 지하구조의 횡변위가 지반의 횡변위를 초과하지 않는 2차 해석에 의한 결과로 한다.

ConBasement는 2차 해석에서 다음 조건의 구간에 뒷벽의 횡스프링지지력이 고려된다.

$(u_{(z)} - u_{(zB)}) \geq u_{str(z)}$ 인 구간, 횡하중 = 횡스프링지지력 = $p_{(z)} = 0$
 $(u_{(z)} - u_{(zB)}) < u_{str(z)}$ 인 구간, 횡하중 = 횡스프링지지력 = $p_{(z)} = [(u_{(z)} - u_{(zB)}) - u_{str(z)}] K_{H(z)}$

여기서, $u_{str(z)}$ = 1차 해석에 의한 지진토압에 대한 지하구조물의 횡변위

최종 2차 해석에 의한 설계결과(전단벽의 소요설계강도와 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위)는 앞벽에 작용하는 지진토압에서 뒷벽에 작용하는 반대방향의 지진토압(횡스프링지지력)을 뺀 횡하중에 의해 결정된다.

지침 8.1 일반사항

- (1) 지하구조물의 내진설계를 위한 하중조합과 하중계수는 2.4를 따른다.
- (2) 지진해석과 내진설계방법은 2.5를 따른다.
- (3) 해석결과에 따른 콘크리트부재의 설계강도와 관련된 계산은 KDS 14 20 10 콘크리트구조 해석과 설계원칙에 따른다.
- (4) 2.4(7)에 따라서 지하구조물은 반응수정계수 $R=3$ 의 콘크리트 벽체와 보통골조로 설계되므로 KDS 14 20 80 콘크리트 내진설계기준을 따르지 않는다. 다만, 2.3(3)에 따라서 지상층과 동일한 연성상세가 요구되는 부위에서는 해당 연성상세를 따라야 한다.
- (5) 지하구조물에 작용하는 지진동하중은 무한강성의 슬래브 다이어프램으로 연결된 지하외벽체가 지지하는 것을 원칙으로 한다.

지침 8.2 지진토압에 대한 지하외벽의 설계

- (1) 지진토압에 대한 지하외벽의 설계는 KDS 14 20 10 콘크리트구조 해석과 설계원칙에 따른다.
- (2) 등가정적법에 의한 지진토압에 대한 지하외벽의 설계 방법은 다음과 같다.
 - ① 정적토압의 산출
 - ② 지진토압의 산출
 - ③ 정적토압과 지진토압의 조합
 - ④ 구조해석
 - ⑤ 벽체에 대한 힘과 전단설계
- (3) 지진토압에 대한 지하외벽의 설계시 정적수압을 고려한다.
- (4) 응답변위법과 시간이력해석법에 의하여 구해진 지진토압에 대한 지하외벽의 설계는 등가정적법에 의한 지진토압에 대한 설계방법과 동일하다. 다만 지진토압의 산출방법은 이 지침 6장과 7장에 서술된 바와 같은 방법을 사용한다.
- (5) 지하외벽은 직각방향으로 재하되는 설계지진토압에 대해서는 해당벽체가 안전하도록 설계해야 한다. 다만, 해당영역의 손상이 중력하중과 횡하중에 대한 구조물 전체의 안전성이나, 인명피해에 영향을 주지 않는다면, 해당 벽체영역의 국부적인 파괴를 허용할 수 있다.
- (6) 외벽의 구조설계에서 면외방향 지진토압과 면내 지진토압의 상호작용은 고려하지 않으며, 각 방향의 하중에 대하여 독립적인 강도를 사용할 수 있다.

[해설]

- (5) 해당 지하외벽이 직각방향으로 재하되는 설계지진토압에 대하여 구조물 전체의 안전성 확보를 위한 주요한 횡력저항시스템이거나, 지상구조의 주요수직재가 외벽에 면하거나, 인명피해에 직접적인 피해를 초래할 수 있는 경우에는 면외방향 지진토압에 대해 안전하게 설계해야 한다.
- (6) 전체 구조체에 대한 하중방향의 조합은 고려하되 단일벽체에 대한 설계에서 면외방향지진토압과 면내방향 지진토압의 상호작용은 고려하지 않는다.

[건축구조기준의 구조설계의 원칙]

건축구조물은 안전성, 사용성, 내구성을 확보하고 친환경성을 고려하여야 한다.

ConBasement는 지침 8.1, 8.2의 관련 규정들을 고려하여 지하외벽 부재의 설계와 안전성을 검토한다.

2. 하중과 하중조합

ConBasement는 건축구조기준과 건축물의 지하구조 내진설계 지침(대한건축학회, 2020, Rev.1)에 따라서 기준에서 규정한 다음의 하중과 하중조합을 고려하여 해석하고 설계한다.

(1) 지하외벽시스템에 작용하는 횡하중

	하중 종류	하중 산정 방법	면외 하중	면내하중
1	정적토압	정지토압(수압, 상재하중 포함)	적용	층 전단력에 적용
2	지진토압	응답변위법(이중 코사인)	적용	층 전단력에 적용
3	지하층 관성력	사용자가 입력한 층유효중량과 지반상호작용을 고려한 층가속도에 의한 층관성력	-	층 전단력에 적용
4	지상층 관성력	사용자가 입력한 지상층 밑면 전단력 및 전도 모멘트	-	층 전단력에 적용

주) 지하외벽에 직접 작용하는 정적토압과 지진토압에 의한 층전단력은 슬래브의 반력과 하중분담폭에 의해 산정하고, 편심하중작용을 고려한다.

(2) 지하외벽의 면외하중을 산정하기 위한 횡 하중조합

구분	하중조합
내진설계범주 A ~ D	$1.6H$ $1.0H + 1.0E$

(3) 지하외벽시스템의 면내하중을 산정하기 위한 횡 하중조합

구분	하중조합
내진설계범주 A, B, C	$1.0H_x \pm 1.0H_x e_y + 1.0E_x \pm 1.0E_x e_y$ $1.0H_y \pm 1.0H_y e_x + 1.0E_y \pm 1.0E_y e_x$
내진설계범주 C(H-5), D	$1.0H_x \pm 1.0H_x e_y + 0.3H_y \pm 0.3H_y e_x + 1.0E_x \pm 1.0E_x e_y + 0.3E_y \pm 0.3E_y e_x$ $1.0H_y \pm 1.0H_y e_x + 0.3H_x \pm 0.3H_x e_y + 1.0E_y \pm 1.0E_y e_x + 0.3E_x \pm 0.3E_x e_y$

주) H-5 : 평면 비정형 유형(횡하중방향에 평행하지 않은 외벽(skewed wall)이 있는 경우에 해당)

여기서,

H = 정적토압

E = 지진토압

H_x = X방향의 정적토압

H_y = Y방향의 정적토압

E_x = X방향의 지진하중(지진토압, 지하층 관성력, 지상층 관성력)

E_y = Y방향의 지진하중(지진토압, 지하층 관성력, 지상층 관성력)

e_y = X방향 하중에 대한 편심거리(합력중심위치와 전단벽그룹강성위치 사이의 직각거리)

e_x = Y방향 하중에 대한 편심거리(합력중심위치와 전단벽그룹강성위치 사이의 직각거리)

(4) 설계지진하중

지하구조에 작용하는 지진하중(E)은 다음의 반응수정계수와 중요도계수를 고려하여 적용한다.

- 지상층 밑면 지진하중(지상층 관성력) 적용시 : $(R_{Super}/R_{Basement})$
- 지하층 자체 지진하중(지진토압, 지하층 관성력) 적용시 : $I_E/R_{Basement}$

주) 사용자가 입력하는 지상층 밑면 지진하중은 I_E/R_{Super} 를 반영된 값을 사용하여야 한다.

3. 평면상 직교하는 두 방향에 대한 지진하중의 조합

ConBasement는 건축구조기준과 건축물의 지하구조 내진설계 지침(대한건축학회, 2020, Rev.1)에 따라서 기준에서 요구하는 평면상 직교하는 두 방향에 대한 지진하중의 조합을 고려한다.

ConBasement의 평면상 직교하는 두 방향에 대한 지진하중의 조합

지하구조물이 내진설계범주 'C'에 속하고 평면 비정형성 유형 H-5에 해당될 경우 또는 내진설계범주 'D'에 속하는 지하구조물의 설계부재력(전단벽으로서의 지하외벽)은 다음의 방법을 적용한다.

- ① 한 방향 지진하중 100%에 대한 하중효과와 그에 직교하는 방향의 지진하중 30%에 대한 하중효과의 절대값을 합하여 구한다.
 - 주 지진하중이 X방향인 경우 : $Q_E = \pm Q_{EX} \pm 0.3Q_{EY}$
 - 주 지진하중이 Y방향인 경우 : $Q_E = \pm Q_{EY} \pm 0.3Q_{EX}$
- ② 횡력이 편심으로 작용하는 경우에는 편심에 의한 비틀림 효과를 고려한다.
- ③ 단, 지하외벽이 연속적으로 둘러싸인 폐쇄형 전단벽그룹의 지진력저항시스템(지하외벽구조시스템)에는 우발편심을 고려하지 않는다.

건축구조 기준에서는 구조물이 내진설계범주 'C'에 속하고 평면 비정형성 유형 H-5에 해당될 경우 또는 내진설계범주 'D'에 속하는 경우에는 평면상 직교하는 두 방향에 대한 지진하중효과를 고려하여 설계하도록 다음과 같이 규정하고 있다.

[기준 해설] 지진하중은 건물의 임의의 방향으로 작용할 수 있으며, 이러한 현상을 고려하기 위하여 일반적으로 직교하는 2축의 지진하중의 효과를 조합하여 설계한다. 그러나 2축에 대하여 최대 지진하중이 동시에 작용할 확률은 매우 적으므로 적절한 방법으로 직교하는 2축에 대한 하중효과를 조합하여야 한다. 관련 기준 조항에서는 (1) 어느 한 방향 지진하중효과의 100%와 그 직각방향 지진하중효과의 30%를 단순히 합하거나 또는 (2) 양방향 지진하중효과의 100%를 SRSS방법으로 조합하도록 하고 있다.

그러나, 최근 ASCE 7-16에서 (2)의 방법은 더 이상 일반적으로 사용하지 않으므로, ConBasement는 (1)의 방법("100%+30% Rule")만 적용하도록 하였다.

ConBasement는 사용자의 선택에 따라서 지진횡도압(정적횡도압 수반), 지하층관성력, 지상층관성력(사용자가 미리 고려한 값)에 "100%+30% Rule"을 적용할 수 있다.

일반적으로 국내의 지하외벽의 배치는 그림3-1과 같이 평면상 각 주축(X 또는 Y)의 횡력방향에 평행하지 않은 요소들을 대부분 포함하고 있으므로 기준에서 요구하는 평면상 직교하는 두 방향에 대한 지진하중의 조합을 반드시 고려하여야 한다.

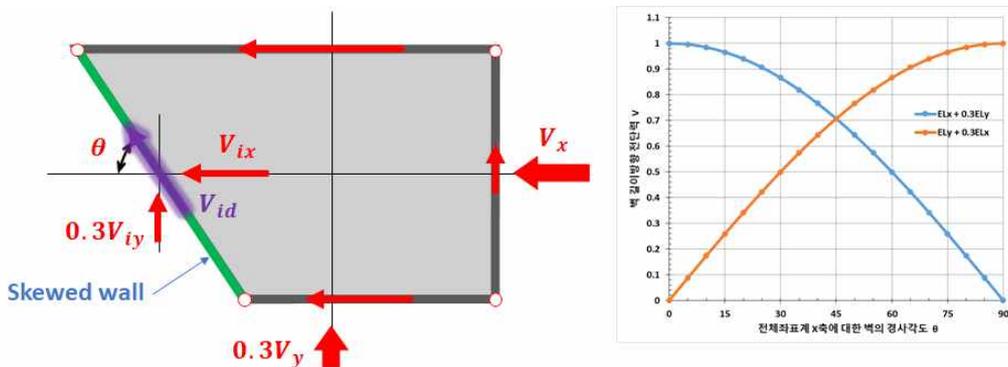


그림3-1. 평면상 주횡력 방향에 평행하지 않은 지하외벽 요소(skewed wall)

4. 정적토압

그림4-1과 같이 지하외벽에 작용하는 정적횡압은 KSD 41 10 15의 7.2(KBC 2016, 건축구조기준 해설 0307.2)에 따라서 다음과 같이 정지토압, 지하수압, 상재하중효과를 포함하여 산정한다. ConBasement에서는 지하외벽의 흙에 접한 면은 항상 일직선상의 수직면으로 가정한다.

(1) 지표면 아래 임의깊이 z에서의 정적횡압(토압, 수압, 상재하중효과)

$$\sigma_{h(z)} = K_{o(z)}\sigma'_{v(z)} + \sigma_w(z)$$

(2) 지하수영향을 제외한 유효수직응력

$$\sigma'_{v(z)} = q + \sum_0^z \gamma'_s d(z)$$

(3) 정수압

$$\sigma_w(z) = \sum_0^z \gamma_w(z - d_w) d(z)$$

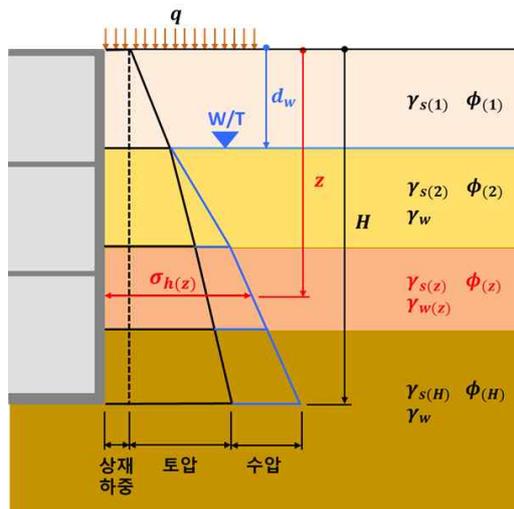


그림4-1. 지하외벽에 작용하는 정적횡압

여기서,

H = 지하외벽 총 높이

q = 등분포 상재하중

z = 고려하는 깊이

d_(z) = 증분 깊이

$$K_{o(z)} = \frac{\sigma_{h(z)}}{\sigma_{v(z)}} \approx 1 - \sin(\phi(z)), \text{ 정지토압계수}$$

σ_{v(z)} = 지반 내의 요소에 작용하는 수직응력

σ_{h(z)} = 지반 내의 요소에 작용하는 수평응력

φ(z) = 흙의 내부마찰각

γ_{s(z)} = 흙의 단위체적중량

γ'_{s(z)} = γ_{s(z)} - γ_{w(z)}, 지하수를 제외한 흙의 단위체적중량

γ_w = 지하수의 단위체적중량(지하수면 상부토층은 0, 지하수위면 하부토층은 10 kN/m³)

(순수 물의 단위체적중량은 9.807 kN/m³이나 실무에서 사용하고 있는 10 kN/m³을 적용함)

5. 지진토압

ConBasement는 지하외벽에 작용하는 지진토압은 건축물의 지하구조 내진설계 지침(Rev.1, 대한건축학회) '제6장 응답변위법에 의한 지진토압 계산'에 따라서 산정한다.

토층 자유장의 수평변위는 이중코사인 방법을 적용하여 산정하고 수평지반반력계수는 지침의 해설 표 6-1에 있는 측벽에 작용하는 수평지반반력계수를 기본적으로 이용한다.

(1) 지진토압

지진토압은 토층과 지하구조의 상대변위에 수평지반반력계수를 곱하여 산정한다.

$$p(z) = K_{h(z)} [u_{(z)} - u_{(z_b)}]$$

여기서,

z = 지표면으로부터의 깊이

$u_{(z)}$ = 임의 깊이에서의 토층 자유장 횡변위

$u_{(z_b)}$ = 기초 밑면에 깊이에서의 토층 자유장 횡변위

$K_{h(z)}$ = 임의 깊이에서의 수평지반반력계수

(2) 이중코사인 방법에 의한 토층 자유장 수평변위

- 상부토층구간($z \leq H_1$)에서의 수평변위

$$u_{(z)} = \frac{2}{\pi^2} S_v T_G \cos\left(\omega_0 \frac{z}{V_{s0h1}}\right)$$

- 하부토층구간($H_1 < z \leq H_2$)에서의 수평변위

$$u_{(z)} = \frac{2}{\pi^2} S_v T_G \cos\left(\omega_0 \frac{H_1}{V_{s0h1}}\right) \left[\cos\left(\omega_0 \frac{z - H_1}{V_{s0h2}}\right) - \frac{\sin\left(\omega_0 \frac{z - H_1}{V_{s0h2}}\right)}{\tan\left(\omega_0 \frac{H_2}{V_{s0h2}}\right)} \right]$$

여기서,

H_1, H_2 : 제1층(상부층), 제2층(하부층)의 지반두께

V_{s0h1}, V_{s0h2} : 제1층, 제2층의 평균전단파속도

ω_0 : 토층 자유장 지반의 설계고유원진동수

$$(1 + \alpha) \cos\left[\omega_0 \left(\frac{H_1}{V_{s0h1}} + \frac{H_2}{V_{s0h2}}\right)\right] + (1 - \alpha) \cos\left[\omega_0 \left(\frac{H_1}{V_{s0h1}} - \frac{H_2}{V_{s0h2}}\right)\right] = 0$$

$T_G = \frac{2\pi}{\omega_0}$: 토층 자유장 지반의 고유진동주기

α : 제1층, 제2층의 임피던스비 = $\frac{\gamma_1 V_{s0h1}}{\gamma_2 V_{s0h2}}$

γ_1, γ_2 : 제1층, 제2층의 습윤단위체적중량 (kN/m^3)

S_v : 지표층(기반암 상부 토층) 지반의 고유주기에 해당되는 기반암의 설계속도응답스펙트럼

$$S_v = \frac{S_a}{\omega_0}$$

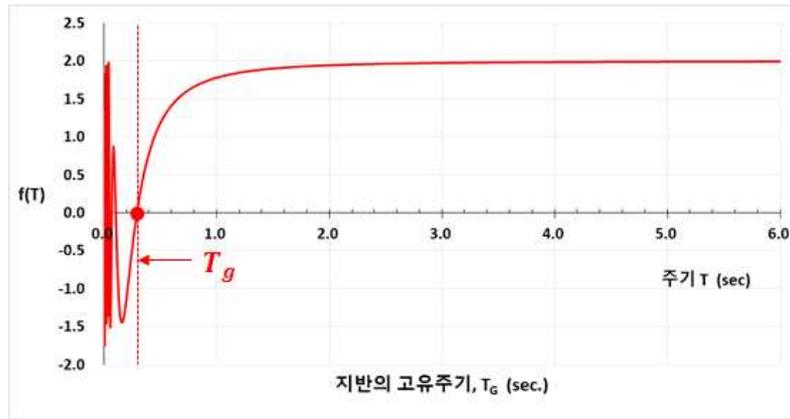


그림5-1. 토층 자유장 고유원진동수

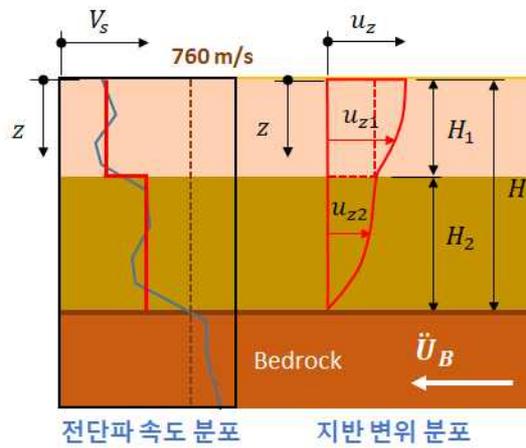


그림5-2. 이중코사인 방법에 의한 토층 자유장 수평변위

(3) 수평지반반력계수

다음 지침 해설표의 수평지반반력계수로부터 깊이와 전단파속도에 따라 연속적으로 수평지반반력계수를 산정할 수 있는 일반화한 공식들을 유도할 수 있다. ConBasement는 이 개발된 연속적인 수평지반반력계수 수식들을 이용하여 깊이와 각 토층의 전단파속도에 해당하는 수평지반반력계수를 산정한다.

지침 해설 표 6-1. 측벽에 작용하는 수평지반반력계수, K_H

Vs (m/s)	질량밀도 (ton/m ³)	프아송비	전단 탄성계수 (kPa)	탄성계수 (kPa)	수평지반반력계수, K_H (kN/m ² /m)		
					지표면 ~H/3	H/3 ~2H/3	2H/3 ~기반면
100	1.8	0.4	18000	50400	4082	5695	8770
200	1.8	0.4	72000	201600	16360	22725	34997
300	1.8	0.4	162000	453600	36809	51130	78743
400	1.9	0.4	304000	851200	69074	95948	147764
500	1.9	0.4	475000	1330000	107929	149919	230881
600	1.9	0.4	684000	1915200	155417	215883	332469
700	2.0	0.4	980000	2744000	222673	309307	476345

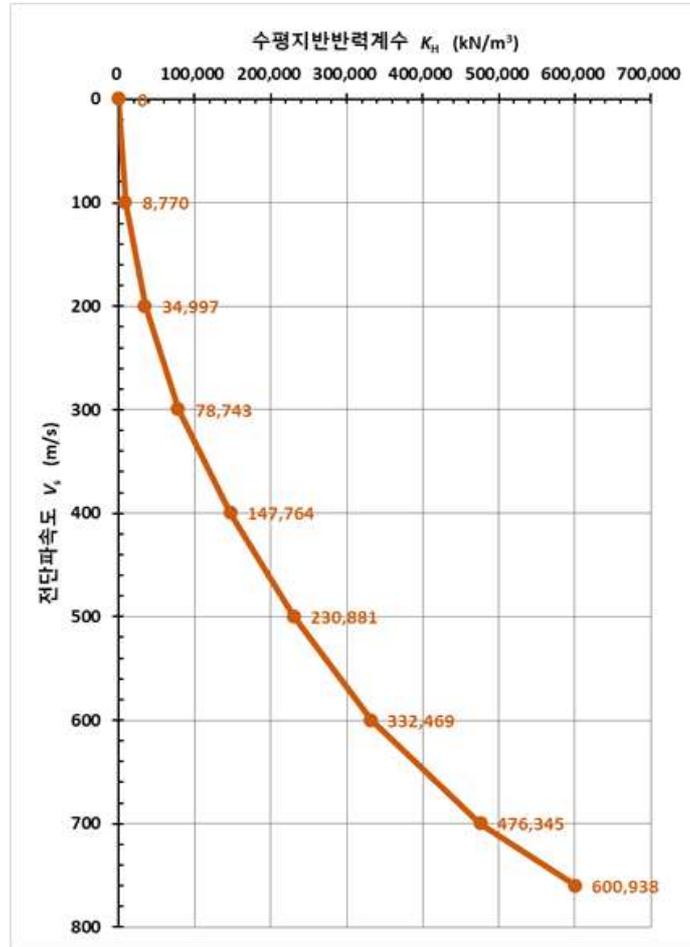


그림5-3. 토층 최하부 구간의 전단파속도별 수평지반반력계수

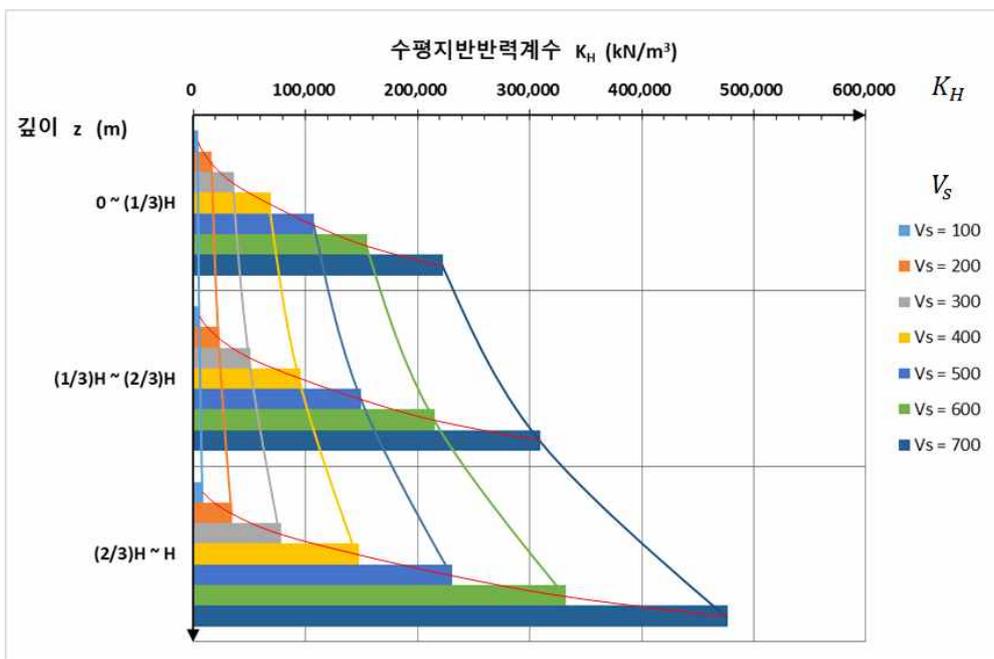
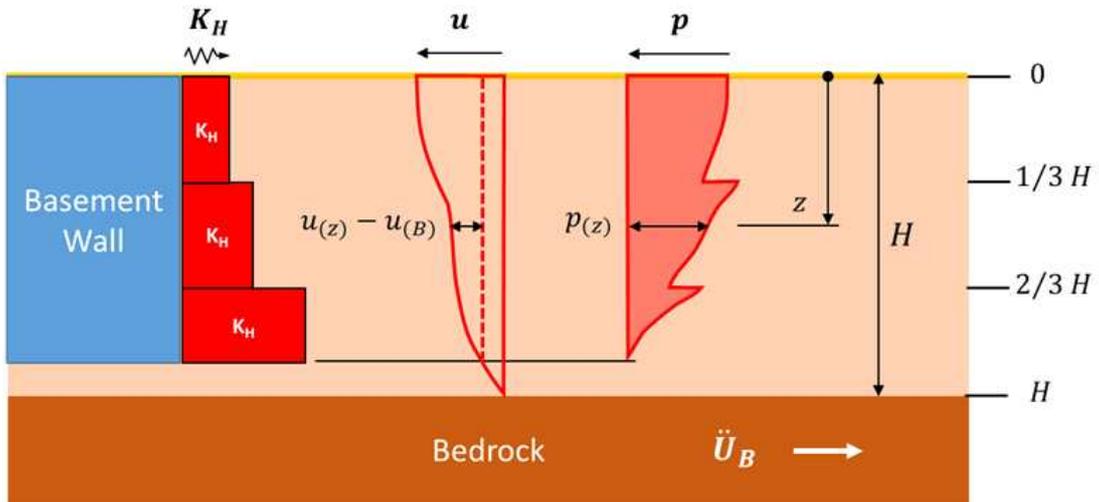


그림5-4. 전단파속도와 깊이구간에 따른 수평지반반력계수 분포



(a) 수평지반반력계수 (b) 지반변위 (c) 지진토압

그림5-5. 지하외벽에 작용하는 지진토압, $p(z) = (u(z) - u(B))K_{H(z)}$

6. 지하층 자체의 지진관성력

지반에 묻혀있는 건축물의 지하구조자체의 지진 관성력은 지상구조와는 달리 지반과의 상호작용 영향을 고려하는 방법으로 산정한다(한국 도시철도내진설계기준, 일본 건축구조기준 등 참조).

ConBasement는 일본건축구조기준(건축물의 지하구조 관성력 지진하중 관련 조항)을 참고하여 한국 도시철도내진설계기준에 따라 지하층 자체의 지진관성력을 산정한다. 각층 지하구조 자체의 지진관성력은 각층의 유효중량에 지반과의 상호작용을 고려한 각층의 설계수평가속도(그림6-1. 참조)를 곱하여 산정하며, 기반암에 묻힌 지하층의 설계수평가속도는 기반암의 가속도를 적용한다.

(1) 지하층의 지진관성력

$$F_{(i)} = k_{h(i)} W_{b(i)}$$

(2) 지하층의 설계수평가속도

$$k_{h(i)} = k'_h + (k_h - k'_h) \left(1 - \frac{z}{H}\right)$$

여기서,

$F_{(i)}$ = 고려하는 층의 수평관성력

$W_{b(i)}$ = 고려하는 층의 유효중량(사용자 입력데이터)

z = 지표면으로부터 고려하는 층의 깊이

H = 지표면으로부터 기반암의 상부 깊이

$k_{h(i)}$ = 고려하는 층의 설계수평가속도

k_h = 지표면의 설계수평가속도(SF_a)

k'_h = 기반암의 설계수평가속도($SF_{a(rock)}$)

S = 지진구역계수 및 위험도계수에 따른 유효지반가속도

F_a = 해당지반의 단주기 지반증폭계수

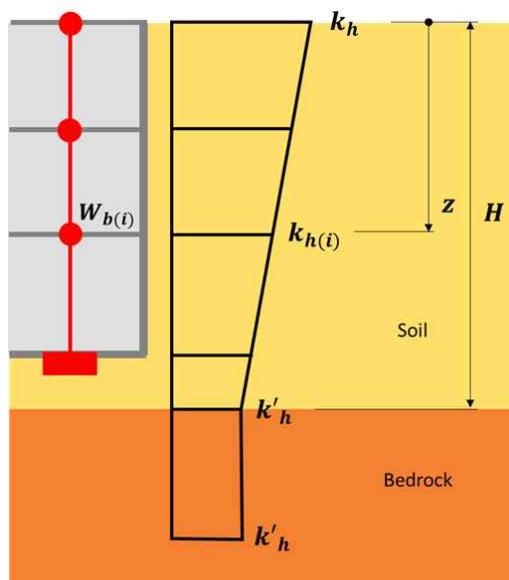


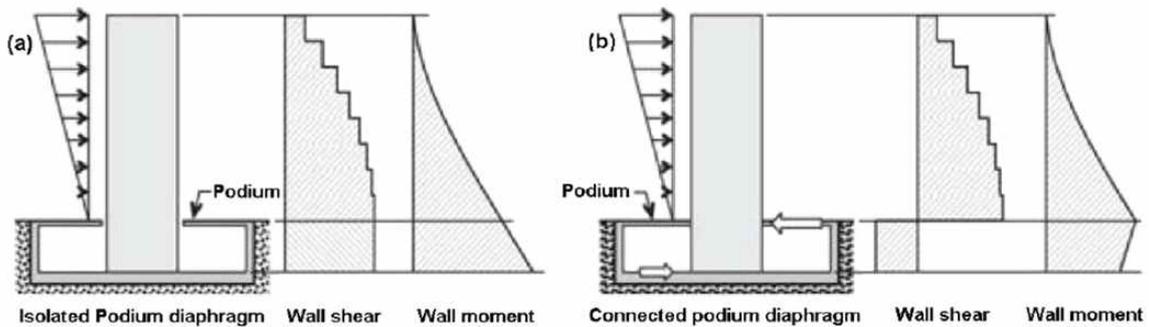
그림6-1. 지하층의 설계수평가속도 수직분포

7. 지상층의 관성력 영향

지상층의 관성력(밀면 전단력과 전도모멘트)이 지하외벽에 전달되는 전단력은 다음과 같이 지하구조물의 Backstay 효과에 의해 발생된다. ConBasement는 그림7-5의 해석모델 1처럼 회전을 허용한 코어기초모델과 같은 근사해석방식으로 층전단력을 산정한다. 다만, 프로그램의 단순화를 위해 Backstay 효과에 기여하는 요소들의 유효강성들을 고려하지 않고 있다.

(1) Backstay 효과

그림7-1(a)과 같이 지상구조부와 지하구조부를 수직으로 분리한 경우에는 Backstay 효과가 없어 지상구조의 밀면 전단력과 전도모멘트로부터 지하외벽에 전단력을 전달하지 않는다. 그러나 그림7-1(b)와 같이 분리하지 않은 경우에는 Backstay효과가 생겨 바닥 다이어프램을 통해 지하외벽에 전단력으로 전달된다. 지상구조로부터 전달되는 지하외벽의 전단력은 Backstay 효과에 영향을 주는 지하구조시스템 구성요소의 강성분포에 따라 크게 다르다. Backstay 효과에 영향을 주는 지하구조시스템의 주요구성요소의 강성은 바닥 다이어프램의 강성, 지하외벽의 강성, 코어전단벽의 강성, 코어전단벽기초의 회전강성, 지하구조의 외벽에 관련된 지지 지반의 강성 등이 있다(그림7-2참조).



(a) 코어 벽과 바닥 다이어프램을 분리한 경우 (b)코어 벽과 바닥 다이어프램을 연결한 경우

그림7-1. Backstay 효과 (Moehle 2015)

지상층의 관성력은 지하기초까지 연장한 지상부 전단벽과 바닥다이어프램을 통해 지하외벽시스템에 전단력으로 작용한다. 지상층의 밀면에는 횡전단력과 전도모멘트가 발생된다. 이 중에서 지상층의 밀면 전단력인 지상부의 모든 수직요소들의 전단력 합력이 지하외벽에 전달된다. 그러나 지상부의 전도모멘트는 주로 전단벽(또는 가새)구조와 바닥다이어프램을 통해 지하외벽에 전단력으로 작용하며, 지상부의 모멘트골조의 기동으로부터 지하외벽에 전달되는 전단력은 전단벽에 비해 상대적으로 적다. 지상부의 전도모멘트가 지하외벽에 전달되는 전단력을 합리적으로 산정하기 위해서는 지하구조물의 Backstay효과에 기여한 지하구조요소의 강성분포에 따라서 해석해야 하므로 매우 복잡한 절차가 필요하다. 강성분포를 고려하는 자세한 해석방법은 뒤에 첨부한 [부록 1]과 [부록 2]를 참조하기 바란다.

(2) 유한요소해석모델에 의한 지하 코어벽과 지하외벽의 전단력분포 양상

지상부의 밀면 전단력과 전도모멘트가 지하구조에 미치는 영향을 이해하기 쉽도록 3가지 해석모델(지상 10층, 지하 2층)에 의해 Backstay 영향을 고려하여 나타내었다. 해석모델은 1과 2는 다른 연구자와 마찬가지로 주요 Backstay 효과를 나타내는 지상 1층 다이어프램과 기초층만 고려하고 중간층 다이어프램은 포함시키지 않았다. 해석모델 3은 해석모델 2와 비교하기 위하여 중간층 다이어프램을 포함시켰다.

- 해석모델 1 : 중간층 다이어프램이 없고, 코어기초의 회전을 완전히 허용한 조건
- 해석모델 2 : 중간층 다이어프램이 없고, 코어기초의 회전을 완전히 구속한 조건
- 해석모델 3 : 중간층 다이어프램이 있고, 코어기초의 회전을 완전히 구속한 조건

다음 해석모델 1(그림7-2)은 코어기초의 회전을 허용한 해석모델이다. 그림7-2(d)에서 지하코어 전단벽의 전단력분포와 지하외벽의 전단력분포를 전단력의 방향(+, -)을 고려하면서 살펴보면 지하코어의 전단력과 지하외벽의 전단력 방향이 서로 반대로 발생하는 것을 알 수 있다.

이 해석모델에서는 코어기초의 회전을 허용하였기 때문에 지하 외벽 및 코어 전단벽에 작용하는 전단력은 코어기초의 회전을 구속한 해석모델 2(그림7-3)보다 크게 발생된다.

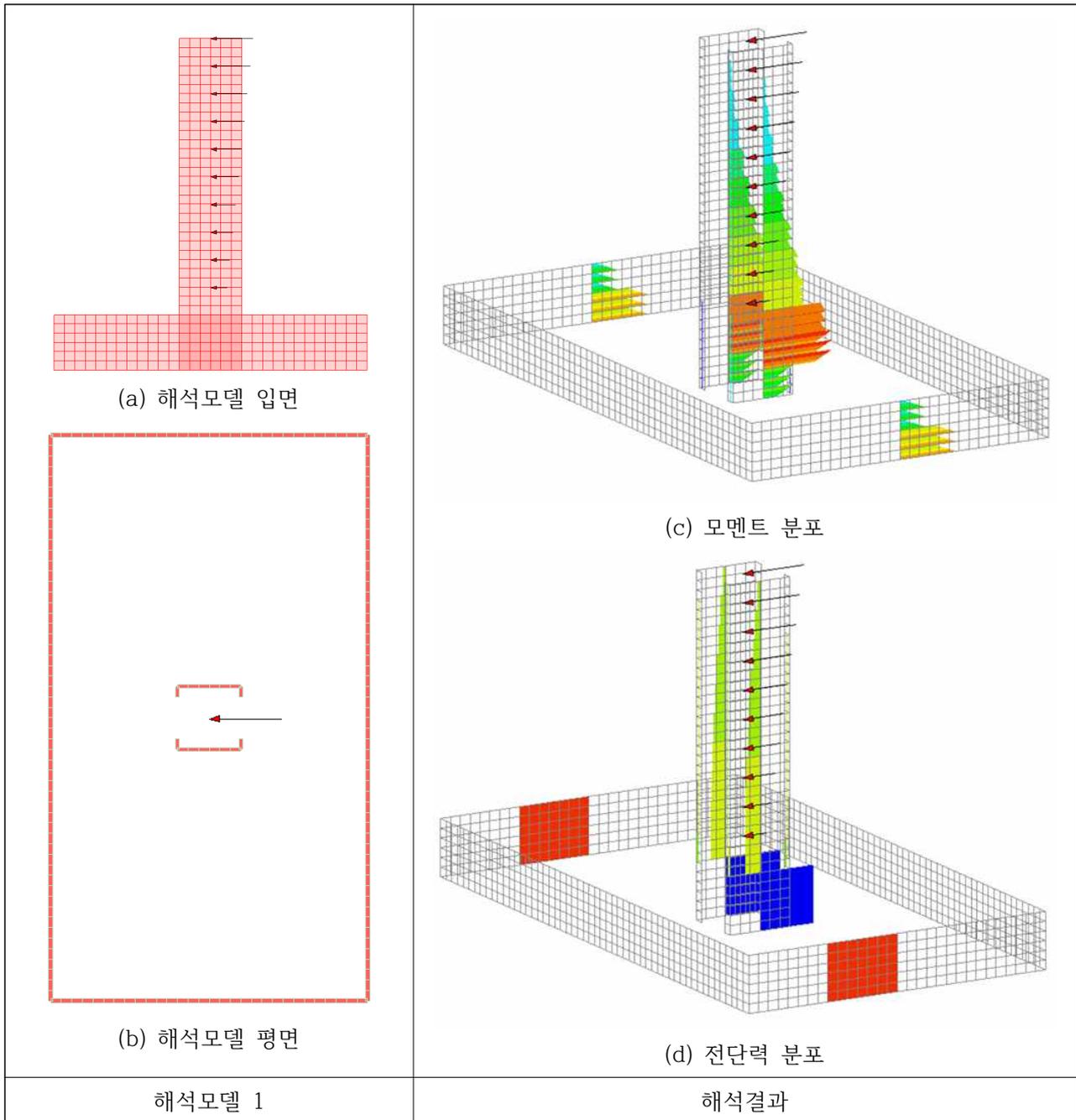


그림 7-2 해석모델 1의 Backstay 효과에 의한 코어벽(회전허용 기초)과 지하외벽(회전구속 기초)의 모멘트와 전단력 분포

다음 해석모델 2(그림7-3)는 코어기초의 회전을 구속한 해석모델이다. 그림7.3(d)에서 지하코어 전단벽의 전단력분포와 지하외벽의 전단력분포를 전단력의 방향(+, -)을 고려하면서 살펴보면 지하코어의 전단력과 지하외벽의 전단력 방향이 서로 반대로 발생하는 것을 알 수 있다.

이 해석모델에서는 코어기초의 회전을 구속하였기 때문에 지하 외벽 및 코어 전단벽에 작용하는 전단력은 코어기초의 회전을 허용한 해석모델 1(그림7-2)보다 작게 발생된다.

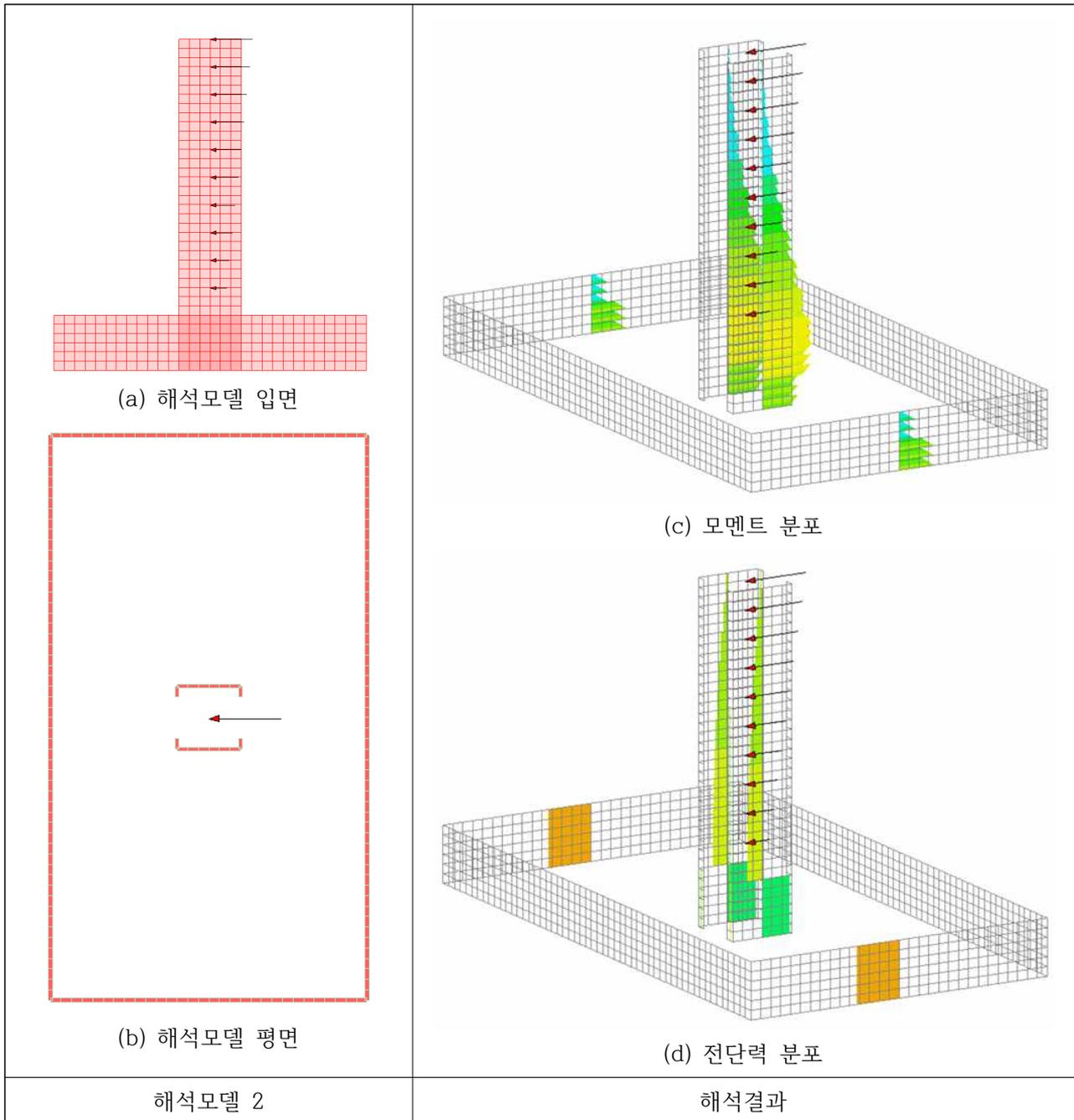


그림7-3. 해석모델 2의 Backstay 효과에 의한 코어벽(회전구속 기초)과 지하외벽(회전구속 기초)의 모멘트와 전단력 분포

다음 해석모델 3(그림7-4)은 코어기초의 회전을 구속한 해석모델이다. 그림7.4(d)에서 지하코어 전단벽의 전단력분포와 지하외벽의 전단력분포를 전단력의 방향(+, -)을 고려하면서 살펴보면 지하코어의 전단력과 지하외벽의 전단력 방향이 서로 반대로 발생하는 것을 알 수 있다.

이 해석모델에서는 코어기초의 회전을 구속하였기 때문에 지하 외벽 및 코어 전단벽에 작용하는 전단력은 코어기초의 회전을 허용한 해석모델 1(그림7-2)보다 작게 발생되며, 중간층 바닥다이아프램을 해석모델에 포함되어 있어 하부층으로 내려갈수록 전단력이 감소된다.

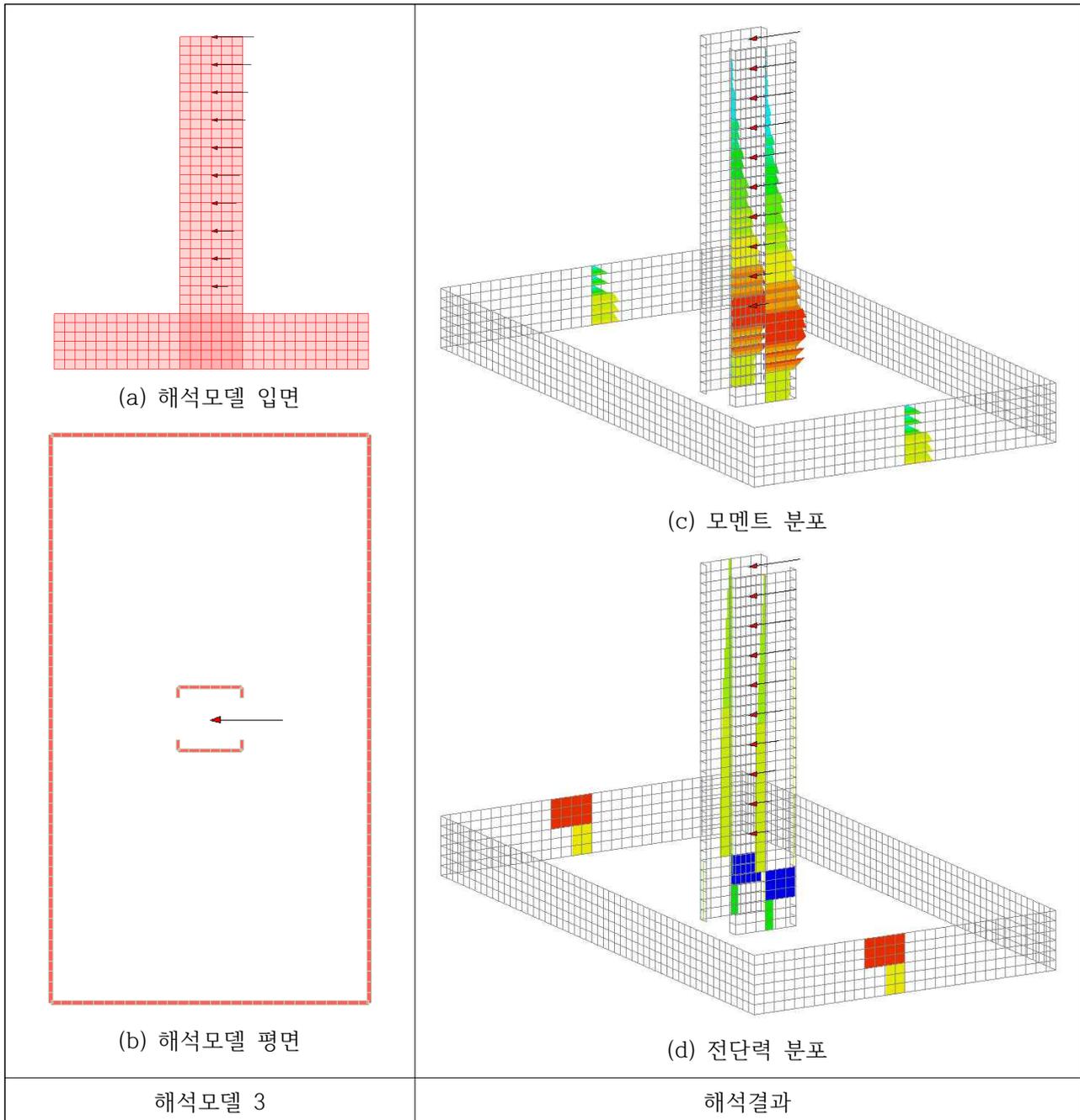


그림7-4. 해석모델 3의 Backstay 효과에 의한 코어벽(회전구속 기초)과 지하외벽(회전구속 기초)의 모멘트와 전단력 분포

다음 그림7-5는 앞에 나타난 해석모델 1(그림7-2), 해석모델 2(그림7-3) 및 해석모델 3(그림7-4)로부터 얻은 지하코어 전단벽과 지하외벽의 층모멘트와 층전단력의 분포를 나타낸 것이다. 해석모델 1(그림7-2)은 코어기초의 회전을 허용한 모델이고, 해석모델 2(그림7-3)는 코어기초의 회전을 구속한 모델이고, 해석모델 3(그림7-4)는 코어기초의 회전을 구속하고 중간층 다이아프램이 포함된 모델이다. Backstay효과에 기여하는 모든 요소의 강성들(TBI의 권장강성)을 다르게 모델링하면 또 다른 전단력 분포 양상을 갖게 될 것이다.

각 해석모델의 해석결과(그림7-2, 그림7-3, 그림7-4)에 나타난 바와 같이, 지하에 연장된 지상부 코어전단벽에는 지상부의 전단력과 반대인 반전 전단력이 발생되고, 이 반전 전단력은 바닥 다이아프램을 통해 지하외벽에 지상구조의 밀면 전단력 방향으로 전단력을 발생시킨다. 따라서 지하에 연장된 지상부 코어전단벽은 지하층의 층 전단력 저항에 직접적으로 작용하지 않으며, 지상부의 밀면 하중을 바닥을 통해 지하외벽에 전달하는 역할을 한다. 즉, 지하에 연장된 지상부 코어전단벽의 설계는 단지 반전 층전단력, 층모멘트 및 축력에 저항하기 위한 부재설계를 한 것이지 층전단력 저항에는 기여하는 역할을 하지 못한다. 따라서 지상층의 전도모멘트 영향이 지하구조에 포함될 수 있도록 하중모델에 반드시 포함 시켜야 한다. 그러나 지상부의 모멘트골조의 1층 밀면 기둥에 작용하는 휨모멘트는 기둥의 강성이 전단벽의 강성에 비해 상대적으로 작아 지하외벽에 전단력 증가에 미치는 영향이 적으므로 기둥의 개수가 적고 강성이 현저히 작은 기둥들의 지상 1층 휨모멘트는 하중모델에 포함시키지 않아도 지하외벽 설계에 매우 큰 영향을 주지는 않는다.

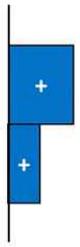
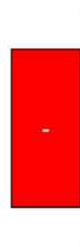
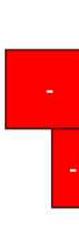
구분	해석모델 1 (코어기초 회전허용)	해석모델 2 (코어기초 회전구속)	해석모델 3 (코어기초 회전구속, 중간층 다이아프램 포함)
(a) 지하 코어 전단벽에 작용하는 반전 전단력	 (1a)	 (2a)	 (3a)
(b) 지하외벽에 작용하는 전단력	 (1b)	 (2b)	 (3b)

그림7-5. 지상구조의 밀면 전단력과 전도모멘트에 의한 지하구조 전단벽의 전단력 분포
(지하 코어 전단벽의 전단력방향과 지하외벽의 전단력방향은 서로 반대인 것에 유의 바람)

지상부구조의 밀면 전도모멘트에 대한 Backstay효과를 정밀하게 평가하기 위해, 관련된 요소의 유효강성들을 고려한 구조해석이 필요하다면 [부록 1]과 [부록 2]를 참고하여 해석모델들을 작성할 수 있으나, 이러한 해석은 매우 복잡한 절차와 많은 가정에 의해 수행하여야 하고, 일반적인 건축구조설계용 범용해석프로그램으로 구조해석과 부재설계를 병행하여 동시에 수행하기 어렵기 때문에 대부분 실무적용에 기피하고 있다.

또한, 복잡한 절차와 잘못된 가정으로 오히려 큰 오류가 있는 결과로 설계될 가능성도 있다.

따라서, ConBasement는 지상구조의 밑면 전도모멘트에 의해 지하외벽에 발생하는 전단력은 그림7-5의 해석모델 1처럼 회전을 허용한 코어기초모델과 같은 근사해석방식으로 층전단력을 산정한다. 이 단순해석법은 보수적이지만 복잡한 절차 없이 실무적으로 안전하게 지하외벽을 설계할 수 있다. 다음 그림7-6는 단순해석법의 개념도를 나타낸 것이다. 이 개념도에 ConBasement에 사용하는 다음 식(7.1)에 대한 의미가 포함되어 있다. ConBasement는 사용자가 입력한 지상구조의 밑면 전단력과 전도모멘트에 대해 지하기초까지 연장된 가상 코어의 전단벽에 발생하는 반전 전단력을 산정하고 가상 다이아프램(1층 바닥)을 통해 지하외벽에 전단력을 전달한다. 이 때 지하외벽 그룹의 강성 중심과 지상구조의 밑면 작용하중의 평면 위치(사용자 입력데이터)를 고려하여 지하외벽의 각 분할요소에 강성과 위치에 따라 전단력을 분배하며, 편심효과도 고려한다. 전단력분배에 대한 해석방법은 9장에 있는 '(2) 면내작용하중에 대한 구조해석'을 참조한다.

$$V = V_b + \frac{M_b}{H_f} \quad \text{식(7.1)}$$

여기서,

V = 지하층 코어 전단벽의 반전 전단력(코어기초의 회전강성 허용)

V_b = 지상층 밑면 전단력(사용자 입력데이터)

M_b = 지상층 밑면 전도모멘트(사용자 입력데이터)

H_f = Backstay 효과가 가장 큰 1층 바닥과 기초바닥 사이의 높이(프로그램에서 산정)

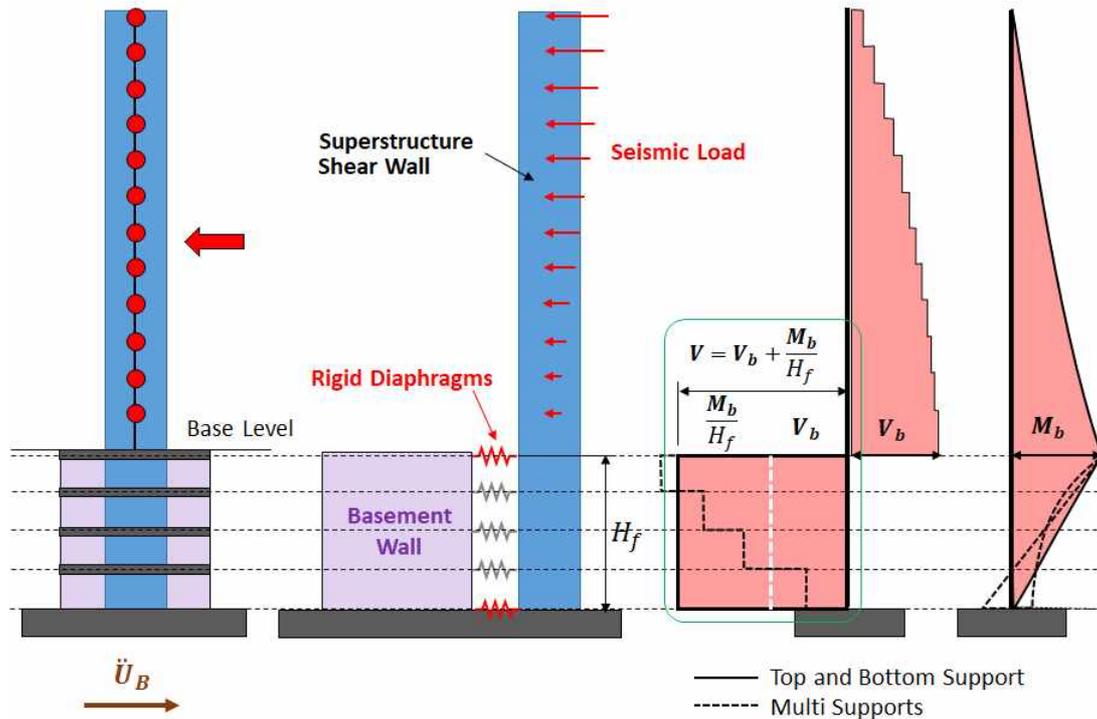


그림7-6. 지상부구조의 밑면 전단력과 전도모멘트가 지하외벽에 전달될 코어벽의 반전 전단력산정을 위한 근사 해석법 개념도

일반적으로 지하외벽의 상단에 위치한 주 다이아프램은 다른 다이아프램보다 더 많은 힘을 전달한다. 주 다이아프램은 건물의 다른 층보다 훨씬 더 두꺼운 슬래브를 사용하고, 개구부는 중요한 하중전달 경로를 방해하지 않는 위치에 계획해야 한다.

Modeling and acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings

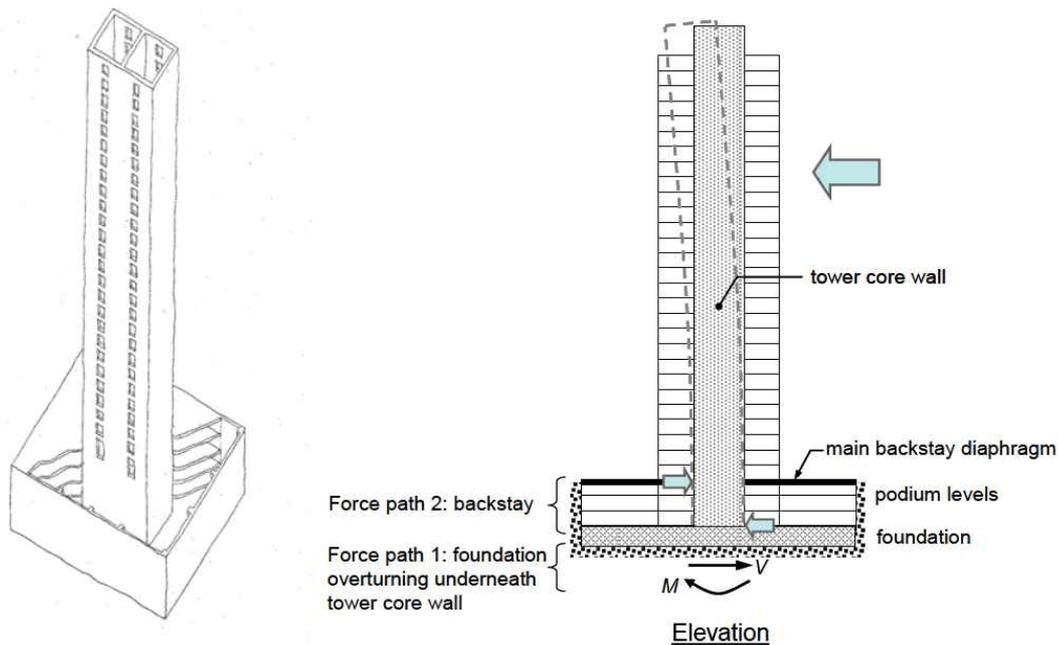


Figure A-1 Example of a tall building structural system with a concrete core wall superstructure and below-grade perimeter retaining walls forming a podium.

Generally, the main backstay diaphragm located at the top of the podium perimeter walls will transfer more force than any other diaphragm. During preliminary design, it is prudent to assume that this diaphragm will need to be a structural slab that is significantly thicker than the other floors in the building, and to plan openings at locations that will not interrupt critical load paths.

[참고문헌]

- Modeling and acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings, 2010, PEER/ATC 72-1
- Seismic shear demand in high-rise concrete walls by Baback Rajae Rad, et al., The University of British Columbia(Vancouver), 2009
- Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Diaphragms, Chords, and Collectors - A Guide for Practicing Engineers(NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 3) by Jack P. Moehle, John D. Hooper, Dominic J. Kelly and Thomas R. Meyer
- Tall Buildings Initiative-Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings, PEER Report 2017/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Headquarters at the University of California, Berkeley
- Soil-Structure Interaction for Building Structures, NIST GCR 12-917-21

내민보를 지지하는 Backstay 부분의 거동과 하중전달

건축물 지하구조의 Backstay효과는 다음 그림7-7에 나타난 바닥구조의 내민보(CB1)를 지지하고 있는 Backstay에 기여하는 구조요소들(B1, G1, CG1 및 지지점들)의 하중전달경로와 거동을 연상하면서 비교해보면 쉽게 이해할 수 있다. 여기서, 지하외벽의 기초밀면(4, 4')은 회전구속, 코어전단벽(1)의 기초밀면은 회전허용으로 가정하였다.

하중전달경로: 하중 w (지상부 지진관성력)는 부재 CB1(지상 코어전단벽) \Rightarrow B1(지하 코어전단벽) \Rightarrow G1(1층 다이아프램) \Rightarrow CG1(지하외벽) \Rightarrow 지지부(기초/지반)로 전달된다.

Backstay거동과 부재 B1의 역할: B1에는 CB1의 전단력 부호(+)에 반대인 부호(-)의 반전 전단력이 발생하며, 부재 B1은 반전 전단력(V_{1-2})과 휨모멘트(M_2)에 저항하도록 설계된다. 그림(a)에서 부재 B1은 G1을 통해 양쪽 CG1에 하중(w 에 의해 발생된 V_2 와 M_2)을 전달하는 역할을 하고, CG1의 하중저항에 기여하지 않는다.

그림7-7. 내민보를 지지하는 Backstay 부분의 거동과 하중전달

<p>(a) Backstay 요소 부재 G1, B1, CG1 지지부 1, 4, 4' 지지부 1은 코어기초 지지부 4, 4'는 지하외벽기초</p>	
<p>(b) 연속부재 B1-CB1 하중 및 지지조건</p>	
<p>(c) 연속부재 B1-CB1 휨모멘트 분포</p>	<p style="text-align: center;">$M_2 = 1125 \text{ kN.m}$</p> <p style="text-align: center;">$M_2 = w \cdot L_2^2 / 2 = 10 \cdot 15^2 / 2 = 1125 \text{ kN.m}$</p>
<p>(d) 연속부재 B1-CB1 전단력 분포</p>	<p style="text-align: center;">$V_{1-2} = 375 \text{ kN}$</p> <p style="text-align: center;">$V_2 = 150 \text{ kN}$</p> <p style="text-align: center;">$V_2 = w \cdot L_2 = 10 \cdot 15 = 150 \text{ kN}$</p>
<p>(e) 부재 B1 자유물체도</p>	<p style="text-align: right;">$V_2 = 150 \text{ kN}$ $M_2 = 1125 \text{ kN.m}$ $R_2 = V_2 + M_2/L_1 = 525 \text{ kN}$</p>
<p>(f) 부재 CG1 자유물체도 휨모멘트 전단력</p>	<p style="text-align: center;">$M_4 = P \cdot L_1 = 787.5 \text{ kN.m}$</p> <p style="text-align: center;">$V_{4-5} = (M_2/L_1)/2 + V_2/2$ $= (1125/3)/2 + 150/2$ $= 187.5 + 75 = 262.5 \text{ kN}$</p>

8. 뒷벽의 횡하중과 횡스프링지지력

ConBasement는 지진토압작용의 반대쪽에 위치한 외벽면에는 지표면으로부터 특정 깊이 위치의 아래에서는 정적수압/정적토압과 횡스프링지지력을 추가로 고려할 수 있다. 새 버전의 ConBasement는 사용자의 선택에 따라서 다음과 같이 정적수압/정적토압, 횡스프링지지력 및 기반암의 횡구속을 고려할 수 있다.

(1) 뒷벽에 작용하는 정적 수압

지진시에 지반에 포함된 지하수는 유출되어도 지하외벽에 밀착되므로 지하외벽에 지진하중 반대방향으로 지하수 위에 의한 수압이 발생할 수 있을 것이다. 따라서, ComBasement에서는 사용자의 선택에 따라 적용할 수 있게 하였다.

(2) 뒷벽에 작용하는 정적 토압

지진시에 토층의 수평변위가 발생하지만 토층자체의 중력하중은 작용하고 있으므로 어느 정도의 깊이(지침에는 8m)에서부터는 지진하중 반대방향으로 정적토압의 영향이 발생할 수도 있을 것이다. 그러나 어느 정도의 깊이부터 어느 정도 크기의 횡토압이 분포되는지 확인이 필요하나, 일반적인 건축구조설계용 범용해석프로그램으로 평가하기 어렵다. 다만, ComBasement에서도 사용자의 선택에 따라 8m 이하에 적용할 수 있게 하였다.

(3) 뒷벽 토층지반의 횡스프링지지력

그림8-1, 8-2와 같이 변위응답기반이론으로 볼 때 지하구조시스템의 지진토압에 의한 수평변형이 지반의 수평변형보다 작을 경우에는 지반의 수평반력이 발생하지 않아야 한다. 또한 구조물의 움직임에 저항하는 수동토압의 크기는 구조물의 이동량과 그 움직임에 저항하는 흙의 강도와 강성에 의해 제어되어야 하며, 지하구조시스템의 수평변위가 상당히 커야 뒷벽에 수동토압이 발생할 수 있다. 직접해석법을 적용하기 위한 해석모델에 횡스프링지지부를 직접 포함시킬 경우에는 층간 사이 지하외벽의 면외 힘변형을 고려하기 위해서 지반요소와 구조요소는 수직 및 수평으로 분할한 위치에 배치해야 하고, 횡스프링지지부에 생기는 반력이 해당지반의 횡지지력을 초과하는지 확인해야 하며, 이에 따른 지반의 비선형해석이 필요하기 때문에 실무에 어려움이 많아진다. 따라서 **응답변위법을 사용하고 있는 ConBasement에서는 다음과 같이 건축구조물의 지하구조 내진설계 지침의 '횡스프링지지력'에 해당하는 횡하중을 산정하여 지진하중 반대방향으로 이 횡하중을 고려하는 방법을 적용하고 있다.**

ConBasement의 횡스프링지지력은 다음과 같이 $(u_{(z)} - u_{(zB)}) < u_{str(z)}$ 인 구간에서 발현되며, 지표면에서부터 4m 깊이까지의 횡스프링지지력은 적용하지 않는다.

$(u_{(z)} - u_{(zB)}) \geq u_{str(z)}$ 인 구간, 횡하중 = 횡스프링지지력 = $p_{(z)} = 0$

$(u_{(z)} - u_{(zB)}) < u_{str(z)}$ 인 구간, 횡하중 = 횡스프링지지력 = $p_{(z)} = [(u_{(z)} - u_{(zB)}) - u_{str(z)}] K_{H(z)}$

여기서, $u_{(z)}$ = 지반의 지진횡변위, $u_{(zB)}$ = 지하구조물 저면 지반의 지진횡변위, $u_{str(z)}$ = 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위, $K_{H(z)}$ = 수평지반반력계수, z = 지표면으로부터 고려하는 깊이

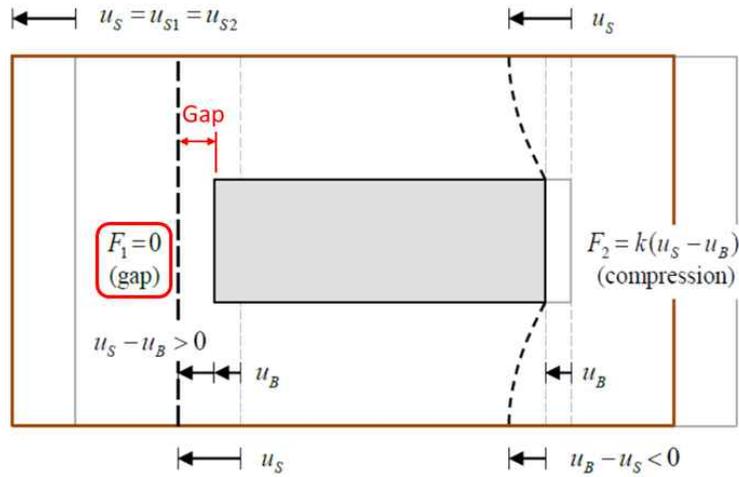
(4) 뒷벽 기반암지반의 횡구속조건

기암반의 수평변형은 지하구조시스템의 수평변형보다 작기 때문에 암반에서는 수평반력이 발생할 수 있으므로 기반암에서는 횡구속조건을 적용할 수 있다. ComBasement에서도 사용자의 선택에 따라 적용할 수 있게 하였다. ConBasement는 선택에 따라 기반암의 전단파속도를 기준하여 탄성횡변형을 개략적으로 고려하며, 모든 하부 기반암은 첫 기반암의 전단파속도(760m/s 이상)를 기준하여 동일한 물성을 갖는다고 가정한다.

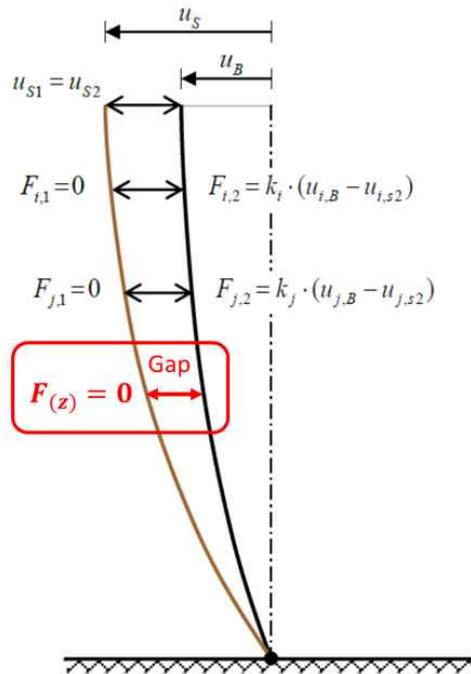
[참고문헌]

- Soil-Structure Interaction for Building Structures, NIST GCR 12-917-21
- Effects of Shallow Soil Deposits and Substructures on Earthquake Response Spectrum, 2013, Kim, Dong-Kwan, Department of Architecture and Architectural Engineering, College of Engineering, Seoul National University
- On the seismic response of shallow-buried rectangular structures by E. Debiassi, A. Gajo, D. Zonta, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, Universita di Trento, Via Mesiano 77, I-38123 Povo, Trento, Italy

다음 그림8-1은 청주대학교 김동관 교수의 박사학위논문(Effects of Shallow Soil Deposits and Substructures on Earthquake Response Spectrum, 2013, 서울대학교)에서 발췌한 것으로 지하구조물의 횡강성이 지반의 횡강성보다 크기 때문에 지하구조물의 횡변위는 지반의 횡변위보다 작은 것을 나타낸다. 따라서 지하실의 뒤쪽(그림a의 왼쪽)의 벽과 지반 사이에 틈($u_s - u_B$)이 발생하고, 앞쪽(그림a의 오른쪽)의 벽에는 큰 횡토압이 발생한다. 그림에서 빨간색의 글씨와 선들은 뒤쪽부분의 반응을 잘 나타내기 위해 추가적으로 표시한 것이다. 이 그림에 대한 구체적인 조건과 동적반응결과에 대한 내용은 논문을 참고하기 바란다. 또한 지진시 뒷벽에 작용하는 횡토압은 0에 가깝다는 것을 나타낸 건축물의 지하구조 내진 설계 지침에 있는 해설그림 5-6을 참고하기 바란다.



(a) Displacements of soil and basement on plane

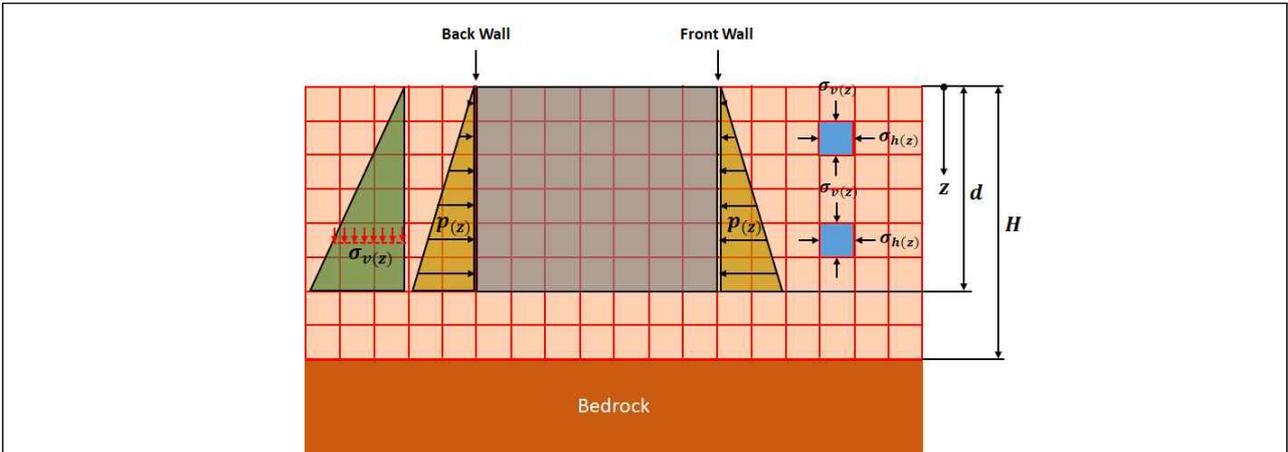


(b) Forces between soil and basement

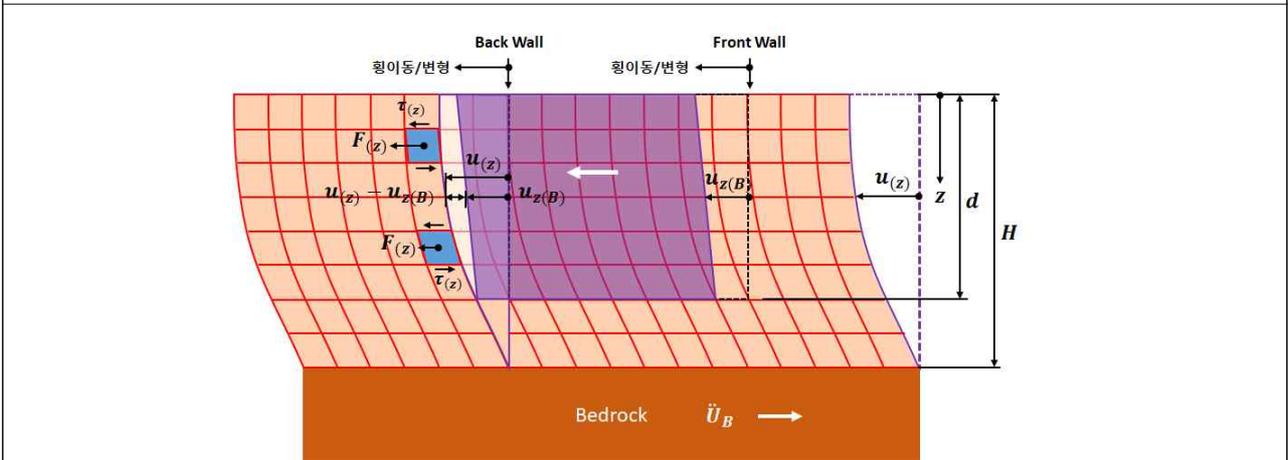
Fig. 8-18. Displacements and forces of simplified analysis model

그림8-1. 단순해석모델에 의한 변형과 힘 (김동관 교수의 박사학위논문 223쪽)

다음 그림8-2는 참고문헌과 토질역학이론을 배경으로 하여 한 방향 지진시 지하외벽의 뒷벽에서의 정적 토압(수직 및 수평 방향 힘)과 지진토압(수평 방향 힘과 수평변형)의 조합력을 개념적으로 나타낸 것이다.



(a) 지하외벽에 작용하는 정적 토압(수직 및 수평 성분), 상시



(b) 지하외벽에 작용하는 지진 토압(수평 성분), 지진시

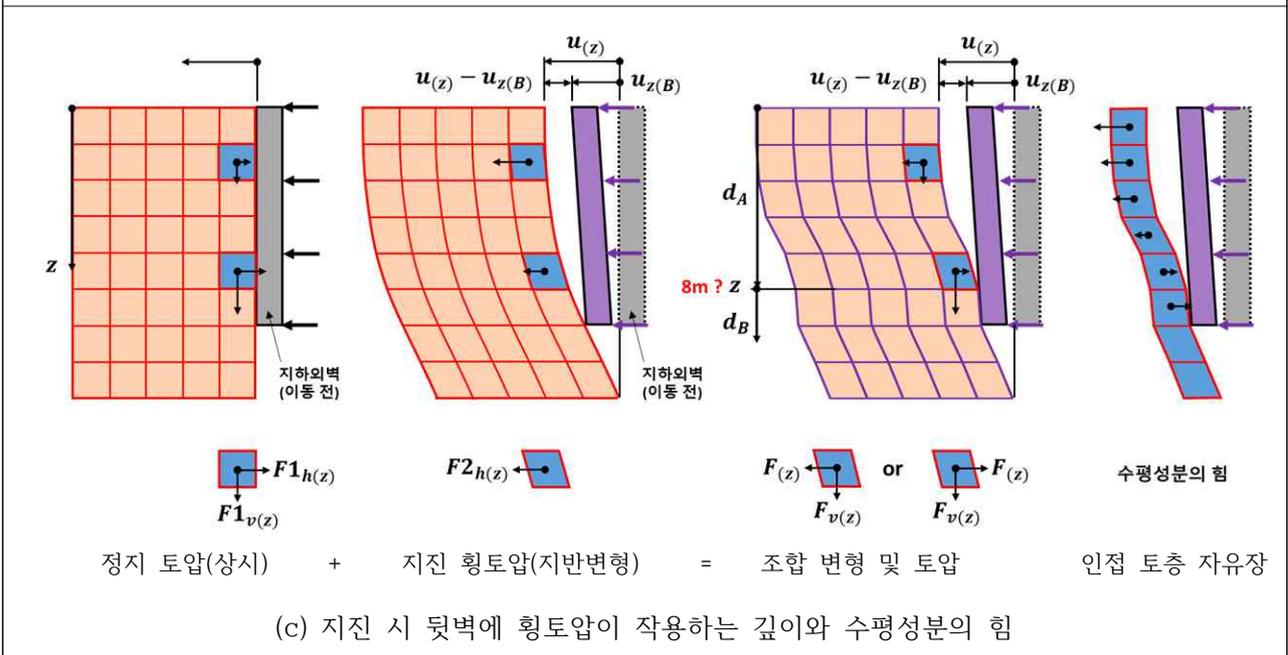


그림8-2. 지진 시 뒷벽에 작용하는 횡토압 개념도

응답변위법에 의한 지중구조물의 지진해석에 대한 기본원리 이해

응답변위법을 이용한 지중구조물의 지진해석모델을 적합하게 작성하기 위해서는 우선 응답변위법에 대한 기본원리를 반드시 이해할 필요가 있다.

김두기교수의 논문 '응답변위법을 이용한 지중구조물의 지진해석, Earthquake Response Analyses of Underground Structures Using Displacement Responses of Soil, 2006'에서 기본원리를 함축적으로 잘 나타낸 내용이 있어 다음과 같이 발췌하였다. 이 논문은 토목구조분야에서 다루고 있는 터널구조의 지진해석에 관련된 것이다.

1. 응답변위법

응답변위법(김두기, 2005)은 지중구조물의 내진설계를 위하여 1970년대 일본에서 고안된 방법으로, 구조물의 단위체적당 중량이 구조물을 둘러싼 주변 매개체의 단위체적당 중량보다 작은 지중구조물에 주로 사용하는 내진설계방법이다. 지상구조물의 경우 주변 매개체인 공기보다 상대적으로 구조물의 중량이 매우 크므로, 지진시 구조물의 관성력이 지상구조물의 응답에 주된 영향을 미친다. 그러나 지상구조물과는 달리 대부분의 지중구조물의 내부는 비어있는 상태(즉, 중공인 상태)이며, 단위체적당 중량이 인접지반의 단위체적당 중량에 비해 작다. 또한, 지중 구조물은 주변 지반으로 인해 자유롭게 진동하지 못하므로, 지상구조물에 비해 감쇠가 매우 크게 발생하며, 지중구조물의 변위거동도 인접지반의 변위거동과 유사하다. 즉, 지진시 지중구조물 응답은 구조물 자체의 질량에 의한 관성력보다는 인접지반에서 발생하는 지반의 상대변위에 주로 영향을 받는다. 지진시 지중구조물의 응답을 구하기 위해 본 연구에서 사용한 응답변위법의 개념 및 절차를 요약하면 다음과 같다.

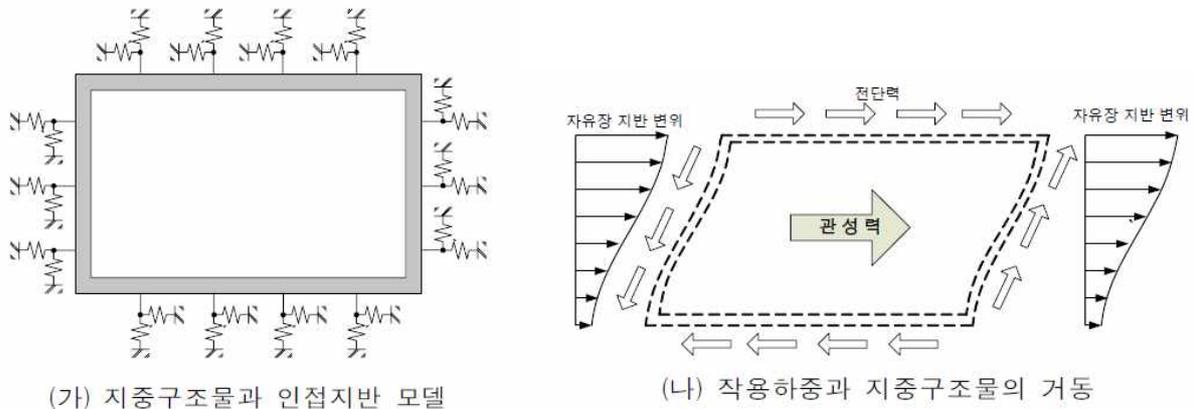


그림8-3. 지중구조물의 거동

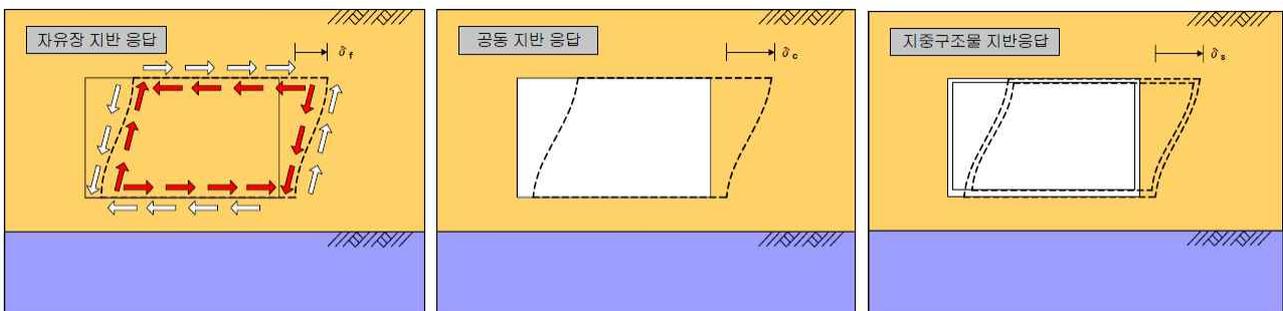


그림8-4. 지반의 변위응답

(1) 자유장 지반응답(δ_f)

지중구조물이 없는 자유장 지반(free field soil)의 지진에 의한 지반 응답은 δ_f 와 같다. 여기서 지중구조물 위치

에서의 변형된 지중구조물의 형상을 가상 경계 면으로 가정하면, 가상 경계면의 내부와 외부에서의 전단응력은 서로 평형상태를 유지한다.

(2) 공동 지반응답(δ_c)

지중구조물이 들어설 위치의 지반을 제거한 공동지반(cavity soil)의 지진에 의한 전단변형은 δ_c 와 같다.

여기서 자유장 지반응답(δ_f)에서 가상 경계면의 내부에서의 전단응력은 없으므로, 평형상태가 무너져 추가 변형(δ_a)이 발생하여 경계면에서의 응력이 '0'으로 된다. 즉, $\delta_c \neq \delta_f$ 이며, 다음과 같다.

$$\delta_c = \delta_f + \delta_a \quad (1)$$

여기서 추가변형 δ_a 는 자유장 지반응답(δ_f) 상태에서 가상 경계면의 외부에 작용하는 전단응력을 작용시킬 때 발생하는 지반의 추가응답(δ_a)이다.

(3) 지중구조물 지반응답(δ_s)

지중구조물 지반응답(δ_s)은 자유장 지반응답 효과와 공동 지반응답 효과를 포함하여야 한다. 즉, 지중구조물 지반응답은 지중구조물 지반을 모델링한 후, 자유장 지반응답(δ_f)을 작용시키고, 동시에 자유장 지반응답(δ_f) 상태에서 가상 경계면의 외부에 작용하는 전단응력을 작용시킬 때 발생하는 지중구조물의 응답을 의미한다.

자유장 해석에서 구한 지반의 변위응답을 사용한 응답변위법을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 지중구조물의 인접 지반을 스프링으로 모델링 한 후, 2) 스프링으로 지지된 지중구조물에 자유장 지반응답에서 구한 변위를 작용시키고, 3) 다시 자유장 지반의 지중구조물의 가상 경계면에서의 전단응력을 구조물의 주변에 작용시킨다. 여기서 지중구조물의 자체 질량 효과는 관성력을 사용하여 고려한다.

참고로 응답변위법은 정적하중으로 변환된 지진하중을 지중구조물에 작용시키는 정적 해석법이므로, 구조체의 강성과 하중과의 관계만으로 해석을 수행한다.

[해설] 즉, 지하구조물의 지진해석에 직접해석법이 아닌 응답변위법을 적용할 경우에는 수평지반반력계수(HING스프링지지)와 지반의 변위는 지진토압(하중)을 산정할 때 이미 고려되었으므로, 지하구조물의 구조해석모델에는 HING스프링지지(수평지반반력계수)를 포함하지 않고, 그림12-3에 나타난 것처럼 지하구조 요소의 강성, 기초밀면지지와 하중만 포함시켜 구조해석을 수행하여야 한다는 것을 의미한다.

2. 지반반력계수

지반반력계수는 지반이 탄성적인 거동을 보여주는 범위 내에서 기초의 변위량이나 지반반력을 구하기 위해 필요한 상수이며, 다음과 같이 정의한다.

$$k = p/\delta \quad (2)$$

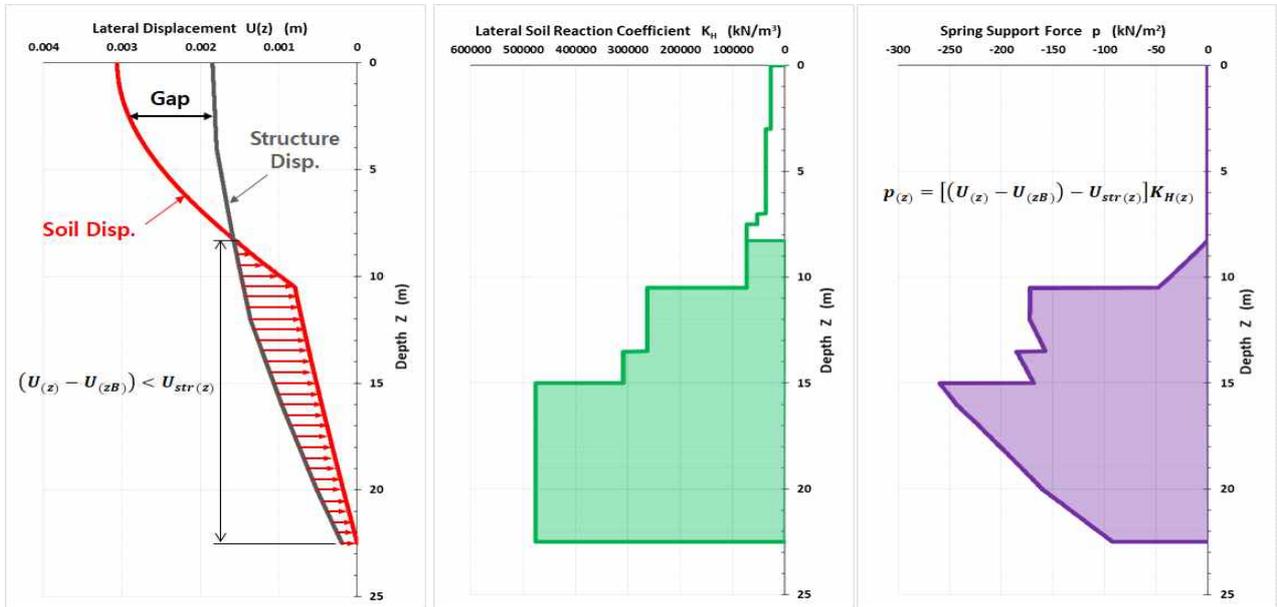
여기서, k 는 지반반력계수(kN/m^3)이고, δ 는 변위량(m)이며, p 는 지반반력(kN/m^2)이다.

지반은 탄성체가 아니고, 깊이 방향으로 밀도나 압축성이 변하기 때문에 지반반력-변위량 곡선은 비선형의 형상을 갖는다. 따라서 지반반력계수는 변위량과 더불어 변화하지만, 본 논문에서는 변위량과 지반반력의 할선 구배로 정의하였다. 지반반력계수는 지반과 구조물의 상호작용을 나타내는 값이므로, 변위량 뿐만 아니라 구조물의 형상, 치수, 강성 등의 영향을 받는다. 또한, 이외에도 재하시간, 깊이에 따른 지반특성변화, 시험시와 실제구조의 재하상태의 차이 등의 영향을 받는 아주 복잡한 성질을 갖는 상수이다. 그러므로 토질시험 및 현장시험 결과로부터 설계에 쓰이는 지반반력 계수를 결정하는 경우에는 앞서 설명한 여러 가지 요소를 고려하여야 한다.

뒷벽에 작용하는 횡스프링지지력의 산정 예

다음 그림8-5에 있는 그래프들은 지진시 뒷벽에 작용하는 횡스프링지지력의 산정방법을 쉽게 이해할 수 있도록 ConBasement에 의한 지진토압 해석결과(그림12-1 참조)를 엑셀로 작성한 것이다.

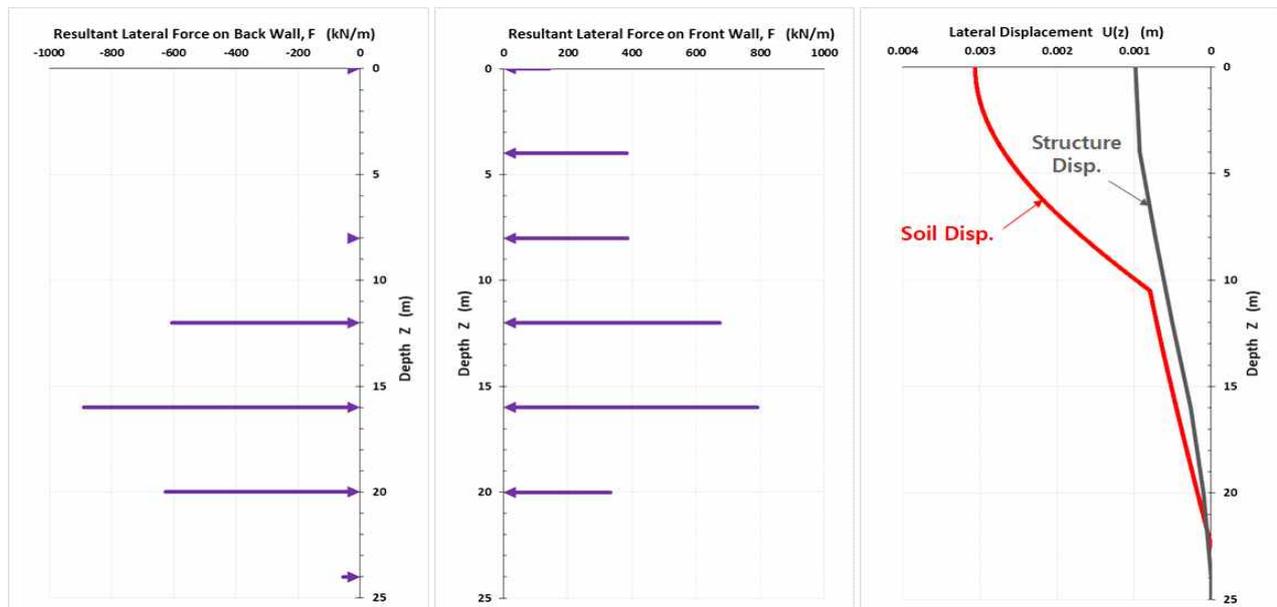
그림(a)는 뒷벽에 작용하는 횡스프링지지력이 발현되는 $(u_{(z)} - u_{(zB)}) < u_{str(z)}$ 의 구간을 나타내며, 그림(c)는 그림(a)의 횡스프링지지력이 발현되는 구간의 상대변위와 그림(b)의 수평지반반력계수에 의해 산정한 횡스프링지지력의 분포를 나타낸다. 그림(d)는 그림(c)의 횡스프링지지력 분포에 의해 각층 슬래브 위치에 발생된 반력(횡력)을 나타내며, 그림(e)는 앞벽에 작용하는 지진토압 분포에 의해 각층 슬래브 위치에 발생된 반력(횡력)을 나타낸다. 그림(a)에 있는 구조물의 횡변위는 그림(e)의 앞벽에 작용하는 지진토압에 의한 횡변위이고, 그림(f)는 그림(d)의 뒷벽에 작용하는 횡스프링지지력과 그림(e)의 앞벽에 작용하는 지진토압을 동시에 고려하여 발생된 지하구조의 횡변위를 나타낸다.



(a) 뒷벽 지반과 구조의 횡변위

(b) 뒷벽 수평지반반력계수

(c) 뒷벽 횡스프링지지력 분포



(d) 뒷벽의 각층 슬래브 위치에 작용하는 횡스프링지지력 합력

(e) 앞벽의 각층 슬래브 위치에 작용하는 지진토압 합력

(f) 뒷벽 지반의 횡스프링지지력에 의해 감소된 구조의 횡변위

그림8-5. 지진시 뒷벽에 작용하는 횡스프링지지력과 앞벽에 작용하는 지진토압

9. 지하외벽시스템의 구조해석

ConBasement는 다음과 같이 면외하중과 면내하중 작용에 대해 연속적으로 해석하여, 각각 독립적으로 부재(지하외벽)를 설계한다.

(1) 면외작용하중에 대한 구조해석

지하외벽의 면외작용하중에 대한 부재설계를 위한 하중조합은 $1.6H$ 의 정적횡압과 $1.0H + 1.0E(I_e/R)$ 의 지진시 횡압을 고려하여야 한다. 따라서 지하외벽 부재의 면외하중에 대한 설계강도(전단력 및 휨모멘트)는 정적횡압과 지진시 횡압 모두를 만족하여야 한다. 즉 소요설계강도(전단력 및 휨모멘트)는 앞의 2가지 하중조합에 대한 Enveloping에 의해 산정되어야 한다.

ConBasement는 다음과 같은 방법으로 2가지 하중조합에 대해 각각 해석하고, Enveloping하여 소요설계강도(전단력 및 휨모멘트)를 산정하여 지하외벽 부재를 설계할 수 있다.

- 유한요소해석법에 의해 수직벽의 모든 요소분할위치의 소요설계강도(전단력 및 휨모멘트)를 산정하고 모든 요소분할위치의 유효2차단면모멘트를 고려하여 처짐(ACI 318-19) 및 균열(FIB MODEL CODE 2010)을 정밀하게 해석한다.

- 전단력과 휨모멘트는 각 하중에 대한 스패를 따라 10mm 간격의 분할절점으로 계산하여 각 하중에 대해 점진적으로 누적한 최종 분포 값으로 산정된다.

ConBasement는 1차적으로 탄성해석법 기반으로 10mm 간격으로 탄성처짐을 산정하고, 2차 해석에서 요소분할위치의 유효2차단면모멘트를 고려하여 최종적인 수평 처짐 변형을 산정한다. 해석방법은 좀더 정확한 처짐 산정을 위하여 다음과 같이 가상일법 방정식과 Simpson의 법칙을 적용한 수치통합적분방법을 사용한다.

- 임의 위치의 처짐

$$\Delta = \int \frac{m_s m_1}{EI} dx$$

- 심프슨의 법칙

$$\int y dx = s/3 [(sum\ of\ end\ ordinates) + 4(sum\ of\ even\ ordinates) + 2(sum\ of\ remaining\ odd\ ordinates)]$$

여기서,

m_s = 사용하중에 의한 임의 위치의 휨모멘트

m_1 = 임의 위치의 단위가상하중(1)에 의한 단위가상모멘트

E = 탄성계수

I = 단면2차모멘트

x = 임의 위치

s = 요소의 분할 증분길이(ConBasement에서는 10mm)

(2) 면내작용하중에 대한 구조해석

일반적으로 건축물의 지하구조는 내부 모멘트골조, 지하층을 둘러싼 지하외벽 및 바닥격막으로 구성되어 있다. 지하구조에서 모멘트골조는 지하외벽에 비해 횡력저항강성이 현저히 작기 때문에 대부분의 횡력은 지하외벽시스템으로 전달된다. 이러한 배경으로 건축구조기준 14.6(6)에서도 “지하구조에 대한 근사적인 설계방법으로, 설계지진토폴을 포함하는 모든 횡하중을 횡하중에 평행한 외벽이 지지하도록 설계할 수 있다.”라고 기술하고 있다. 이를 근거로 하여 지하구조의 지진력저항시스템은 지하층을 둘러싼 지하외벽으로 구성된 전단벽시스템이 총전단력의 100%를 저항한다고 간주할 수 있으므로 ConBasement에서도 내부모멘트골조의 구조요소는 무시하고 해석한다.

각 전단벽의 전단력을 산정하는 방법은 건축물의 지하구조 내진설계 지침(대한건축학회, Rev.1)의 8.1(5)에 규정한 “지하구조물에 작용하는 지진동하중은 무한강성의 슬래브 다이아프램으로 연결된 지하벽체가 지지하는 것을 원칙으로 한다.”를 근거로 하여 횡력에 대한 해당 층 각 전단벽의 횡변위가 동일하다는 가정과 전단벽의 상대강성을 이용한다. 또한, 전단벽의 면외강성은 구조해석에 고려하지 않는 조건으로 한다. 횡력에 대한 전단벽시스템 해석에는 탄성해석법을 사용하였다.

전단벽으로서의 지하 외벽과 내벽 해석에는 각층 높이와 평면적 분할요소 길이로 한 유한요소해석법을 적용하였다. 이 프로그램은 각 층 바닥 다이아프램은 큰 개구부가 없는 강체로 간주하고 면내 강성과 강도가 모든 하중전달경로에 충분하다고 가정하고 해석한다.

지하외벽시스템의 횡력에 대한 해석은 다음과 같이 각 분할 벽요소의 전단력 분배와 전체시스템(전단벽 그룹)의 층 횡변위를 산정한다.

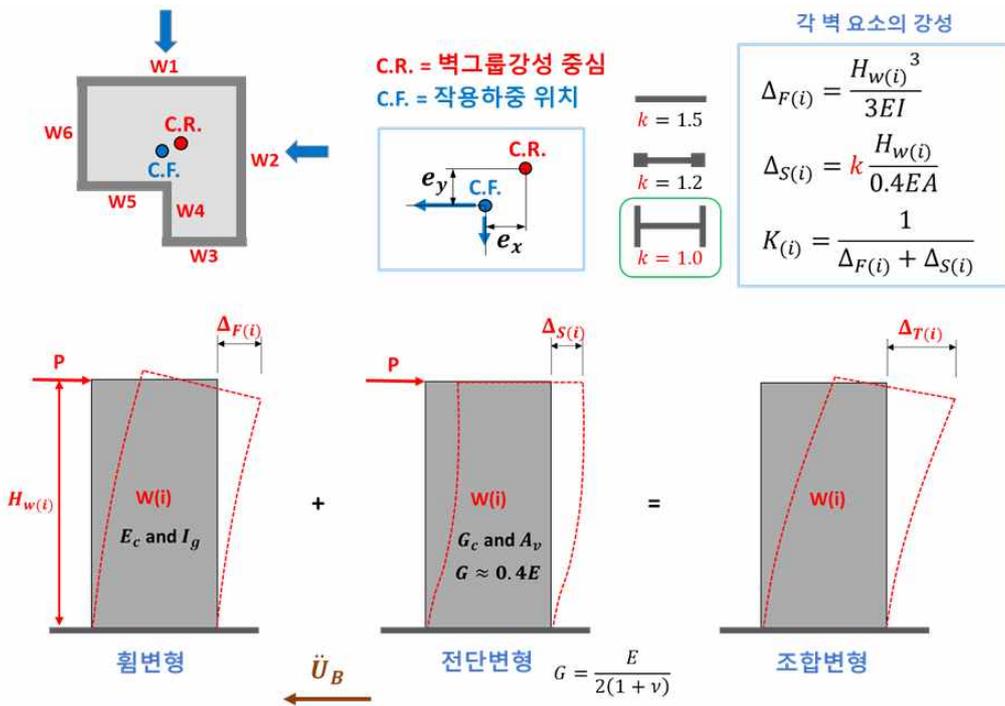


그림9-1. 전단벽 그룹의 각 벽 요소의 횡강성

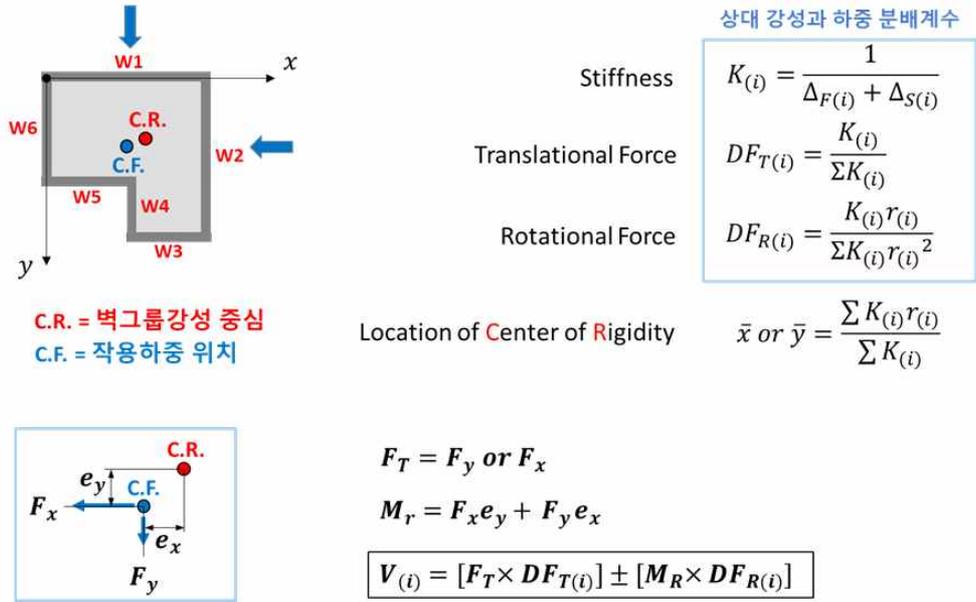


그림9-2. 전단벽 그룹의 상대강성과 하중분배계수

다음 표9.1과 같이 ConBasement의 횡력에 대한 각 지하 외벽요소의 전단력은 이론값과 비교할 때 매우 정확하게 분배된다. 반면에 국내에 널리 사용하고 있는 건축구조설계용 일반 범용해석프로그램은 최대 -11.25% ~ +9.45%의 오차범위를 갖고 있다. 이 비교분석 결과에 의하면 ConBasement의 횡력에 대한 해석방법은 타 프로그램에 비해 상대적으로 매우 높은 신뢰성을 갖고 있다고 볼 수 있다.

따라서 ConBasement는 평면상 비정형으로 배치된 지하외벽시스템에서도 신뢰성 있는 해석을 수행할 수 있다고 판단된다.

표9.1 횡력에 대한 지하외벽의 면내 전단력 분포 검증 결과

지하외벽 배치 형상		검증 기준 값 (Excel)	최대 오차 (%)	
			ConBasement	M사 범용해석프로그램
검증 1	원형	이론적 해석	+0.0038	+0.13
검증 2	정3각형	이론적 해석	±0.0	+0.10
검증 3	정8각형	이론적 해석	+0.09	+0.09
검증 4	별모양 다각형	이론적 해석	+0.0008	±7.48
검증 5	계단형(0도, 90도 배치)	이론적 해석	+0.0005	-11.25 ~ +9.45
전체 형상의 최대 오차 범위			±0.0% ~ +0.09%	-11.25% ~ +9.45%

이 표는 건축구조기술사회 웹사이트 기술장터에 소개한 “건축물의 지하구조 내진설계 프로그램 ConBasement에 대한 지하 외벽시스템의 면내 전단력 분포 분석과 검증(NEWTECH Report ConBasement-1, 2020.05.07.)”에서 발췌하였음.

ConBasement의 횡력해석에는 기본적으로 [부록 3]의 수식들을 사용하며, 전단벽 그룹 내에서 하중방향에 평행하지 않은 벽요소(skewed wall)의 각도영향을 고려할 수 있는 추가적인 수식을 사용하고, 벽 요소의 방향성(전체좌표계의 0도~360도)에 따른 +, -를 고려한다.

10. ConBasement의 지하외벽에 대한 설계 내용과 범위

ConBasement는 다음과 같이 면외 및 면내 하중작용에 대한 지하외벽 부재를 설계한다.

(1) 면외하중에 대한 지하외벽설계

면외하중에 대한 지하외벽설계에는 강도(휨 및 전단)설계와 상시하중에 대한 사용성(처짐 및 균열) 평가를 포함하고 있다.

- ① 부모멘트에 대한 외측 수직힘인장철근의 배근은 부모멘트의 분포형상을 고려한다.
- ② 부모멘트에 대한 외측 수직힘인장철근의 cut off길이는 콘크리트기준에 따라서 변곡점의 위치를 고려하여 산정한다.
- ③ 전단검토는 콘크리트구조기준의 위험 전단면에서부터 시작하고, 전단력 크기에 따라서 필요시 전단링크 철근을 산정하고, 각 전단철근보강 범위를 구분한다.
- ④ 균열에 대한 해석과 검토는 균열모멘트와 철근배근상태를 고려한 균열 상태를 구분하여 균열 폭을 산정하고 평가한다.
- ⑤ 처짐에 대한 해석과 검토는 균열모멘트와 철근배근상태를 고려한 유효단면2차모멘트에 의해 즉시 처짐과 장기 처짐을 산정하고 평가한다.

구체적인 내용은 그림1-2(ConBasement의 주요 설계흐름도)와 뒤에 첨부한 '[부록 4] ConBasement에 의한 지하구조의 내진설계 실행 예'에 있는 관련내용을 참조한다.

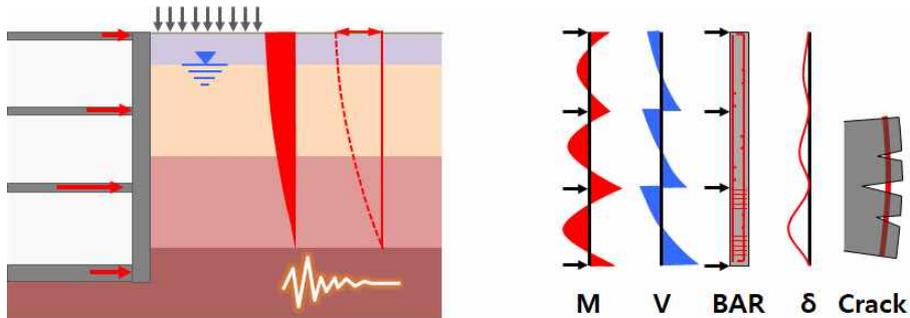


그림10-1. 면외 하중작용에 대한 지하외벽의 해석과 설계

(2) 지하외벽그룹의 전단벽시스템에 대한 설계

면내하중에 대한 지하외벽설계에는 강도(전단)설계와 지하층구조시스템에 대한 층 횡변위를 산정한다. 층 횡변위에 대한 내용은 9장에 있는 '(2) 면내작용하중에 대한 구조해석'과 그림10-2(b)를 참고하기 바란다.

• 강도설계

일반적으로 지하외벽(그림10-2(a) 참조)은 지상구조의 전단벽시스템과는 달리 평면적으로 길게 연속된 폐쇄형 전단벽이고, 대부분 h_w (벽높이)/ l_w (벽길이) ≤ 1.0 인 squat wall에 해당하므로 지하외벽의 전단벽 파괴 모드는 전단파괴모드(대각선 인장, 대각선 압축, 밀면 슬라이딩 중 1가지 이상)이다. 즉 높이/길이비가 낮은 squat wall의 강도는 휨보다는 전단에 의해 결정되므로 면내하중에 대한 지하외벽의 철근은 면내 전단력에 대해 설계한다. 결국 squat wall의 강도는 반복되는 수직철근의 인장과 콘크리트의 경사압축에 의해 결정된다(그림10-3(a)참조). Squat wall의 소요설계전단력에 상응하는 소요설계휨모멘트에 대한 지하외벽의 면내 설계휨강도(그림10-2(d) 참조)는 그림10-2(a)와 같이 벽의 평면적 배치형상, 길이 및 수직철근량(웹 및 플랜지)을 고려할 때 매우 크다. 그러나 지하외벽처럼 낮은 높이/길이 비의 squat wall에서는 전단파괴 거동이 선행되므로 휨강도(휨인장철근)에 대한 검토가 필요 없다. 따라서 ConBasement의 횡력저항시스템에 대한 지하외벽 부재설계(철근배근)는 전단력만 고려한다.

Squat wall의 파괴모드 양상을 설명하기 위하여 그림10-3에 Strut-Tie Model로 나타냈었다.

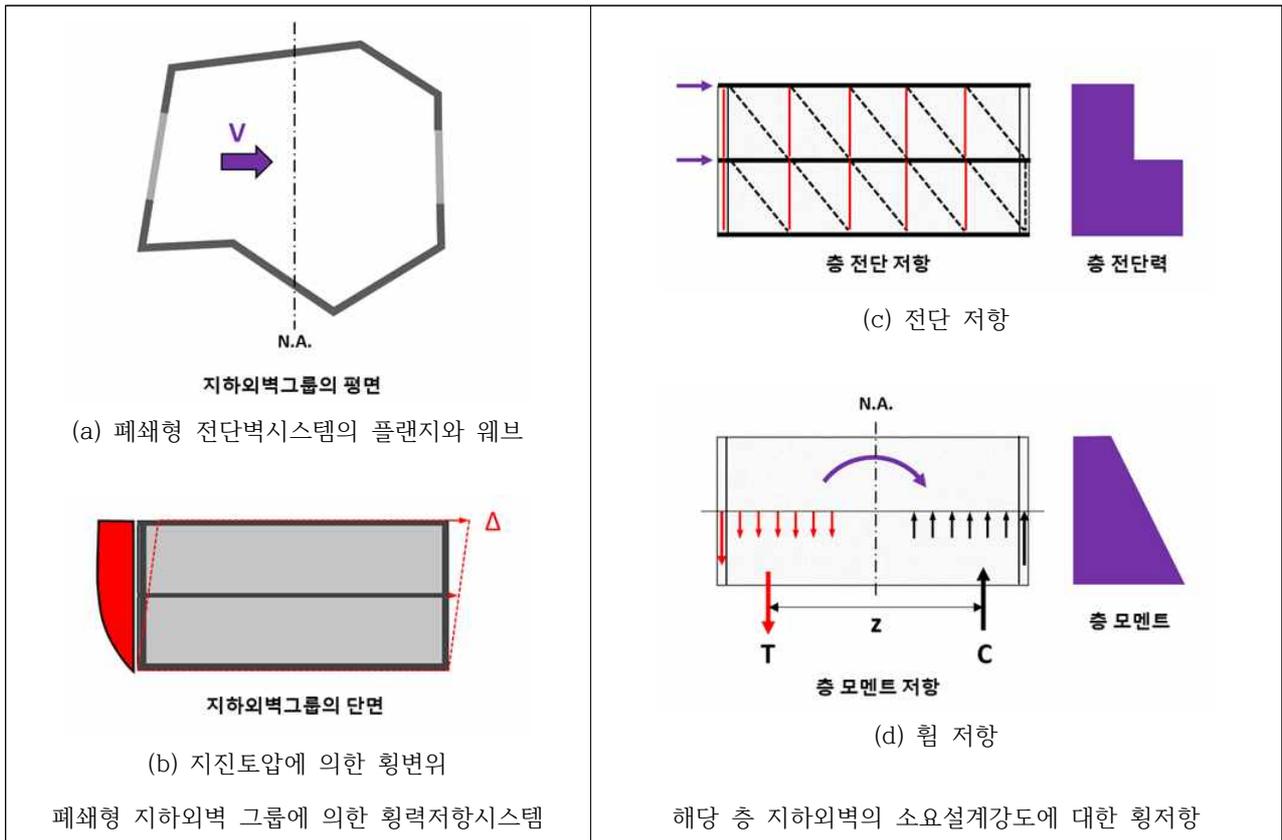


그림10-2. 횡력저항시스템 지하외벽의 횡변위(지진토압)와 횡하중에 대한 저항

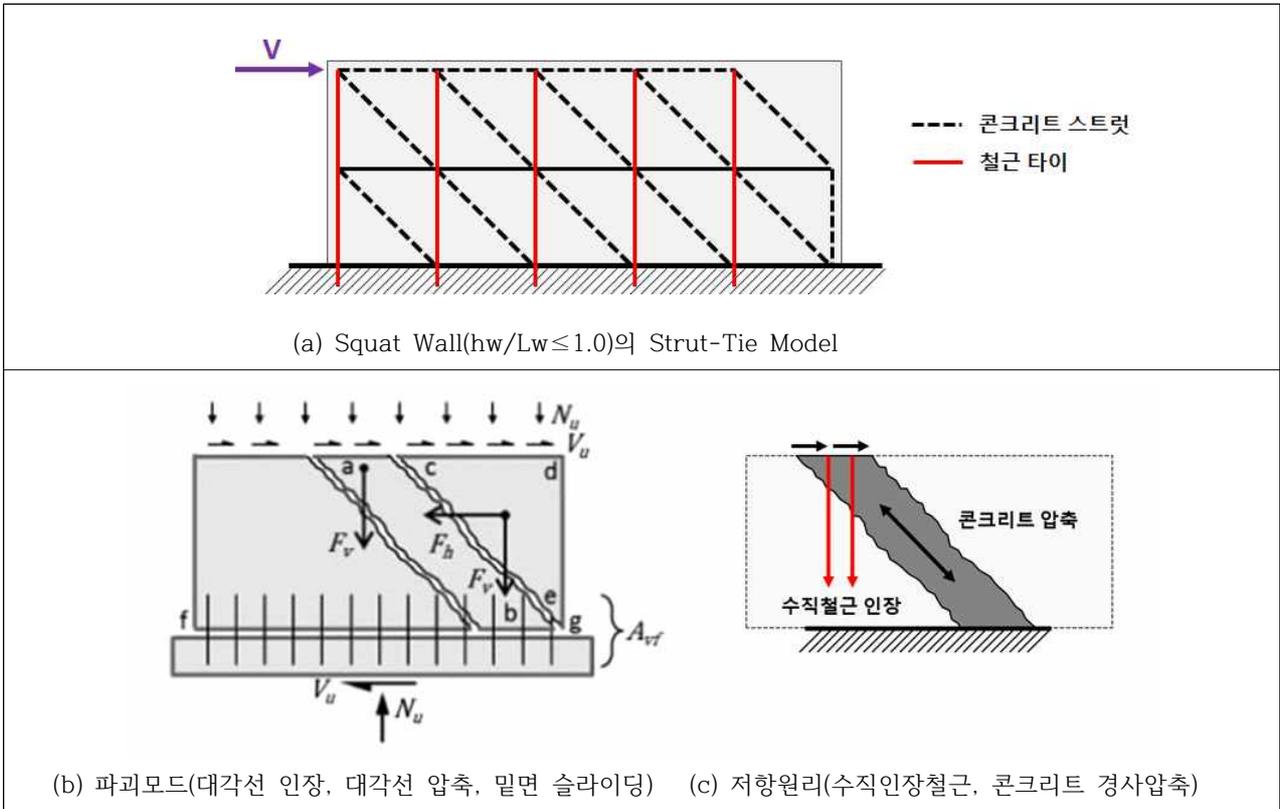


그림10-3. Squat Wall($h_w/L_w \leq 1.0$)의 횡력에 대한 파괴모드와 저항원리

• 면외 및 면내 하중에 대한 소요강도를 독립적으로 모두 만족하는 부재설계

각 하중 방향(전체좌표계의 X 및 Y 방향)에 대한 부재설계에서 외벽이 면내하중과 면외하중에 대한 소요 설계강도가 기준에서 제한하고 있는 최대 설계강도를 초과하지 않는 두께를 가진 경우에는 면외하중에 대한 소요철근배근과 면내하중에 대한 소요철근배근을 독립적으로 모두 만족하는 철근배근을 결정한다.

- ① 수직철근 : 면내하중에 대한 소요수직철근량이 면외하중에 대한 소요수직철근량 보다 많이 요구될 경우에는 내부 수직철근량을 증가시킨다(더 큰 직경으로 변경). 외부 수직철근은 필요에 따라 상하 다른 직경의 철근을 적용할 경우도 있어 내부수직철근을 조정한다.
- ② 수평철근 : 면내 소요설계전단강도에 적합한 수평철근량(직경, 간격)을 결정한다.

구체적인 내용은 그림1.2(ConBasement의 주요 설계흐름도)와 뒤에 첨부한 '[부록 4] ConBasement에 의한 지하구조의 내진설계 실행 예'에 있는 관련내용을 참조한다.

낮은 높이/길이 비를 갖는 Squat Wall의 거동과 공칭전단강도

다음 내용은 참고 문헌 ‘Seismic Response of Low Aspect Ratio Reinforced Concrete Walls, 2018’로부터 관심부분을 요약하여 발췌한 것이다. 현재의 ConBasement의 공칭전단강도는 KDS 14 20 00 콘크리트구조설계기준에 따른다.

그림10-4는 경계요소가 없는 직사각형 단면의 squat wall($h_w/l_w = 0.33, 0.54$ 와 0.94)에 대한 실험결과로부터 균열 양상을 3부분(segment A, B, C)으로 구분하여 이상화한 것이다(이하 참고 문헌 참조).

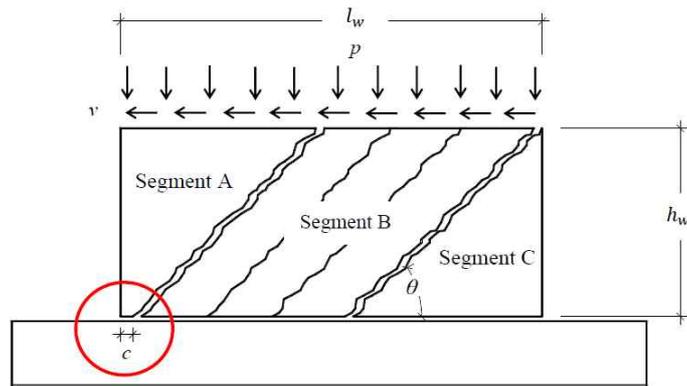
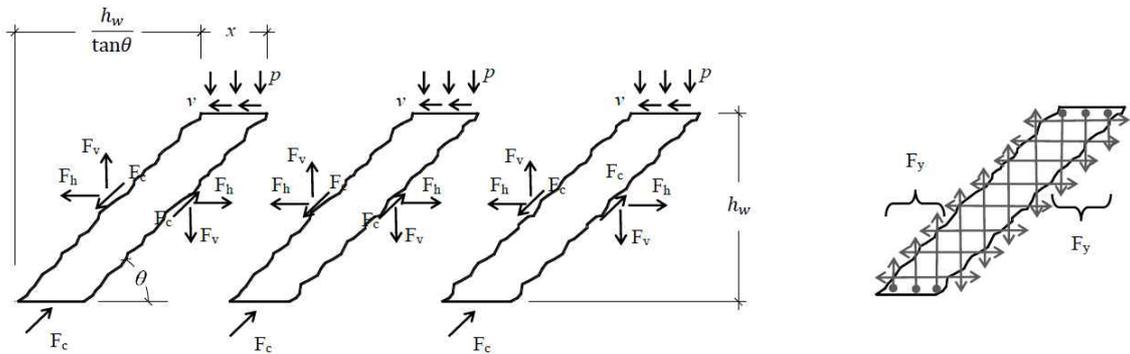


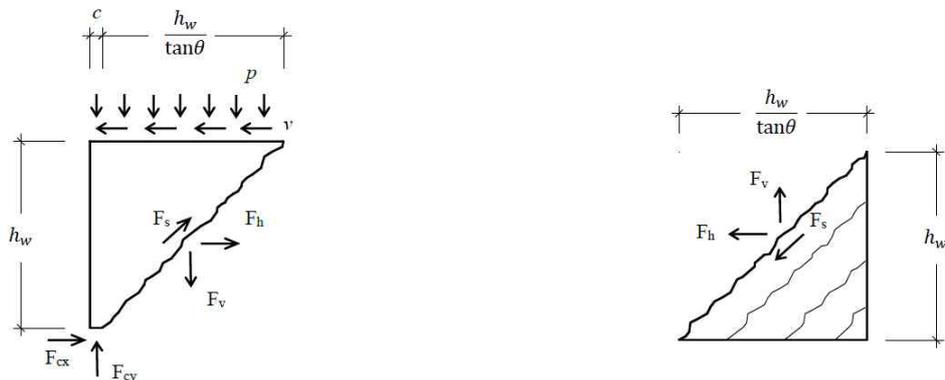
그림10-4 경계소요가 없는 Squat Wall($h_w/L_w \leq 0.94$)의 균열 양상



(a) 콘크리트 압축 스트럿에 작용하는 힘

(b) 철근에 작용하는 힘

그림10-5 경계요소가 없는 전단벽의 segment B에 대한 자유물체도



(a) Segment A

(b) Segment C

그림10-6 경계요소가 없는 전단벽의 segment A와 C에 대한 자유물체도

그림10-5에 있는 Segment B의 자유 물체도에서 각 작용력 F_v 와 F_h 는 경사 균열을 가로지르는 수직 및 수평 철근에 의해 전달되는 총 힘이다. 작용력 F_s 는 골재의 맞물림과 관련된 힘(마찰저항력)이다. x 는 스트럿 폭의 수평 길이이다. 그림10-6에 있는 Segment A의 자유 물체도에서 각 작용력 F_{cy} 와 F_{cx} 는 segment A의 밑면에 작용하는 수직 압축력과 수평 전단력이다.

총 공칭전단강도는 다음과 같이 각 Segment의 공칭전단강도의 합으로 한다. 건축물의 지하외벽처럼 긴 벽의 전단강도는 Segment B 부분의 역할이 크다. 다음 공식들은 변형도 및 변형에 대한 측정에서 파생된 내부 힘 저항 메커니즘과 실험 시에 생성된 균열양상의 관찰을 기반으로 하여 만들어 졌다. 상세한 내용은 참고 문헌을 참고하기 바란다. 이 공식들은 ACI 318, ACI 349 및 ASCE 43의 개정을 위해 제안되었다.

• Segment B의 공칭전단강도

$$V_{nb} = v \left(l_w - \frac{h_w}{\tan\theta} - c \right) \\ = \rho_l t_w f_y \left(l_w - \frac{h_w}{\tan\theta} - c \right) \frac{1}{\tan\theta} + \dots + p \left(l_w - \frac{h_w}{\tan\theta} - c \right) \frac{1}{\tan\theta} + F_s \left(l_w - \frac{h_w}{\tan\theta} - c \right) \frac{\sin\theta}{h_w}$$

마찰저항력을 무시하는 경우의 전단강도는 다음 식과 같다.

$$V_{nb} = (\rho_l t_w f_y + p) \left(l_w - \frac{h_w}{\tan\theta} - c \right) \frac{1}{\tan\theta}$$

• Segment A의 공칭전단강도

$$V_{na} = \mu \left[(\rho_l t_w f_y + p) \left(\frac{h_w}{\tan\theta} \right) + pc \right]$$

• Segment C의 공칭전단강도

$$V_{nc} = \rho_t h_w t_w (0.25 f_y)$$

• 총 공칭전단강도(Segment A + B + C의 공칭전단강도)

$$V_{na} = \mu \left[(\rho_l t_w f_y + p) \left(\frac{h_w}{\tan\theta} \right) + pc \right] + \dots + (\rho_l t_w f_y + p) \left(l_w - \frac{h_w}{\tan\theta} - c \right) \frac{1}{\tan\theta} + \dots + 0.25 \rho_t h_w t_w f_y$$

여기서, $f_y = 0.25 f_y$, 수직철근의 응력

$$c = \frac{(\rho_l t_w f_y + p) \left(\frac{h_w}{\tan\theta} \right)}{f_c t_w + p}$$

$$\theta = 40^\circ$$

[참고문헌]

- Seismic Response of **Low Aspect Ratio** Reinforced Concrete Walls, Technical Report MCEER-18-0002, 2018, Bismarck N. Luna, Jonathan P. Rivera, Siamak Epackachi and Andrew S. Whittaker
- Hybrid Simulation of the Seismic Response of **Squat** Reinforced Concrete Shear Walls
Catherine A. Whyte, Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Berkeley
Bozidar Stojadinovic, Department of Civil, Environmental, and Geomatic Engineering Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich
- Seismic behavior of lightly reinforced concrete **squat** shear walls
Christian Greifenhagen (Dipl.-Ing., Civil Engineering)
- Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Special Structural Walls and Coupling Beams - A Guide for Practical Engineers, HEHRP Seismic Design Technical Brief No. 6, NIST

11. 지하층의 영향을 고려한 지상구조 내진설계용 지반증폭계수

ConBasement는 지침 3.3(1)의 조건을 모두 만족하면 지침 3.3(2)에 따라서 지하층의 영향을 고려하여 지상구조의 내진설계용 지반증폭계수를 산정하고, 단주기과 1초주기 설계응답스펙트럼가속도(S_{DS} , S_{D1}) 그래프를 작성한다. 또한, ConBasement는 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위(c)를 산정할 수 있어, 1차 해석결과인 c 값을 2차 해석모델에 입력하여 다시 해석을 수행하면 c 값이 고려된 유효지반증폭계수를 결정할 수 있다.

지침 3.3(2)에서 반응수정계수($R=3$)가 적용되지 않은 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위를 c 로 정의하고 있으나, 건축구조기준의 ‘지하구조물의 지진력저항시스템’의 규정과 지침 2.3(2)에 따라서 반응수정계수($R=3$)를 적용하고 변위증폭계수($C_d=2.5$)를 곱한 횡변위로 정의할 수 있다. 따라서 ConBasement는 지침 2.3(2) 따른 방법으로 c 를 정의한다.

지침 3.3 지하층의 영향

(1) 다음의 조건을 모두 만족하는 경우, 지하층의 영향을 고려하여 각 지반조사 위치에서의 지반증폭계수를 조정할 수 있다.

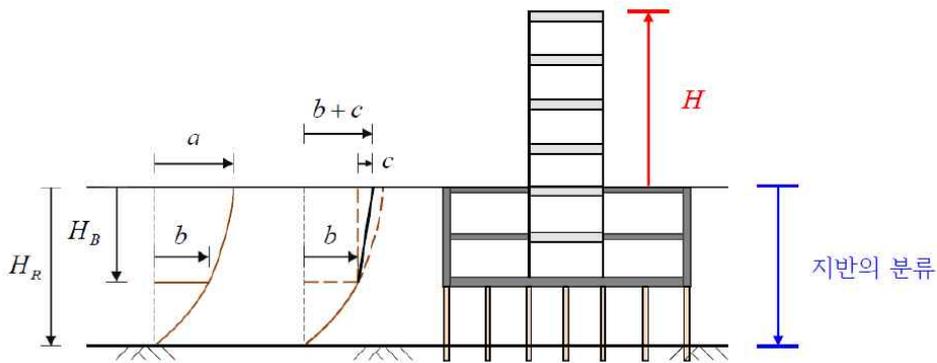
- 지하구조물이 지진토압에 대하여 안전하게 설계되어 있는 경우.
- 지반종류가 S_1 , S_2 , S_4 (전단파속도가 260m/s 이상)이고, 지진토압과 지진하중이 기초저면의 지반에 직접 전달될 수 있도록 기초저면에 견고하게 정착되어 있는 경우.

(2) 6장 응답변위법에 의하여 계산되는 지표면에서의 자유장 지반의 횡변위를 a 로 정의하고, 지하구조 바닥에서의 지반의 횡변위를 b , 반응수정계수가 적용되지 않은 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위를 c 로 정의하면, KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준에서 정의하는 지반분류에 따른 지반증폭계수 F 는 다음과 같이 조정할 수 있다.

$$\text{유효지반증폭계수 } F_{eff} = F_{rock} + (F_{soil} - F_{rock}) \frac{(b+c)}{a} \quad (3-1)$$

(3) 지하구조물의 강성이 매우 큰 경우에는 식 (3-1)에서 근사적으로 $c \approx 0$ 을 사용할 수 있다.

[해설]



지침 해설그림 3-2. 지반운동에 대한 지하층의 영향 (청주대학교, 김동관 교수 강의자료 그림)

- a = 지표면에서 지반의 횡변위(횡이동)
- b = 지하구조바닥에서 지반의 횡변위(횡이동)
- c = 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위(층 횡변위)
- $b+c$ = 유효지반계수 산정을 위한 지진시 지하구조물의 총 횡변위(횡이동+층횡변위)

12. 일반 범용건축구조 해석/설계프로그램에 의한 설계에 ConBasement의 활용

A. 일반 범용건축구조 해석/설계프로그램에 의한 설계절차

일반 범용건축구조해석/설계프로그램을 이용한 지하구조 지진력저항시스템(즉, 지하외벽그룹의 전단벽시스템)의 설계는 층횡력에 대한 구조해석과 전단벽으로서의 지하외벽 설계에 국한된다. ConBasement의 주요 설계흐름도(그림1-2)에서 E 부분에 해당된다.

직접해석법이 아닌 지진응답변위법에 의한 정적지진토압을 적용할 경우에는 다음과 같은 절차에 따라 설계할 수 있다.

A1. 지반의 분석 및 동적특성

ConBasement의 주요 설계흐름도(그림1-2)에서 B의 왼쪽 부분에 해당된다. 일반 범용건축구조해석/설계프로그램에서 다음의 ①~⑧에 대한 분석-해석-산정을 직접 수행할 수 없다. 따라서 별도의 독립된 프로그램이나 계산에 의해 수행하여야 한다.

- ① 지반종류 분석 ② 지반 고유 진동수/주기 산정 ③ 지반유효증폭계수 산정 ④ 설계응답스펙트럼
 ⑤ 지반 가속도/속도 ⑥ 내진설계범주 ⑦ 수평지반반력계수 ⑧ 지반수평변위

A2. 구조요소와 지지부의 강성모델

ConBasement의 주요 설계흐름도(그림1-2)에서 B의 오른쪽 부분에 해당된다.

일반 범용건축구조해석/설계프로그램의 해석모델에는 다음 사항들을 반영할 수 있다.

(1) 구조요소

지하 외벽, 기둥, 보, 지상부의 전단벽이 기초까지 연장된 지하연장 전단벽 등의 주요요소를 포함시킬 수 있다.

근사해석모델 : 기본적으로 지하외벽 및 1층 바닥 다이아프램을 포함시키고, 바닥 다이아프램은 강체로 가정한다.

정밀해석모델 : 기본적으로 지하외벽, 각층 바닥 다이아프램 및 지하연장 전단벽을 포함시키고, 바닥 다이아프램은 유효강성을 고려할 수 있도록 요소를 분할하고 개구부를 고려한다. 또한, 보다 합리적인 설계를 위하여 각 구조요소의 유효강성을 고려할 수 있다.

(2) 기초 밑면

근사해석모델 : 지하외벽의 기초는 면내하중작용에 대하여 회전을 구속하는 지지부로 한다.

정밀해석모델 : 지상부의 전단벽 요소가 지하기초까지 연장된 모델에서는 면내하중작용에 대한 기초회전강성(수직압축스프링)을 고려한다.

(3) 횡구속 및 횡지지

기반암에 묻힌 층은 횡구속조건을 적용할 수 있다.

주의사항: 직접해석법을 사용하지 않는 경우에는 지반 변위와 구조 변위를 동시에 고려할 수 없으므로 해석모델에서 뒷부분 지반/벽에 횡스프링지지부를 포함시키지 않아야 한다.

A3. 하중산정

ConBasement의 주요 설계흐름도(그림1-2)에서 B와 C 부분에 해당되며, 일반 범용건축구조해석/설계프로그램에서 다음의 (1)~(3)에 대한 하중을 직접 산정할 수 없다. 따라서 별도의 독립된 프로그램이나 계산에 의해 산정한 하중을 사용하여야 한다.

다음과 같이 일반 범용건축구조해석/설계프로그램의 지하구조해석모델에 적용할 하중을 각층별로 구한다.

- (1) 별도의 독립된 프로그램이나 계산에 의해 지하외벽에 작용하는 정적횡토압(수압, 상재하중 포함)을 구한다.
- (2) 별도의 독립된 프로그램이나 계산에 의해 지하외벽에 작용하는 지진토압을 구한다.
- (3) 별도의 독립된 프로그램이나 계산에 의해 지반효과를 고려하여 지하구조물의 관성력에 의한 지진력을 구한다.
- (4) 일반 범용건축구조해석/설계프로그램의 구조해석모델로부터 지상층구조의 관성력에 의한 밀면 전단력과 전도모멘트를 구한다.

A4. 하중모델

ConBasement의 주요 설계흐름도(그림1-2)에서 B와 C 부분에 해당되며, 일반 범용건축구조해석/설계프로그램에서 다음의 (1)~(3)에 대한 하중을 직접 산정할 수 없다.

(1) 정적횡토압(수압, 상재하중 포함)

정적 횡토압은 앞벽과 추가 고려시 조건에 따라서 뒷벽에 작용한다.

각층에 슬래브 반력(kN/m)과 수평 분담폭(m)에 의한 합력(kN)을 구하여 합력의 위치에 작용하도록 입력한다. 또는 슬래브반력(kN/m)을 수평 분담폭(m)에 등분포하중(kN/m)으로 작용하도록 입력한다.

주의사항: 수직 분담높이에 의한 합력은 작용하중의 크기나 위치가 정확하게 반영되지 않으므로 슬래브 반력의 크기로 입력하여야 한다.

(2) 지진횡토압

지진 횡토압은 앞벽과 스프링지력 추가 고려시 조건에 따라서 뒷벽에 작용한다.

각층에 슬래브 반력(kN/m)과 수평 분담폭(m)에 의한 합력(kN)을 구하여 합력의 위치에 작용하도록 입력한다. 또는 슬래브반력(kN/m)을 수평 분담폭(m)에 등분포하중(kN/m)으로 작용하도록 입력한다.

주의사항: 수직 분담높이에 의한 합력은 작용하중의 크기나 위치가 정확하게 반영되지 않으므로 슬래브 반력의 크기로 입력하여야 한다.

(3) 지하구조물 자체관성력에 의한 지진력

각층에 지반효과를 고려한 지진력을 합력의 위치에 작용하도록 입력한다.

(4) 지상층구조의 관성력에 의한 밀면 전단력과 전도모멘트

밀면 전단력은 1층의 작용점 위치에 작용하도록 입력한다. 밀면 전도모멘트는 가상의 지하전단벽에 작용하는 반전 전단력을 구하여 작용점 위치에 지진하중방향으로 작용하도록 입력하거나, 지하 전단벽요소를 구조해석모델에 포함시키고 이 전단벽의 상부(1층)에 전도모멘트를 입력한다.

A5. 면내하중작용에 대한 지하외벽 설계

ConBasement의 주요 설계흐름도(그림1-2)에서 E 부분에 해당되며, 일반 범용건축구조해석/설계프로그램에 포함된 전단벽설계모듈에 의해 설계할 수 있다.

(1) 강도설계

일반 범용건축구조해석/설계프로그램에 포함된 전단벽설계모듈에 의해 소요설계강도를 만족하도록 지하외벽을 설계한다.

유의사항: Squat Wall의 거동에 따른 설계방법을 적용할 수 없다. 즉, 연속된 길이효과를 고려하지 않은 분할 요소별 면내 휨모멘트도 포함되어 과도한 휨인장철근량(수직 철근)이 요구될 수 있다.

(2) 수평변위

지진토압에 의한 수평변위를 구하여, 지상구조의 내진설계용 유효지반증폭계수를 산정한다.

A6. 면외하중작용에 대한 지하외벽 설계

ConBasement의 주요 설계흐름도(그림1-2)에서 D 부분에 해당되며, 일반 범용건축구조해석/설계프로그램으로 직접 수행할 수 없다. 따라서 면외하중작용에 대한 지하외벽설계는 별도 독립된 프로그램이나 계산에 의해 수행하여야 한다.

(1) 강도설계

소요설계휨강도 및 소요설계전단강도를 만족하도록 지하외벽을 설계한다.

(2) 사용성설계

기준의 설계원칙의 요구사항에 따라서 상시하중 즉, 정지토압에 대한 처짐 및 균열 평가를 한다.

지반에 접한 지하외벽 면의 균열은 내구성에 관련되므로 기준을 만족하도록 설계한다.

지하외벽의 처짐은 사용성 평가뿐만 아니라 인접지반의 침하를 유발하므로 반드시 검토할 필요가 있다.

A7. 최종 지하외벽 설계

ConBasement의 주요 설계흐름도(그림1-2)에서 F 부분에 해당되며, 일반 범용건축구조해석/설계프로그램으로 수행할 수 없다.

면내 및 면외 하중작용에 대한 소요설계강도를 독립적으로 모두 만족할 수 있도록 지하외벽을 최종적으로 설계한다. 즉, 두 하중작용에 대한 상호작용은 고려하지 않는다.

B. 일반 범용건축구조해석/설계프로그램에 의한 설계에 ConBasement의 활용

ConBasement는 일반 범용건축구조해석/설계프로그램처럼 복잡한 지하구조의 요소들을 상세하게 모사할 수 없다. 예를 들면, 바닥구조의 개구부와 유효강성, 코어전단벽기초의 밑면 회전강성, 지하 기준층과 다른 지하층의 평면형상, 부재의 축력에 대한 해석과 단면설계 등이 포함된다. 반면에 ConBasement는 일반 범용건축구조해석/설계프로그램이 수행할 수 없는 부분들을 수행할 수 있다. 따라서 복잡한 지하구조의 설계에 일반 범용건축구조해석/설계프로그램을 사용할 경우, 다음과 같이 ConBasement의 해석 및 설계 결과를 활용하면 설계 시간이 절약되고, 정확한 하중을 입력할 수 있다.

B1. 지반분석

ConBasement에 의한 지반분석결과 활용

B2. 면외하중작용에 대한 지하외벽 설계

면외하중작용에 의한 소요설계강도에 만족하는 지하외벽두께 및 철근배근을 확인하여 가정 단면을 결정하여 입력한다.

(1) ConBasement에 의한 지하외벽 설계결과 활용

(2) ConWall에 의한 수직 일방향 지하외벽 설계결과 활용

(3) ConWall에 의한 Buttress 및 수평 일방향 지하외벽 설계결과 활용

B3. 층휨력

ConBasement의 해석결과인 슬래브 반력(그림12-1)과 지하층 관성력(그림12.2)을 일반 범용건축구조해석/설계프로그램의 해석모델에 층휨력(그림12-3) 입력하중으로 활용

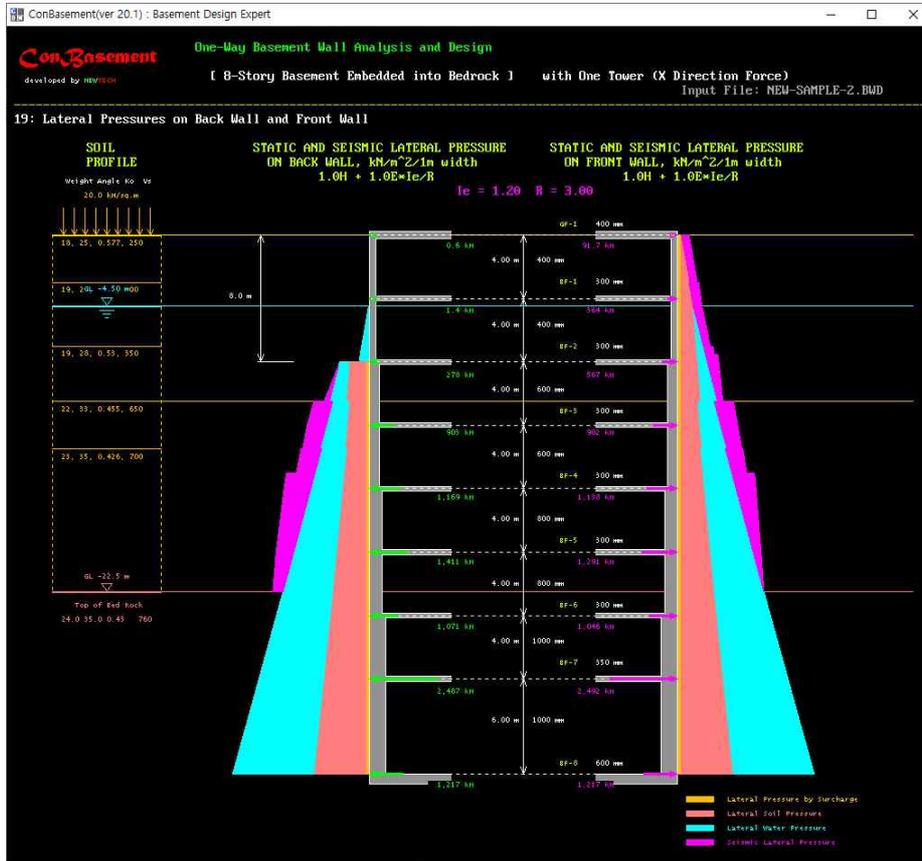


그림12-1. ConBasement에 의한 해석결과 슬래브 반력

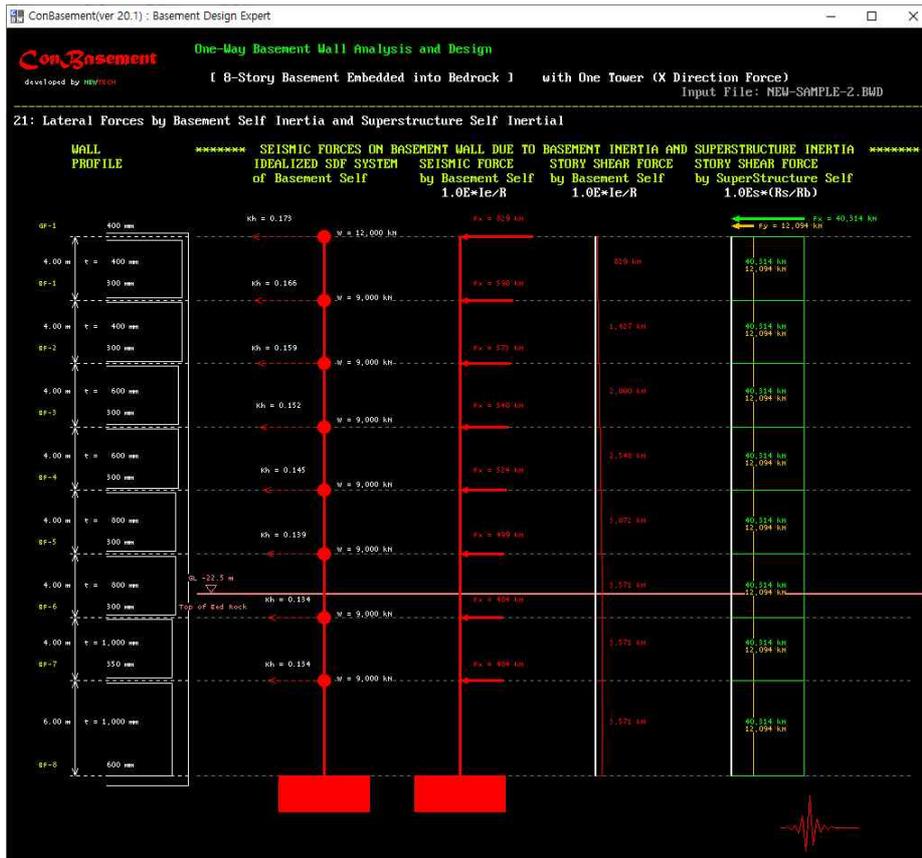


그림12-2. ConBasement에 의한 해석결과 지하층 관성력

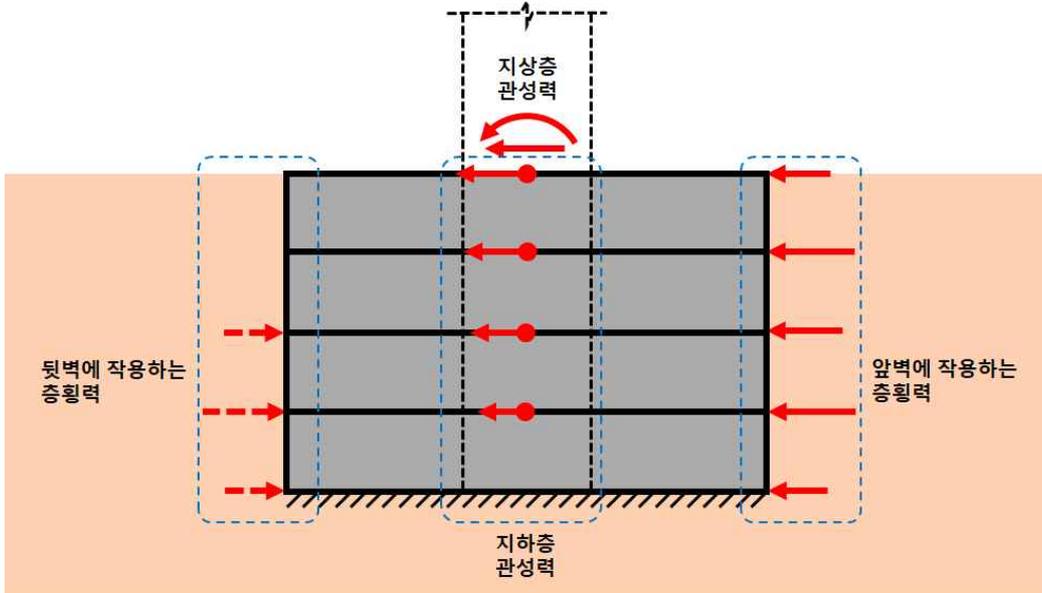


그림12-3. 일반 범용건축구조해석/설계프로그램에 의한 지하 지진력저항시스템 해석모델의 총횡력

그림12-3에서 앞벽에 작용하는 총횡력(지진하중방향)은 앞벽에 작용하는 정적수압, 정적토압 및 지진토압을 슬래브 위치에서의 집중하중(슬래브 반력)으로 산정한 횡하중이다. 그림12-3에서 뒷벽에 작용하는 총횡력(지진하중 반대방향)은 지침 2.5(3)의 규정에 따라 지진토압작용의 반대편에 위치한 외벽면에 추가로 고려할 수 있는 정적수압, 정적토압 및 횡스프링지지력을 슬래브 위치에서의 집중하중(슬래브 반력)으로 산정한 횡하중이다. ConBasement는 사용자의 선택에 따라서 추가로 고려할 수 있는 횡하중을 슬래브 위치에서의 집중하중(슬래브 반력)으로 산정하여 지하 지진력저항시스템의 횡력해석에 적용한다.

ConBasement는 이 횡하중들은 하중종류별로 구분하여 계산서에 제공한다. ConBasement의 이 하중해석 결과들(그림12-1참고)을 일반 범용건축구조해석/설계프로그램의 해석모델에 총횡력(그림12-3)에 대한 입력 하중으로 활용할 수 있다.

지침 2.5 지진해석 및 내진설계 방법

(3) 지진토압작용의 반대쪽에 위치한 외벽면에는 다음과 같은 사항을 추가로 고려할 수 있다.

- ① 지진토압작용의 반대면에 정적수압을 고려할 수 있다.
- ② 지표면으로부터 깊이 8m (또는 비슷한 깊이의 지하층 슬래브) 위치의 아래에서는 정적토압과 지반의 횡스프링지지력을 고려할 수 있다.
- ③ 지표면에서 깊이 4m (또는 비슷한 깊이의 지하층 슬래브) 위치의 아래에서 지하구조의 횡변위가 지반의 상대변위(기초위치로부터 각 층 슬래브 위치에서의 변위)보다 큰 경우에는, 지하구조의 변위가 지반의 상대변위를 초과하지 않도록 지표면 깊이 4m (또는 비슷한 깊이의 지하층 슬래브) 아래에서는 지진토압작용의 반대면에 정적토압의 일부 또는 지반의 횡스프링지지력을 고려할 수 있다.

ConBasement의 횡스프링지지력은 다음과 같이 $(u_{(z)} - u_{(zB)}) < u_{str(z)}$ 인 구간에서 발현되며, 지표면에서부터 4m 깊이까지의 횡스프링지지력은 적용하지 않는다.

$$(u_{(z)} - u_{(zB)}) \geq u_{str(z)} \text{인 구간, 횡하중} = \text{횡스프링지지력} = p_{(z)} = 0$$

$$(u_{(z)} - u_{(zB)}) < u_{str(z)} \text{인 구간, 횡하중} = \text{횡스프링지지력} = p_{(z)} = [(u_{(z)} - u_{(zB)}) - u_{str(z)}] K_{H(z)}$$

여기서, $u_{(z)}$ = 지반의 지진횡변위, $u_{(zB)}$ = 지하구조물 저면 지반의 지진횡변위, $u_{str(z)}$ = 지하구조물의 횡변위, $K_{H(z)}$ = 수평지반반력계수, z = 지표면으로부터 고려하는 깊이

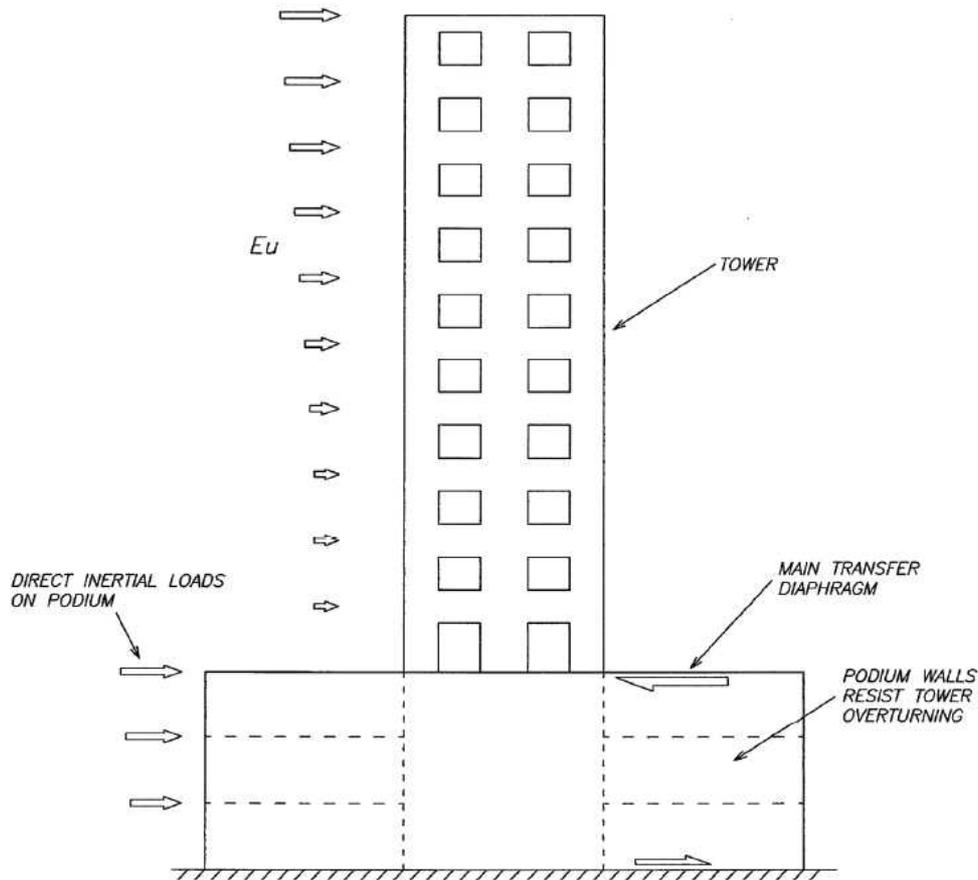
[부록 1] 지상구조물 밑면의 전단력과 전도모멘트가 지하구조에 미치는 영향

지하구조의 설계에 지상구조물 밑면의 전단력과 전도모멘트를 보다 합리적으로 고려할 경우에 참고할 수 있는 해석모델을 소개한다.

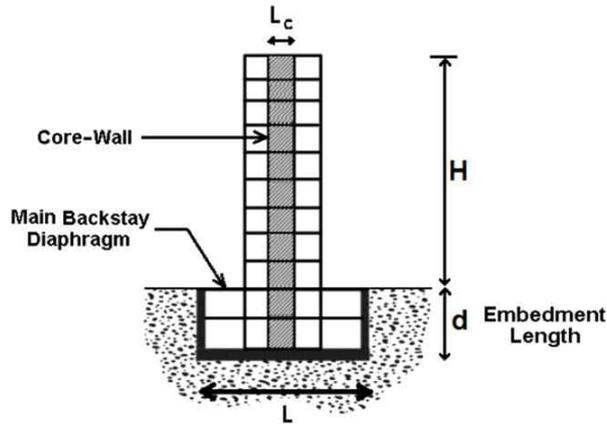
지상구조로부터 전달되는 지하외벽의 전단력은 Backstay 효과에 영향을 주는 지하구조시스템 구성요소의 강성에 따라 크게 다르다. Backstay 효과에 영향을 주는 지하구조시스템의 주요구성요소의 강성은 바닥 다이아프램의 강성, 지하외벽의 강성, 코어전단벽의 강성, 코어전단벽기초의 회전강성, 지하구조의 외벽에 관련된 지지 지반의 강성 등이 있다.

Backstay 효과에 영향을 주는 지하구조요소의 강성에 따라 지상구조 밑면의 전단력과 전도모멘트에 의해 발생하는 전단력에 관련된 해석모델을 다음과 같이 참고문헌으로부터 발취하고 관련요소들의 강성영향을 쉽게 이해할 수 있도록 그림과 그래프로 나타내었다.

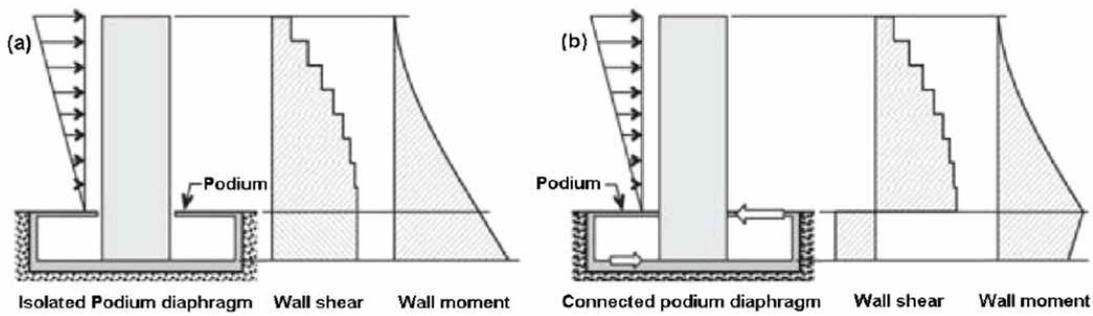
이 [부록-1]은 지상구조물 밑면의 전도모멘트가 지하구조물의 Backstay효과에 의해 지하외벽에 작용하는 전단력의 분포를 이해하기 위한 자료로 제공된 것이지만, 이 부록 내용처럼 Backstay효과에 기여하는 강성들을 현재의 ConBasement(Ver.20-1)에는 적용되지는 않았다. 추후 더 많은 연구를 통해 가능하면 이와 유사한 근사해석법을 개발하여 프로그램에 적용할 예정이다.



부록 그림1-1. 지상구조의 전도모멘트에 저항하는 지하구조의 지상 1층 바닥 다이아프램과 기초바닥의 짝힘과 지하외벽

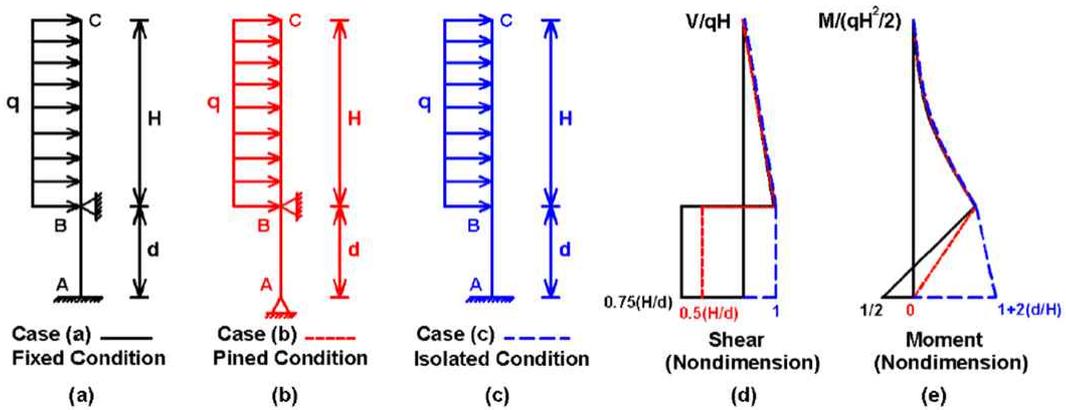


부록 그림1-2. Backstay 효과에 기여하는 주요 요소 (Karimi and Kheyroddin 2016)

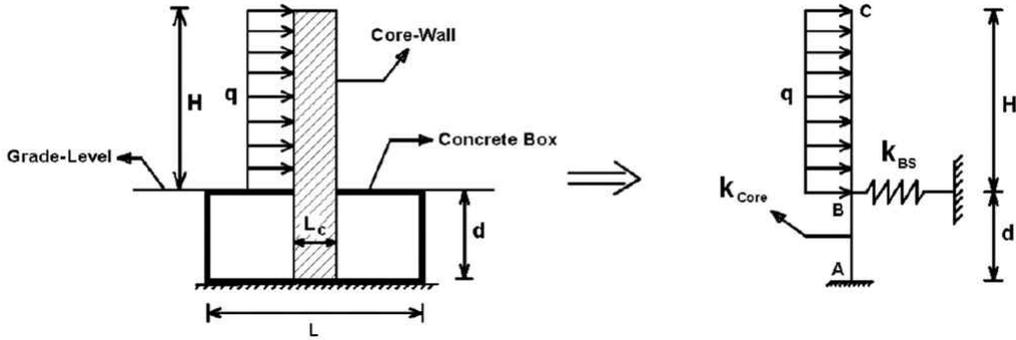


(a) 코어 벽과 바닥 다이아프램을 분리한 경우 (b) 코어 벽과 바닥 다이아프램을 연결한 경우

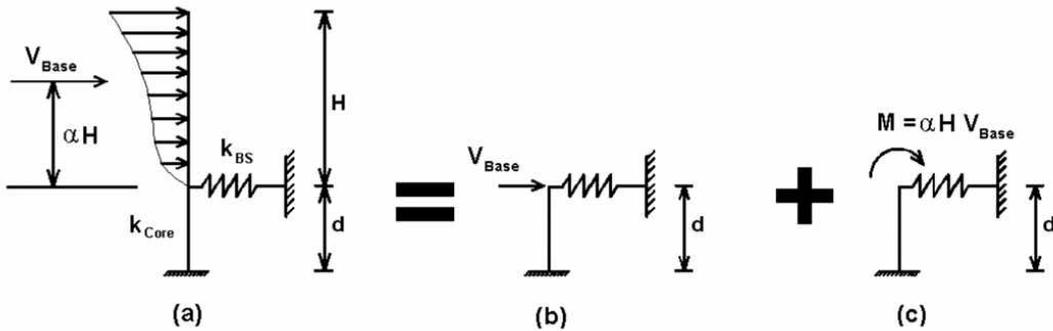
부록 그림1-3. Backstay 효과 (Moehle 2015)



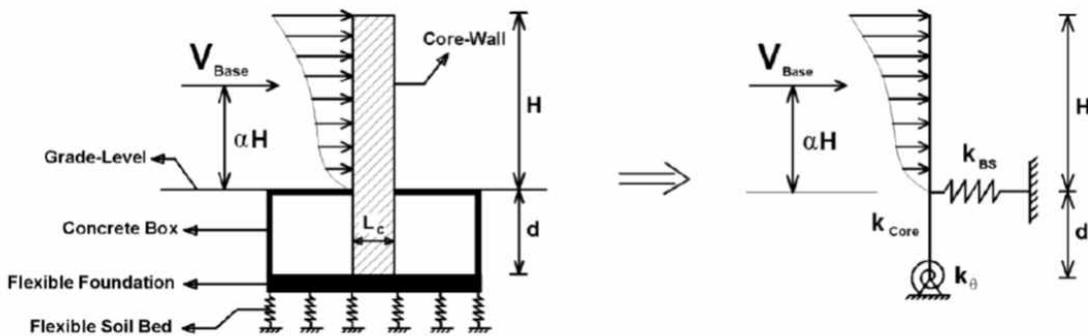
부록 그림1-4. 주요 지하구조요소의 강성들을 고려하여 일반화한 지하코어구조의 전단력 및 모멘트 분포 (Karimi and Kheyroddin 2016)



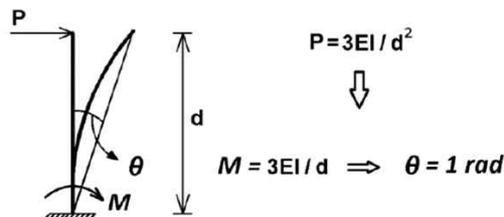
부록 그림1-5. Backstay 효과를 평가하기 위한 단순 모델 (Karimi and Kheyroddin 2016)



부록 그림1-6. 단순화한 Backstay 공식 모델, 코어기초의 회전강성 무한대 (Karimi and Kheyroddin 2016)



부록 그림1-7. Backstay효과에 기초강성을 고려하는 해석모델



부록 그림1-8. 코어기초의 회전강성을 고려한 코어강성 모델

코어의 휨강성과 바닥다이아프램/지하외벽의 강성만 고려한 Backstay효과에 의한 지하구조의 전단력 (Karimi and Kheyroddin 2016). 다음 식은 그림1-4(a), 그림1-5, 그림1-6과 관련됨.

$$\frac{F_{BS}}{V_{BASE}} = \frac{1 + 1.5\alpha\left(\frac{H}{d}\right)}{1 + \frac{K_{CORE}}{K_{BS}}} \quad \text{부록 식(1.1)}$$

지하구조요소의 강성들을 고려한 Backstay효과에 의한 지하구조의 전단력 (Mahdi Karrimi, Ali Kheyroddin and Hashem Shariatmadar 2019). 다음 식은 그림1-4(b), 그림1-7, 그림-8과 관련됨.

$$\frac{F_{BS}}{V_{BASE}} = \frac{1 + \frac{1.5 + \gamma}{1 + \beta + \gamma}\alpha\left(\frac{H}{d}\right)}{1 + \frac{K_{CORE}}{K_{BS}(1 + \beta + \gamma)}} \quad \text{부록 식(1.2)}$$

여기서,

d = 주 다이아프램 간의 거리(중간층의 바닥강성을 무시하고 Backstay효과가 현저하게 발현되는 1층 바닥과 기초바닥 간의 높이, TBI 참조)

α = 지상구조물에 작용하는 횡력(합력) 중심의 높이계수

αH = 지상구조물에 작용하는 횡력(합력) 중심의 높이

$V_{BASE} \alpha H$ = 지상구조물 밑면의 전도모멘트

F_{BS} = 지상구조물 밑면의 전단력과 전도모멘트에 대한 지하구조의 Backstay효과에 의해 지하외벽에 발생하는 전단력

V_{BASE} = 지상구조물 밑면전단력

K_{CORE} = 코어의 휨강성, $= 3EI/d^3$

K_{BS} = Backstay에 기여하는 바닥 다이아프램과 지하외벽의 조합 강성

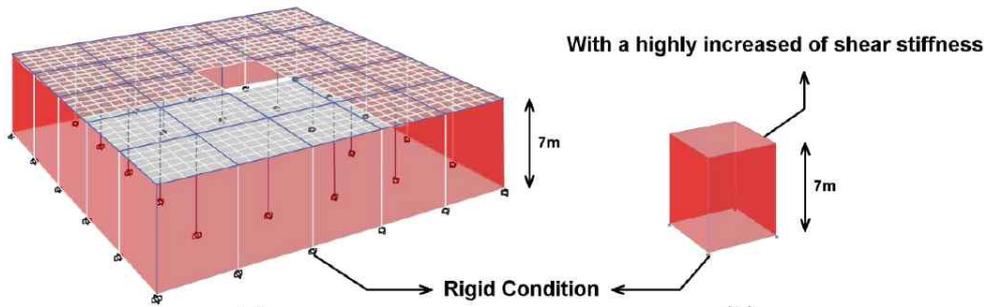
K_{θ} = 코어기초의 회전강성,

β = 코어의 전단강성을 고려하는 계수, $= 2.4(L_c/d)^2$

γ = 코어기초의 회전강성을 고려하는 계수, $= (3EI/d)/K_{\theta}$

기초의 회전강성을 고려한 개선된 식2의 신뢰성

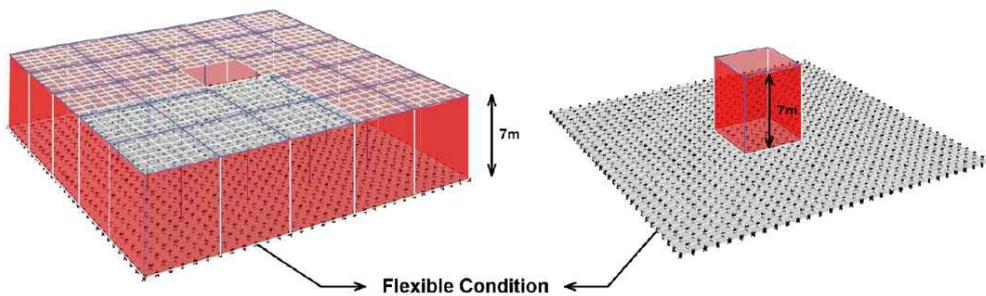
다음 부록 그림1-9와 그림1-10은 부록 식(1.2)를 제시한 연구자의 논문(Relationships for prediction of backstay effect in tall buildings with core-wall system (Mahdi Karrimi, Ali Kheyroddin and Hashem Shariatmadar 2019)’에서 발췌한 것으로, ETABS에 의한 지하 2층(2×3.5=7.0m)규모의 지하구조시스템에 대한 해석모델로 부록 식(1.2)의 신뢰성을 검증하기 위해 사용되었다. 각 해석모델에 중간층 바닥 다이어그램을 포함시키지 않았다.



(a) Concrete box(지하외벽)

(b) Core-wall

부록 그림1-9. 강체 기초인 경우 기초의 강성을 평가하기 위한 지하구조 해석모델



(a) Concrete box(지하외벽)

(b) Core-wall and Base

부록 그림1-10. 유연 기초인 경우 기초의 강성을 평가하기 위한 지하구조 해석모델

기초의 회전강성을 고려한 개선된 부록 식(1.2)를 제시한 연구자의 논문에 있는 ETABS에 의해 강성을 고려한 해석결과와 공식에 의한 결과의 비교는 다음과 같다. 다음 결과 값은 F_{BS}/V_{BASE} 를 나타낸다.

기초의 강성을 고정조건으로 한 모델: 식2/ETABS = 2.27/2.14 = 1.0607(약 6.07% 차이)

기초의 강성을 고려한 조건의 모델 : 식2/ETABS = 4.47/4.33 = 1.0323(약 3.23% 차이)

이 정도의 차이면 이 공식을 이용하여 지상구조물 밑면의 전단력과 전도모멘트에 의해 발생하는 지하구조의 전단력을 산정하는데 무리 없다고 판단된다. 다만 하한/상한을 고려한 각 요소의 강성에는 TBI의 권장 값을 고려할 필요가 있다. 이 또한 매우 번거로운 과정을 통하여 수행하여야 한다.

공식을 이용한 Backstay 효과

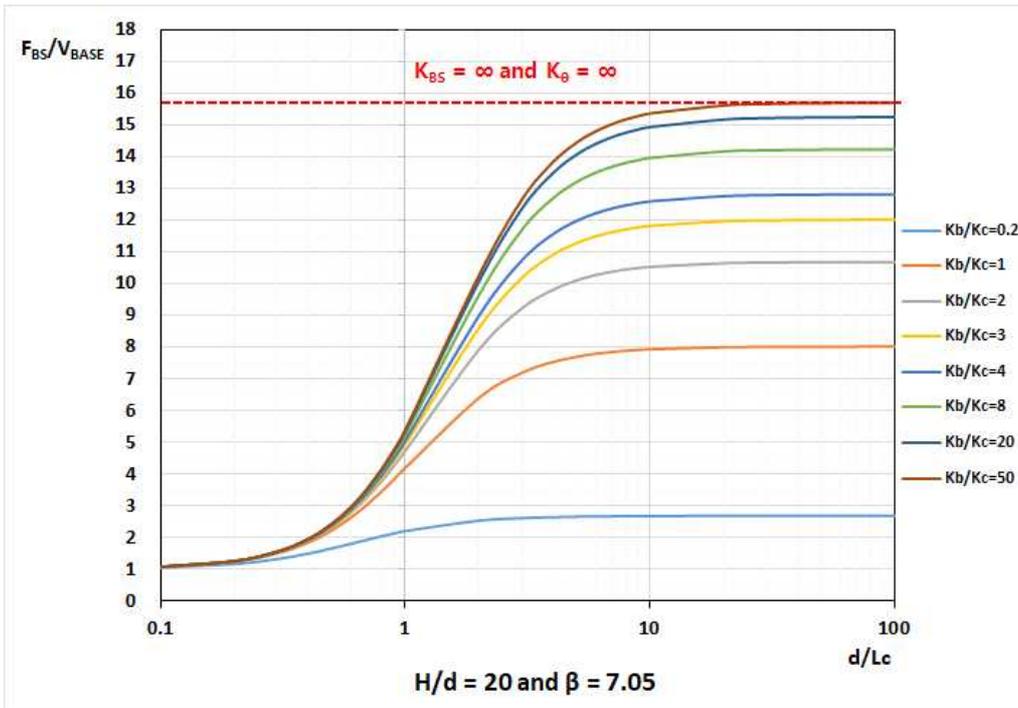
앞의 부록 식(1.1)과 식(1.2)를 이용하여 지하구조시스템의 각 요소의 강성변화에 따라 지하외벽에 발생하는 전단력(지하코어 전단벽의 반전 전단력)의 변화를 다음 그림에 그래프로 나타내었다.

부록 그림1-11 : $H/d = 20$, $\beta = 7.05$ 인 경우 코어기초의 회전강성을 무시하고 코어전단강성 및 K_{BS}/K_{CORE} 의 변화에 따른 전단력

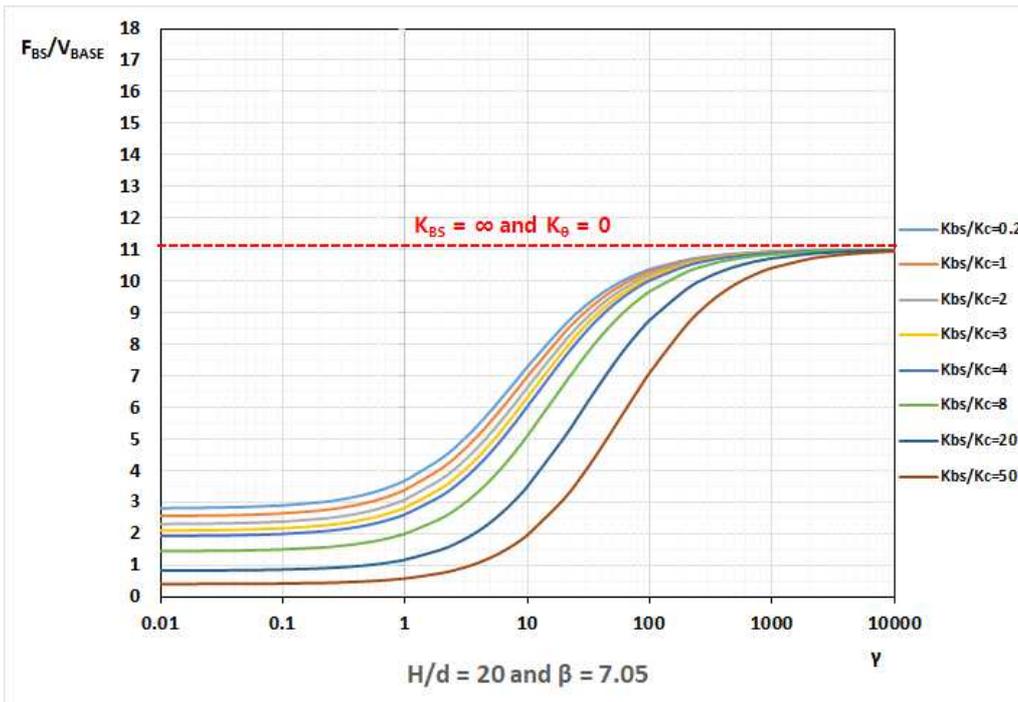
부록 그림1-12 : $H/d = 20$, $\beta = 7.05$ 인 경우 코어기초의 회전강성 및 K_{BS}/K_{CORE} 의 변화에 따른 전단력

부록 그림1-13 : $H/d = 20$, $K_{BS}/K_{CORE} = 10$ 인 경우 코어기초의 회전강성 및 β 의 변화에 따른 전단력

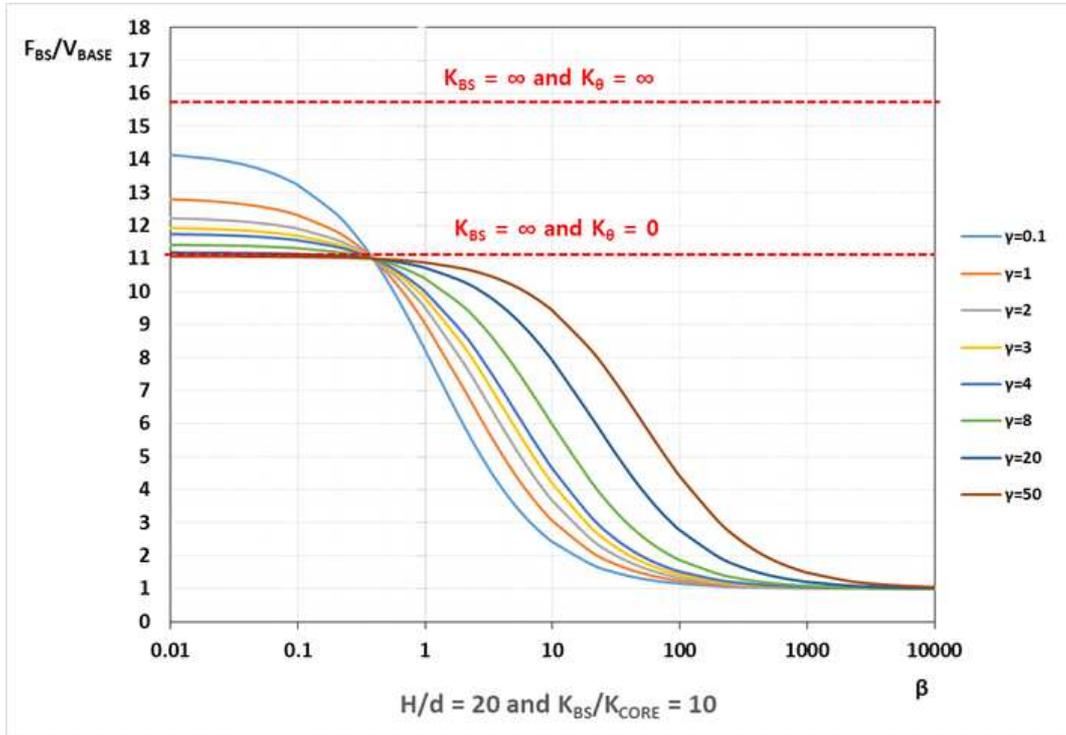
부록 그림1-14 : $H/d = 20$, $K_{BS}/K_{CORE} = 20$ 인 경우 코어기초의 회전강성 및 β 의 변화에 따른 전단력



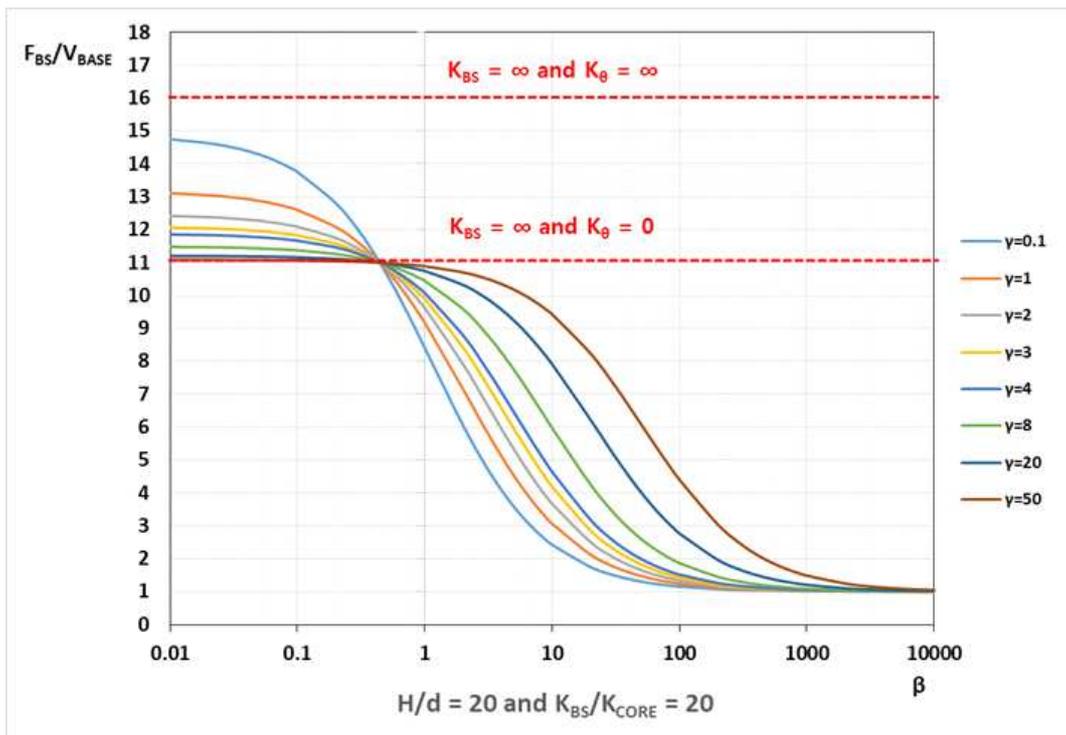
부록 그림1-11. $H/d = 20$, $\beta = 7.05$ 인 경우 코어기초의 회전강성을 무시하고 코어전단강성 및 K_{BS}/K_{CORE} 의 변화에 따른 전단력



부록 그림1-12. $H/d = 20$, $\beta = 7.05$ 인 경우 코어기초의 회전강성 및 K_{BS}/K_{CORE} 의 변화에 따른 전단력



부록 그림1-13. $H/d = 20$, $K_{BS}/K_{CORE} = 10$ 인 경우 코어기초의 회전강성 및 β 의 변화에 따른 전단력



부록 그림1-14. $H/d = 20$, $K_{BS}/K_{CORE} = 20$ 인 경우 코어기초의 회전강성 및 β 의 변화에 따른 전단력

[부록 2] Backstay 효과를 평가하기 위한 TBI의 권장강성

지상부 전도모멘트에 의해 발생하는 지하외벽의 전단력 크기는 코어구조의 강성, 코어기초의 회전강성, 바닥구조(다이어프램)의 강성, 지하외벽의 강성 및 지지 지반의 강성들의 상호작용에 의해 결정되므로 이들의 강성 가정에 따라서 매우 큰 차이가 난다.

백스테이 효과의 평가는 타워의 지진력저항요소 바로 아래의 기초에 의해 제공되는 전복 저항과 지하층의 바닥 다이어프램 및 주변 벽에 의해 제공되는 백스테이 저항을 고려해야 한다. 백스테이 효과에 대한 내진 설계는 전체 건물 전도의 어느 부분이 각 하중 경로에 의해 저항되는지 평가해야 한다. 각 하중 경로에 있는 요소의 강성 특성은 지진 설계에 영향을 미치고 불확실하므로 브라케팅 가정(TBI 권장강성 표 참조)을 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 특정 프로젝트에 TBI의 권장강성을 적용하기 위해서는 공학적인 판단이 필요하다.

각각의 중요한 요소에 대해 상한 및 하한 강성을 고려해야 한다. 각 하중경로의 요소에 대한 지배적인 설계력을 결정하기 위해 가정은 2 가지 전체 케이스로 그룹화 할 수 있다.

Case 1 : 바닥 다이어프램, 지하외벽 및 관련 연결부의 소요설계강도 결정

백스테이 하중 경로에서 힘의 상한 추정값과 타워 아래의 기초에서 힘의 하한 추정값을 제공하는 일련의 가정. 이 경우에서 지하층의 바닥 다이어프램 및 지하외벽의 설계력과 관련 연결부가 결정된다.

Case 2 : 타워 기초요소의 소요설계강도 결정

백스테이 하중 경로에서 힘의 하한 추정값과 타워 아래의 기초에서 힘의 상한 추정값을 제공하는 일련의 가정. 이 경우에서 타워 기초 요소의 설계력이 결정된다.

부록 표2.1의 지하구조의 요소 및 지지 기초와 부록 표2.2의 타워 요소 및 지지 기초에 대한 권장 강성 특성 및 브라케팅 상한 및 하한 가정이 제공되어 있다.

부록 표2.1. 지하구조요소 및 지지기초

구조요소 또는 특성	가정		비고
	Case 1	Case 2	
콘크리트 바닥 다이어프램/지하외벽 유효 휨강성($E_c I_{eff}$)	0.5배	0.2배 또는 등가 균열2차단면모멘트	변형률 침투효과가 발생되므로 휨강성을 줄여야 한다. 변형률 침투와 같은 추가변형소스를 포함하면 작은 강도의 전체특성으로 유효강성을 감소시킬 수 있다.
콘크리트 바닥 다이어프램/지하외벽 유효 전단강성($G_c A$)	0.5배	0.05배 ~ 0.2배	전단응력이 $0.25\sqrt{f_{ck}}$ 를 초과하면 대각선 균열이 발생되므로 전단강성을 줄여야 한다.
수직 지지지반/말뚝 지하외벽하부 수직스프링강성	상한 지반특성	하한 지반특성	상한 지반특성 대신에 지하외벽 하부를 고정지점으로 할 수 있다.
수평 지지지반 지하외벽의 외면 수평스프링강성	하한 지반특성 (또는 무시)	상한 지반특성 (전체 backstay 효과가 증가되지만 다이어프램에 작용하는 힘은 감소된다.)	수동 저항은 압축에서 발생하지만 인장에서는 발생하지 않는다. 수동 저항강성은 지하외벽에 비해 작으므로 무시할 수도 있다.

부록 표2.2. 타워의 지하구조요소 및 지지기초

구조요소 또는 특성	가정		비고
	Case 1	Case 2	
콘크리트 코어 벽 유효휨강성($E_c I_{eff}$) 및 전단강성($G_c A$)	일반적으로 유효 휨강성은 단면해석을 통하여 산정한다.		일반적으로 이 강성 가정은 backstay 효과에 미치는 영향이 적으며, 하한/상한을 고려하지 않는다.
콘크리트 모멘트 골조 유효 휨강성($E_c I_{eff}$) 및 전단강성($G_c A$)	지하외벽시스템에 비해 매우 적으므로 무시할 수 있다.		일반적으로 이 강성 가정은 backstay 효과에 미치는 영향이 적으며, 하한/상한을 고려하지 않는다.
강 모멘트골조 유효 휨강성($E_s I_{eff}$) 및 전단강성($G_s A$)	지하외벽시스템에 비해 매우 적으므로 무시할 수 있다.		일반적으로 이 강성 가정은 backstay 효과에 미치는 영향이 적으며, 하한/상한을 고려하지 않는다.
매트기초/파일궤 유효 휨강성($E_c I_{eff}$)	0.3배 또는 등가 균열2차단면모멘트		일반적으로 이 강성은 영향이 없거나 불확실하지 않으므로, 하한/상한을 고려할 필요가 없다.
매트기초/파일궤 유효 전단강성($G_c A$)	0.3배 또는 전단응력이 $0.25\sqrt{f_{ck}}$ 를 초과하면 더 작게		일반적으로 이 강성은 영향이 없으며, 하한/상한을 고려할 필요가 없다.
수직 지지지반/말뚝 지하외벽하부 수직스프링강성	하한 지반특성	상한 지반특성	상한 지반특성 대신에 지하외벽 하부를 고정지점으로 할 수 있다.

주) 표2.1과 2.2에서 Case 1과 Case 2의 특성값이 구체적으로 제시되지 않은 부분은 관련 기준이나 문헌을 참고하여 결정한다.

[부록 3] 전단벽의 횡력 분배를 위한 이론적 해석방법에 사용한 기본 식

- 전단벽의 면내하중에 대한 변형

$$\Delta_{F(i)} = \frac{h_{(i)}^3}{3E_c I_{(i)}}$$

$$\Delta_{S(i)} = \frac{h_{(i)}}{G_c A_{(i)}} = \frac{h_{(i)}}{0.4E_c A_{(i)}}$$

$$\Delta_{total(i)} = \Delta_{F(i)} + \Delta_{S(i)}$$

- 전단벽의 면내 횡강성

$$k_{(i)} = \frac{1}{\Delta_{total(i)}} = \frac{1}{\Delta_{F(i)} + \Delta_{S(i)}}$$

- 전단벽 그룹의 강성 중심

$$\bar{x}_r = \frac{\sum k_{(i)y} x_i}{\sum k_{(i)y}}$$

$$\bar{y}_r = \frac{\sum k_{(i)x} y_i}{\sum k_{(i)x}}$$

- X방향으로 작용하는 층 전단력에 대한 각 벽의 전단력

$$V_{(i)x} = V_x \frac{k_{(i)x}}{\sum k_{(i)x}} + V_x e_y \frac{k_{(i)x} y_{(i)}}{J_r}$$

- Y방향으로 작용하는 층 전단력에 대한 각 벽의 전단력

$$V_{(i)y} = V_y \frac{k_{(i)y}}{\sum k_{(i)y}} + V_y e_x \frac{k_{(i)y} x_{(i)}}{J_r}$$

- 전단벽 그룹의 비틀림 강성

$$J_r = \sum k_{(i)y} x_{(i)}^2 + \sum k_{(i)x} y_{(i)}^2 \Rightarrow J_r = \sum k_{(i)} r_{t(i)}^2$$

여기서,

i = 각 전단벽 요소의 번호

$h_{(i)}$ = 각 전단벽 높이

E_c = 콘크리트 탄성계수

$A_{(i)}$ = 각 전단벽의 단면적

$I_{(i)}$ = 각 전단벽의 단면2차모멘트

$x_{(i)}$ = 각 전단벽요소 중심에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 x방향 직각 거리

$y_{(i)}$ = 각 전단벽요소 중심에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 y방향 직각 거리

$r_{t(i)}$ = 각 전단벽요소 중심의 접선에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 직각 거리

e_x = Y방향 층 전단력의 중심에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 x방향 직각 거리

e_y = X방향 층 전단력의 중심에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 y방향 직각 거리

$k_{(i)x}$ = X방향 층 전단력과 해당 전단벽요소 사이의 각도를 고려한 각 요소의 횡강성

$k_{(i)y}$ = Y방향 층 전단력과 해당 전단벽요소 사이의 각도를 고려한 각 요소의 횡강성

$k_{(i)}$ = 해당 전단벽요소의 각도를 고려하지 않은 각 요소의 벽 길이방향 횡강성

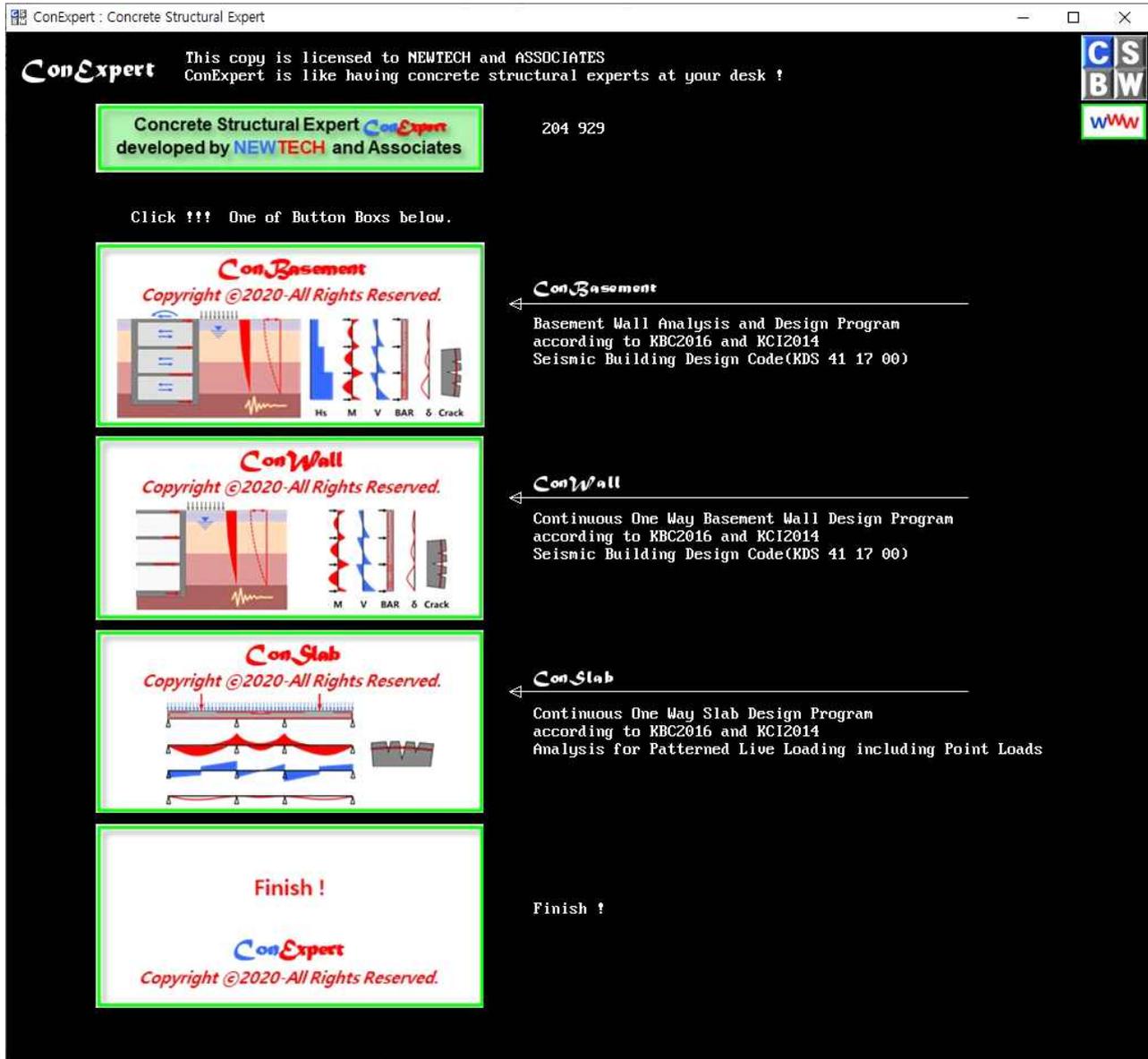
V_x = X방향 층 전단력

V_y = Y방향 층 전단력

[부록 4] ConBasement에 의한 지하구조의 내진설계 실행 예

Sample-1 : 지하 2층, 지상부 2동, 비균일 연약 지반, 말뚝기초

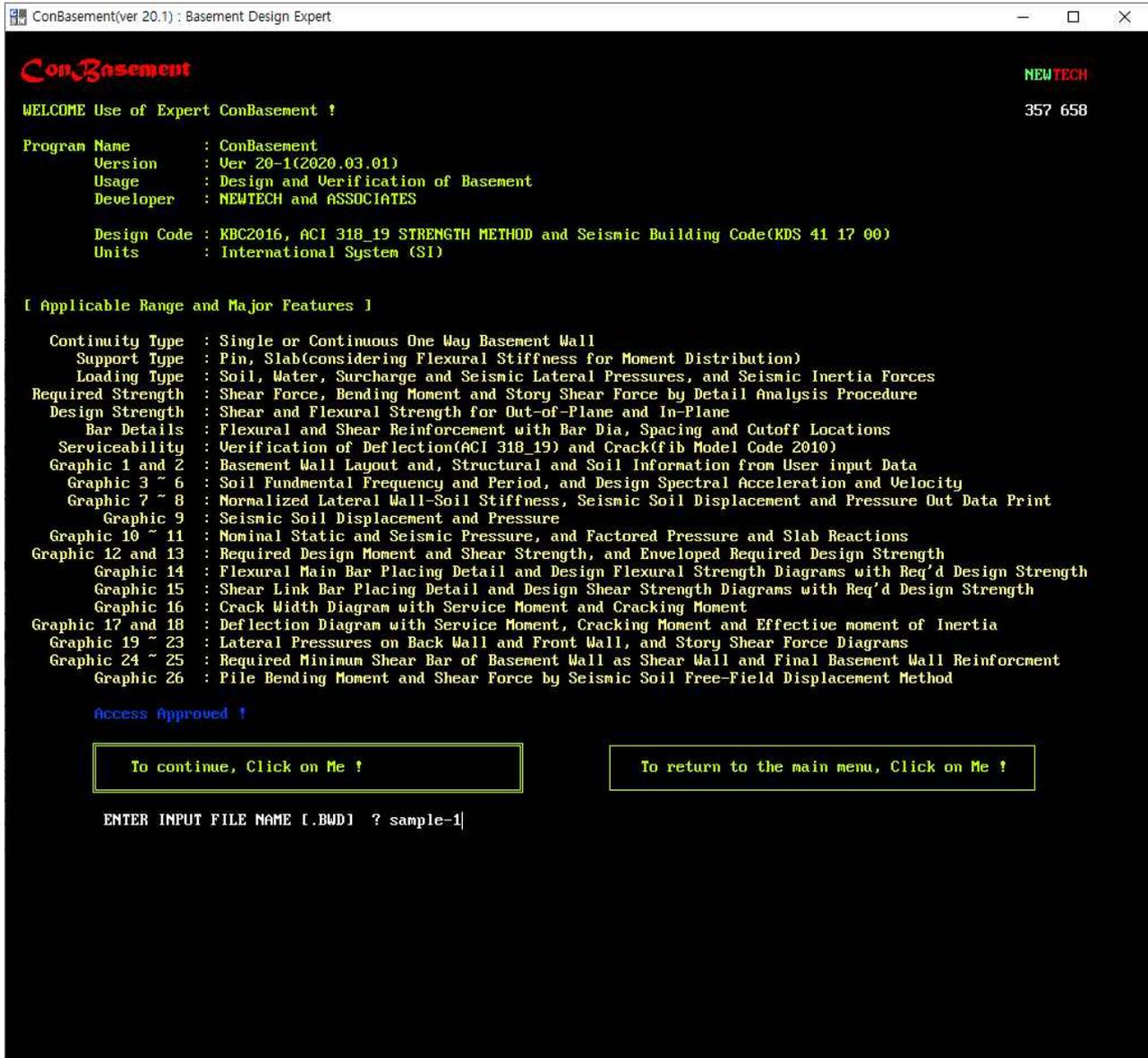
ConExpert 메인 창



ConExpert에는 3종류의 구조설계용 컴퓨터프로그램(ConBasement, ConWall, ConSlab)이 포함되어 있다.

ConBasement를 실행하기 위해 ConBasement Tab(그림 상자)을 클릭한다.

ConBasement 시작 창

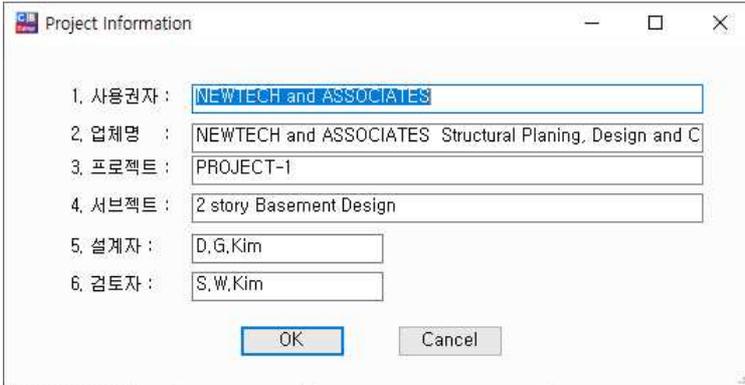


[To continue, Click on Me !] 상자를 클릭하면 ConBasement Editor가 열리면서 위 그림과 같이 입력데이터 파일명 입력 요구 문이 나온다.

데이터 파일명을 입력한 후, [Enter] key를 누르면 다음과 같은 순서로 프로그램의 수행이 시작된다.

ConBasement 입력 창

프로젝트 정보 입력 창



Project Information

1. 사용권자 : NEWTECH and ASSOCIATES

2. 업체명 : NEWTECH and ASSOCIATES Structural Planing, Design and C

3. 프로젝트 : PROJECT-1

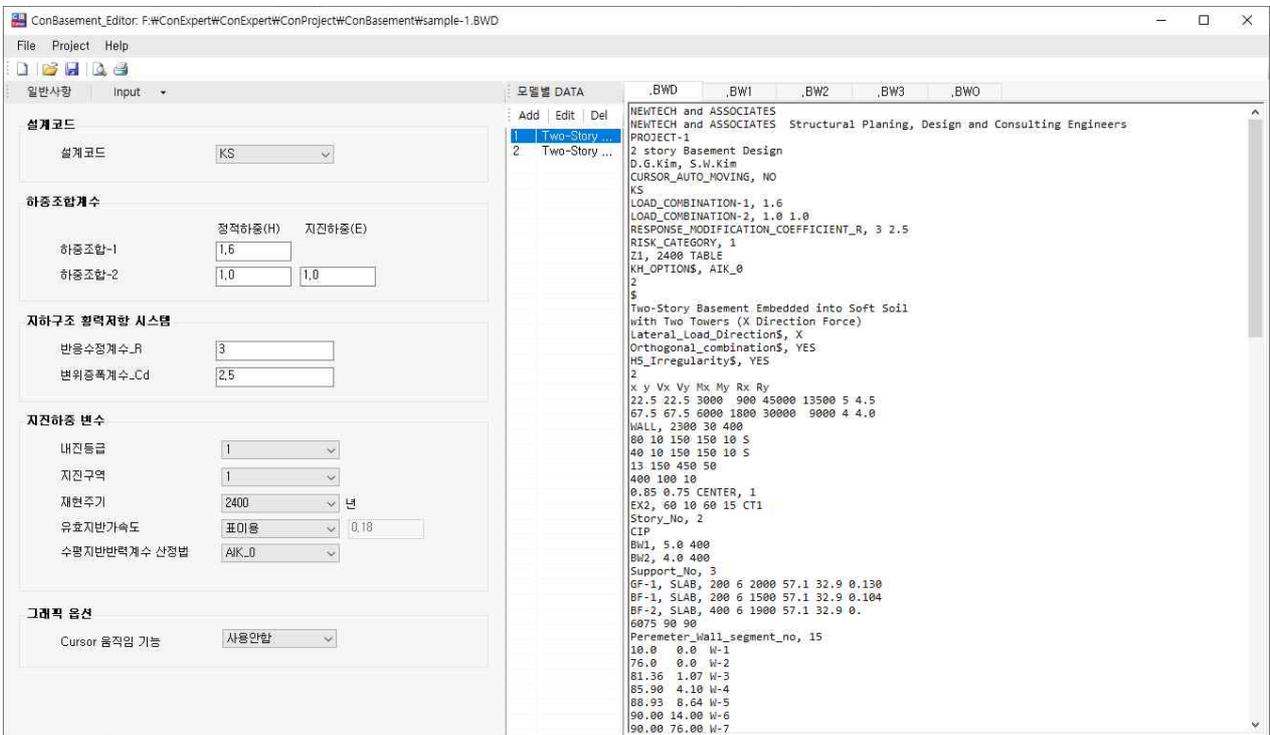
4. 서브젝트 : 2 story Basement Design

5. 설계자 : D.G.Kim

6. 검토자 : S.W.Kim

OK Cancel

일반 정보(공통사항) 입력 창



ConBasement_Editor: F:\#ConExpert\#ConExpert\#ConProject\#ConBasement\#sample-1.BWD

File Project Help

일반사항 Input

모달별 DATA

설계코드: KS

하중조합계수: 하중조합-1 (1.6), 하중조합-2 (1.0, 1.0)

지하구조 힘저항 시스템: 반응수정계수_R (3), 변위증폭계수_Cd (2.5)

지진하중 변수: 내진등급 (1), 지진구역 (1), 재현주기 (2400), 유효지반가속도 (포이름, 0.18), 수평지반반력계수 산정법 (AIK_0)

그래픽 옵션: Cursor 움직임 가능 (사용안함)

모달별 DATA Table:

번호	이름	내용
1	Two-Story ...	NEWTECH and ASSOCIATES NEWTECH and ASSOCIATES Structural Planing, Design and Consulting Engineers PROJECT-1 2 story Basement Design D.G.Kim, S.W.Kim CURSOR_AUTO_NOVING, NO KS LOAD_COMBINATION-1, 1.6 LOAD_COMBINATION-2, 1.0 1.0 RESPONSE_MODIFICATION_COEFFICIENT_R, 3 2.5 RISK_CATEGORY, 1 Z1, 2400 TABLE KHL_OPTIONS, AIK_0 2 5 Two-Story Basement Embedded into Soft Soil with Two Towers (X Direction Force) Lateral_Load_Directions, X Orthogonal_combination\$, YES HS_Irregularity\$, YES 2 x y Vx Vy Hx My Rx Ry 22.5 22.5 3000 900 45000 13500 5 4.5 67.5 67.5 6000 1800 30000 9000 4 4.0 WALL, 2300 30 400 80 10 150 150 10 S 40 10 150 150 10 S 13 150 450 50 400 100 10 0.85 0.75 CENTER, 1 EX2, 60 10 60 15 CT1 Story_No, 2 CIP BW1, 5.0 400 BW2, 4.0 400 Support_No, 3 GF-1, SLAB, 200 6 2000 57.1 32.9 0.130 BF-1, SLAB, 200 6 1500 57.1 32.9 0.104 BF-2, SLAB, 400 6 1900 57.1 32.9 0. 6075 90 90 Peremeter_Wall_segment_no, 15 10.0 0.0 W-1 76.0 0.0 W-2 81.36 1.07 W-3 85.90 4.10 W-4 88.93 8.64 W-5 90.00 14.00 W-6 90.00 76.00 W-7

입력 창-1 : 재료/강도 정보

Case명 Two-Story Basement Embedded into Soft Soil
간략정보 [with Two Towers (X Direction Force)]

재료강도

콘크리트 단위중량 mc 2300 kg/m³
 콘크리트 fck 30 MPa
 주철근 fy 400 MPa
 전단철근 fy_s 400 MPa

철근배근 (단위: mm)

	피복두께	최소격자	최소간격	최대간격	중분간격	배근타입
외기층 철근	80	10	150	150	10	S
실내층 철근	40	10	150	150	10	S
수평철근		13	150	450	50	
전단보강근			100		10	

균열 및 처짐 한계

노출환경 재하기간 (월) 초기개량 평균습도 (%) 평균온도 (도) 시멘트종류
 습윤환경 60 10 60 15 I종시멘트 습윤양생

강도감소계수 **소요강도**

벽 0.85 위치 지점중심
 전단 0.75 목표강도비 1

입력 창-2 : 평면 정보

Case명 Two-Story Basement Embedded into Soft Soil
간략정보 [with Two Towers (X Direction Force)]

지하구조 평면치수

바닥면적(m²) 토압분담폭(m) 깊이(m)
 6075 90 90

지하외벽 평면정보 (15)

절점	X좌표(m)	Y좌표(m)	마크
1	10.0	0.0	W-1
2	76.0	0.0	W-2
3	81.36	1.07	W-3
4	85.90	4.10	W-4
5	88.93	8.64	W-5

내부벽 평면정보 (0)

번호	시각점 좌표(m)	절점 좌표(m)	마크		
요소	x_i	y_i	x_j	y_j	
1					

입력 창-3 : 단면 정보

ConBasement_Editor: F:\#ConExpert\#ConExpert\#ConProject\#ConBasement\#sample-1.8WD

File Project Help

일반사항 Input

Case명 Two-Story Basement Embedded into Soft Soil
 간략정보 [with Two Towers (X Direction Force)]

지하외벽 단면 (2)

지하외벽 Type 일반벽
 지하층 층수 2

층	벽(층)이름	층높이 (m)	벽두께 (mm)
B1	BW1	5,0	400
B2	BW2	4,0	400

지점조건 (3)

지점	바닥명	지점종류	슬라브 두께(mm)	길이(m)
1	GF-1	SLAB	200	6
2	BF-1	SLAB	200	6
3	BF-2	SLAB	400	6

내부벽 층별 두께

모달별 DATA

	.BWD	.BW1	.BW2	.BW3	.BWO
1	Two-Story ...				
2	Two-Story ...				

```

Two-Story Basement Embedded into Soft Soil
with Two Towers (X Direction Force)
Lateral_Load_Direction$, X
Orthogonal_combination$, YES
HS_Irregularity$, YES
2
x y Vx Vy Hx My Rx Ry
22.5 22.5 3000 900 45000 13500 5 4.5
67.5 67.5 6000 1800 30000 9000 4 4.0
WALL, 2300 30 400
80 10 150 150 10 5
40 10 150 150 10 5
13 150 450 50
400 100 10
0.85 0.75 CENTER, 1
EX2, 60 10 60 15 CT1
Story_No, 2
CIP
BW1, 5.0 400
BW2, 4.0 400
Support_No, 3
GF-1, SLAB, 200 6 2000 57.1 32.9 0.130
BF-1, SLAB, 200 6 1500 57.1 32.9 0.104
BF-2, SLAB, 400 6 1900 57.1 32.9 0.
6075 90 90
Perimeter_Wall_segment_no, 15
10.0 0.0 W-1
76.0 0.0 W-2
81.36 1.07 W-3
85.90 4.10 W-4
88.93 8.64 W-5
90.00 14.00 W-6
90.00 76.00 W-7
88.93 81.36 W-8
85.96 85.97 W-9
81.36 88.93 W-10
76.00 90.00 W-11
45.00 90.00 W-12
35.00 76.00 W-13
4.5 72.00 W-14
0.0 10.00 W-15
Dis_Cont_Interior_Wall_segment_no, 0
SURCHARGE, 20.0
Water_Table(m), 2
Soil_No, 4
Name d(i) Gamma(i) Angle(i) poss Vs(m/s) Layer
    
```

입력 창-4 : 지반/말뚝 정보

ConBasement_Editor: F:\#ConExpert\#ConExpert\#ConProject\#ConBasement\#sample-1.8WD

File Project Help

일반사항 Input

Case명 Two-Story Basement Embedded into Soft Soil
 간략정보 [with Two Towers (X Direction Force)]

기본사항

표면재하 20.0 kN/m² 뒷벽정적할압 무시
 지하수위 GL - 2 m 뒷벽필스트림 무시
 기반암변형 무시 지지력 무시

토층별 물성치 (4)

No	토층종류	토층깊이 (m)	단위체적중량 (kN/m³)	마찰각 (도)	프아송 비	전단파 속도 (m/s)	지반층 구분
1	SOIL	3.0	18	25	0.40	100	1
2	SOIL	3.0	19	28	0.35	200	1
3	SOIL	9.0	21	30	0.32	260	2
4	ROCK	5.0	24	35	0.25	800	2

파임기준

파임기준 YES
 파임이름 HPC450x65(B)

파임정보

Ps (kN/1분)	직경 (mm)	탄성계수 (MPa)	단면2차모멘트 (mm⁴)	길이 (m)	캡두께 (mm)
1300	450	40000	160000000	20	900

지반 토층종류 SAND 수평지반반력계수 (kN/m²) 2400

모달별 DATA

	.BWD	.BW1	.BW2	.BW3	.BWO
1	Two-Story ...				
2	Two-Story ...				

```

0.85 0.75 CENTER, 1
EX2, 60 10 60 15 CT1
Story_No, 2
CIP
BW1, 5.0 400
BW2, 4.0 400
Support_No, 3
GF-1, SLAB, 200 6 2000 57.1 32.9 0.130
BF-1, SLAB, 200 6 1500 57.1 32.9 0.104
BF-2, SLAB, 400 6 1900 57.1 32.9 0.
6075 90 90
Perimeter_Wall_segment_no, 15
10.0 0.0 W-1
76.0 0.0 W-2
81.36 1.07 W-3
85.90 4.10 W-4
88.93 8.64 W-5
90.00 14.00 W-6
90.00 76.00 W-7
88.93 81.36 W-8
85.96 85.97 W-9
81.36 88.93 W-10
76.00 90.00 W-11
45.00 90.00 W-12
35.00 76.00 W-13
4.5 72.00 W-14
0.0 10.00 W-15
Dis_Cont_Interior_Wall_segment_no, 0
SURCHARGE, 20.0
Water_Table(m), 2
Soil_No, 4
Name d(i) Gamma(i) Angle(i) poss Vs(m/s) Layer
SOIL, 3.0 18 25 0.40 100 1
SOIL, 3.0 19 28 0.35 200 1
SOIL, 9.0 21 30 0.32 260 2
ROCK, 5.0 24 35 0.25 800 2
ROCK_DEFORMATION_OPTIONS, IGNORE
BACK_WALL_PRESSURES, IGNORE
BACK_WALL_SPRING_SUPPORT_FORCES, IGNORE
PILE, YES
HPC450x65(B), 20
1300 450 40000 160000000 900
SAND, 2400
Two-Story Basement Embedded into Soft Soil
with Two Towers (Y Direction Force)
Lateral_Load_Direction$, Y
    
```

입력 창-5 : 지진하중 정보

ConBasement_Editor: F:\#ConExpert\#ConExpert\#ConProject\#ConBasement\#sample-1.BWD

File Project Help

일반사항 Input

5 Case명 Two-Story Basement Embedded into Soft Soil
 간략정보 [with Two Towers (X Direction Force)]

지진하중의 방향
 주 지진하중 방향 X방향
 직교방향 하중효과 (지하층) 고려
 평면 비정형성 유형 H-5 (지하층) 비정형

지상구조물 각 다위의 지진하중 (2)

No	평면상 작용위치(m)		1층 밑면전단력 (kN)		1층 밑면전도모멘트 (kN,m)		반응수정계수	
	x	y	주방향	직교방향	주방향	직교방향	Rx	Ry
▶ 1	22.5	22.5	3000	900	45000	13500	5	4.5
2	67.5	67.5	6000	1800	30000	9000	4	4.0
3								

지하구조물 각층의 층중량 및 지진토폴에 의한 횡변위 (3)

층	층중량 (kN)	중량 중심 위치(m)		바닥명	횡변위(c) (mm)
		x	y		
▶ 1F	2000	57.1	32.9	GF-1	0.130
B1	1500	57.1	32.9	BF-1	0.104
B2	1900	57.1	32.9	BF-2	0.

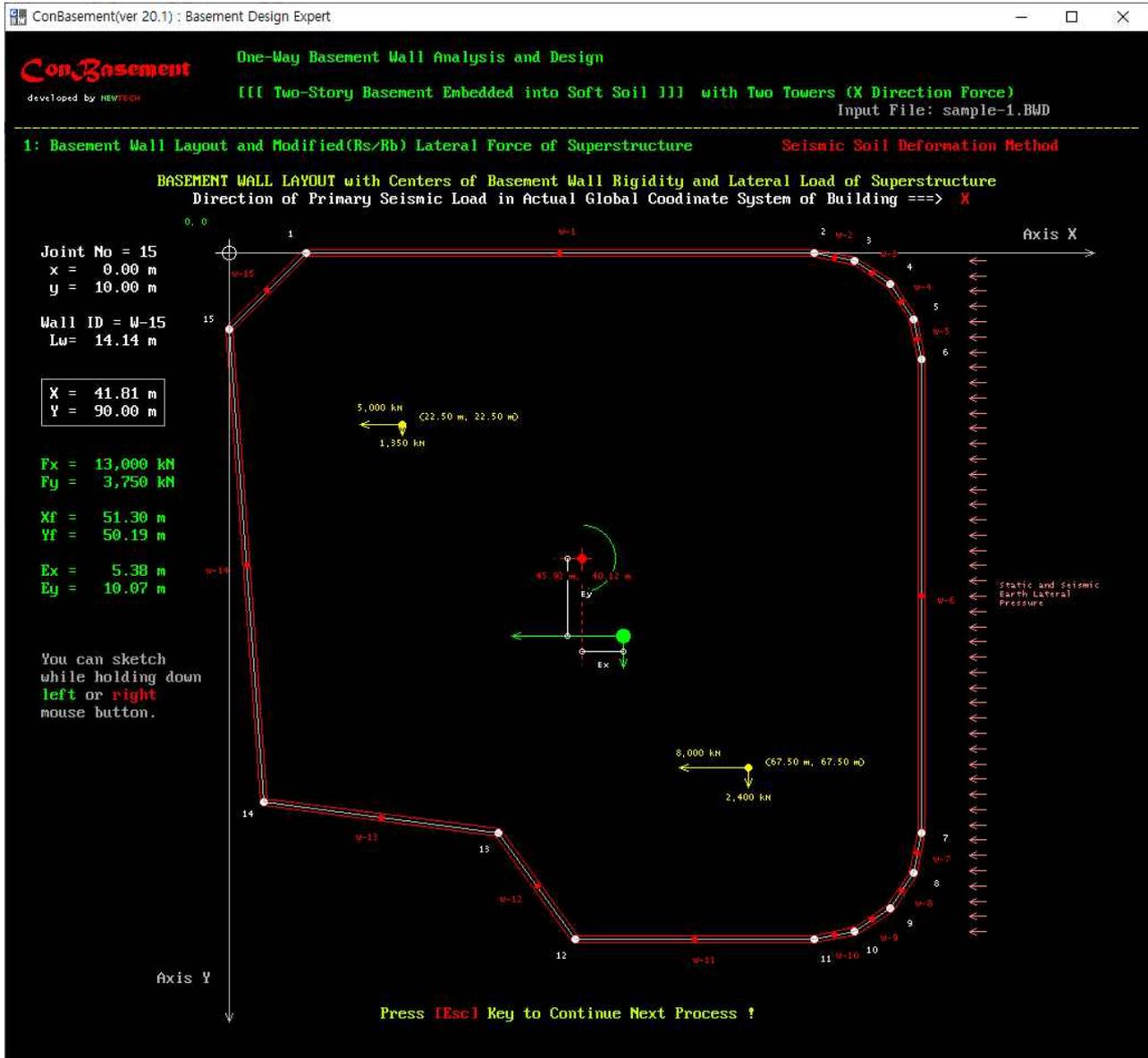
모달별 DATA

1 Two-Story ...
 2 Two-Story ...

```

Two-Story Basement Embedded into Soft Soil
with Two Towers (X Direction Force)
Lateral_Load_Direction$, X
Orthogonal_combination$, YES
H5_Irregularity$, YES
2
x y Vx Vy Mx My Rx Ry
22.5 22.5 3000 900 45000 13500 5 4.5
67.5 67.5 6000 1800 30000 9000 4 4.0
WALL, 2300 30 400
80 10 150 150 10 5
40 10 150 150 10 5
13 150 450 50
400 100 10
0.85 0.75 CENTER, 1
EX2, 60 10 60 15 CT1
Story_No, 2
CIP
BW1, 5.0 400
BW2, 4.0 400
Support_No, 3
GF-1, SLAB, 200 6 2000 57.1 32.9 0.130
BF-1, SLAB, 200 6 1500 57.1 32.9 0.104
BF-2, SLAB, 400 6 1900 57.1 32.9 0.
6075 90 90
Parameter_Wall_segment_no, 15
10.0 0.0 W-1
76.0 0.0 W-2
81.36 1.07 W-3
85.90 4.10 W-4
88.93 8.64 W-5
90.00 14.00 W-6
90.00 76.00 W-7
88.93 81.36 W-8
85.96 85.97 W-9
81.36 88.93 W-10
76.00 90.00 W-11
45.00 90.00 W-12
35.00 76.00 W-13
4.5 72.00 W-14
0.0 10.00 W-15
Dis_Cort_Interior_Wall_segment_no, 0
SURCHARGE, 20.0
Water_Table(m), 2
Soil_No, 4
Name d(i) Gamma(i) Angle(i) poss Vs(m/s) Layer
SOIL, 3.0 18 25 0.40 100 1
  
```

1. 평면도 : X방향 횡하중에 대한 해석 및 설계 시작

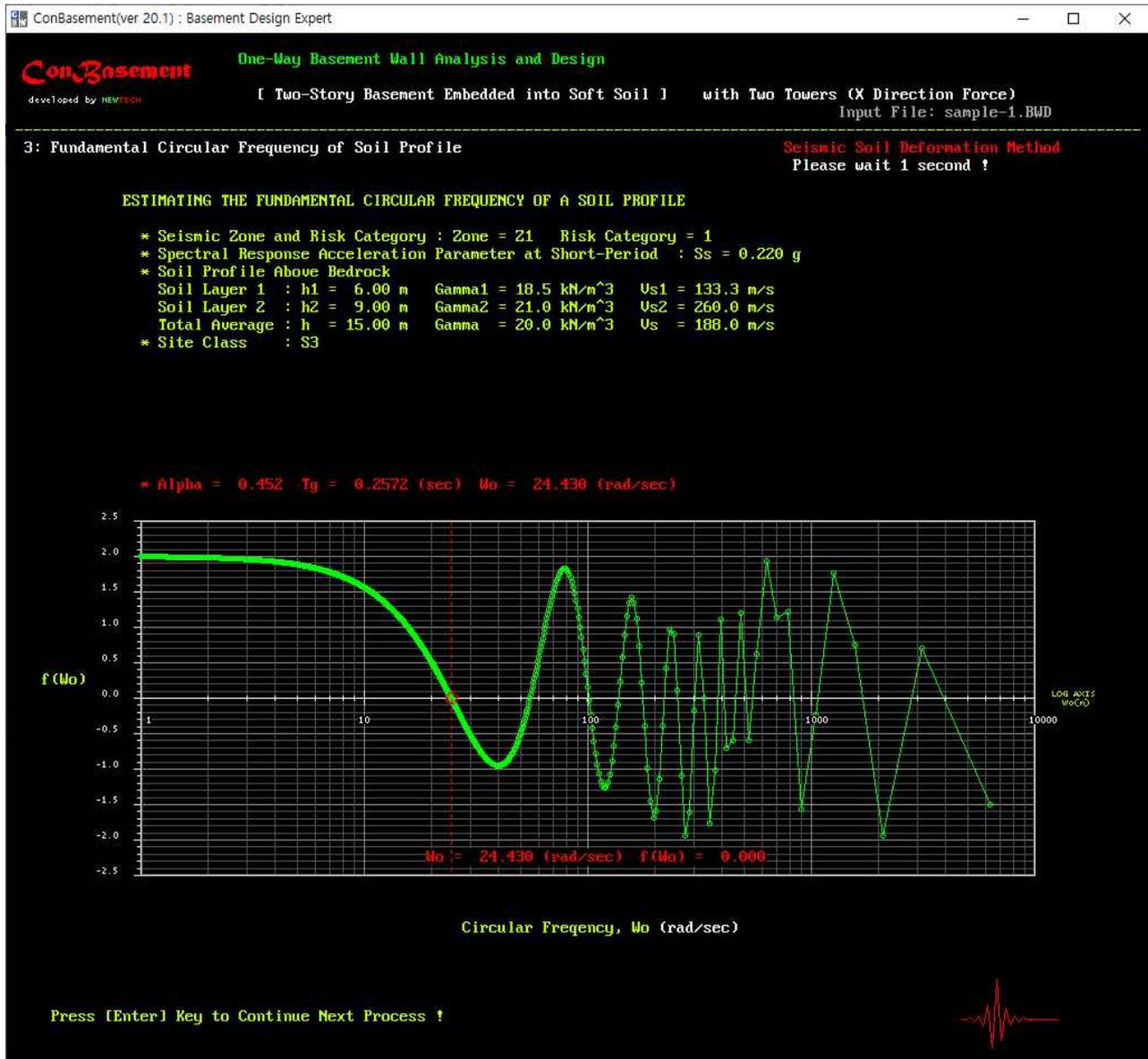


전체 좌표계, 지하외벽요소의 절점위치, 절점번호, 요소중심위치, 요소이름
 노란색은 지상부 각 타워의 1층 기준 밑면전단력(X방향 및 Y방향), 밑면전단력 작용 위치(x, y)
 녹색은 지상부 타워들의 밑면전단력 합력(X방향 및 Y방향), 합력 작용 위치(x, y)
 벽그룹의 강성중심 위치(x, y), 강성중심과 합력중심 간 편심거리(e_x , e_y), 편심에 의한 비틀림 회전방향

사용자의 선택(커서의 자동 이동 사용여부)에 따라서,

- 프로그램 실행 시에 사용자의 벽요소(외벽 및 내벽) 입력위치를 확인할 수 있도록 커서가 자동으로 각 절점위치로 이동하며, 왼쪽 상부에 각 해당 위치가 순차적으로 나타남.
- 프로그램 실행 시에 사용자의 지상구조물의 밑면하중에 대한 입력 데이터를 확인할 수 있도록 커서가 자동으로 각 밑면하중위치와 합력하중 위치로 이동하며 각 해당 정보가 왼쪽 글상자와 초록색 글씨 위치에 순차적으로 나타남.
- 커서의 자동순환 종료 후, 사용자가 실행화면에서 커서를 목표 위치로 이동하면 목표 위치에 대한 평면적 입력 위치를 확인할 수 있음

3. 기반암 위 토층 자유장의 고유 원진동수



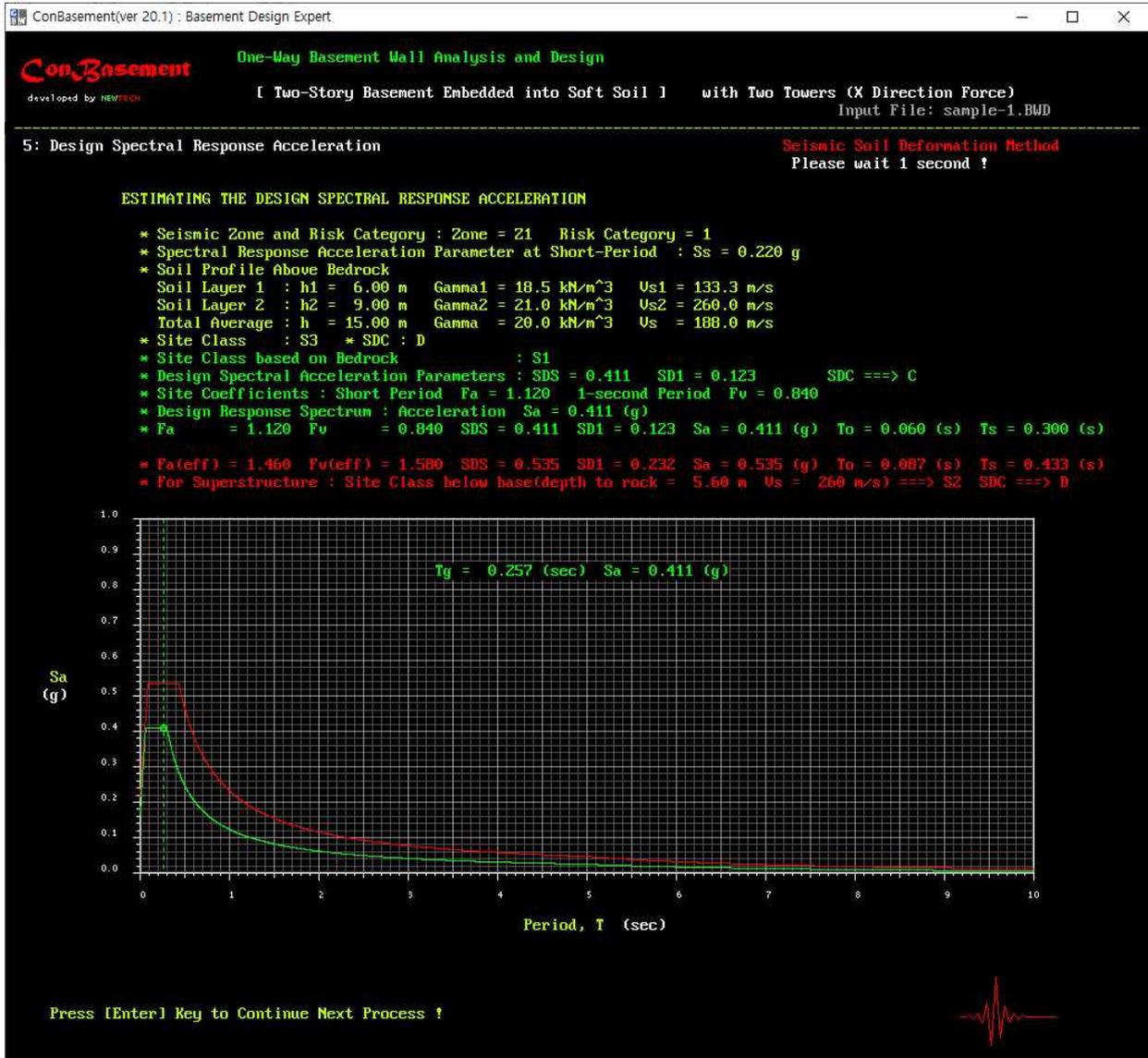
상부부터 지진구역/내진등급, 유효지반가속도, 지반의 동적특성, 지표면 기준 지반분류, 지반고유원진동수

4. 기반암 위 토층 자유장의 고유 주기



상부부터 지진구역/내진등급, 유효지반가속도, 지반의 동적특성, 지표면 기준 지반분류, 지반고유주기

5. 설계응답스펙트럼 가속도



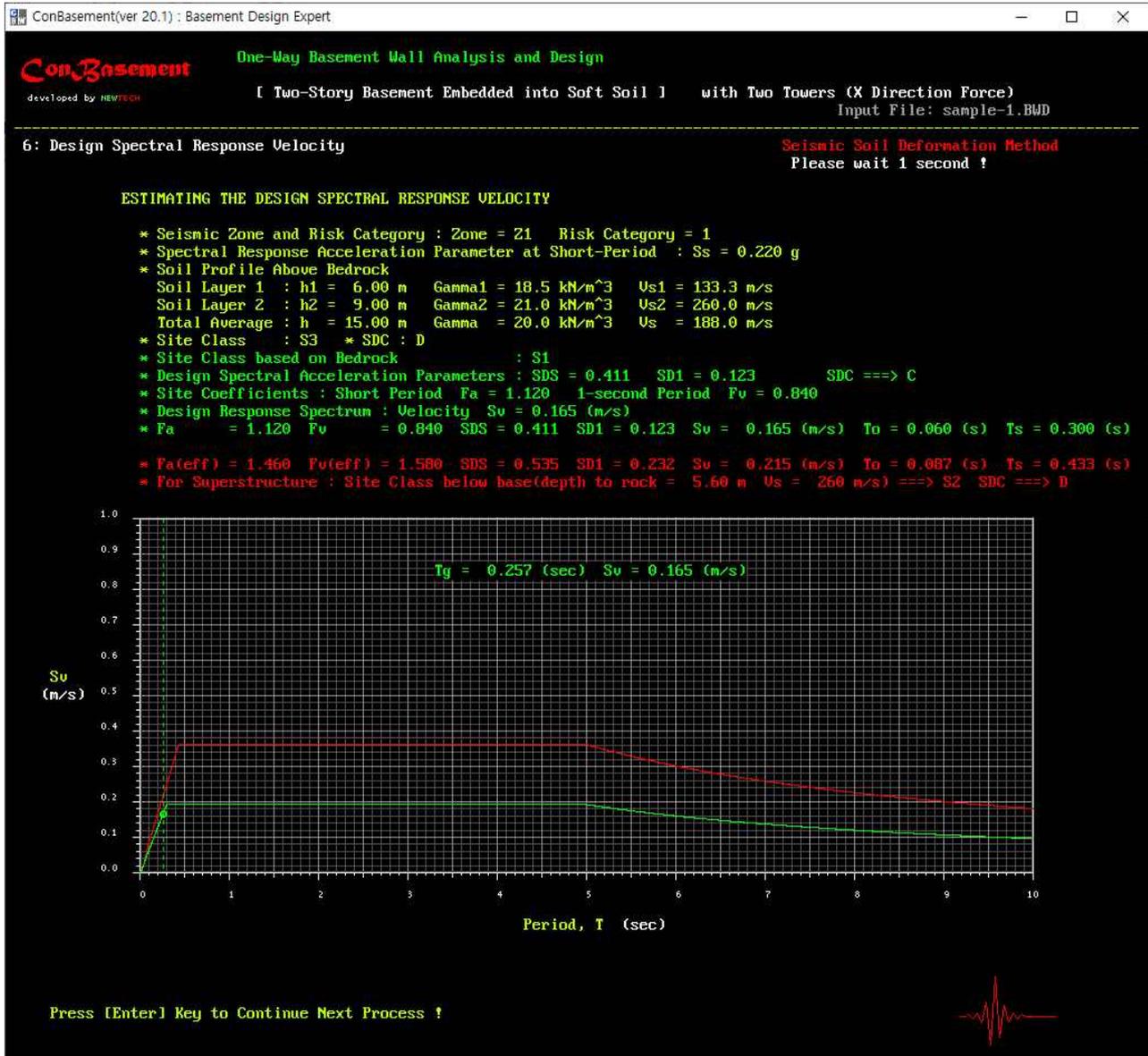
상부부터 지진구역/내진등급, 유효지반가속도, 지반의 동적특성, 지표면 기준 지반분류, 설계스펙트럼가속도(단주기, 1초주기), 지반증폭계수(단주기, 1초주기), 내진설계범주, 설계응답스펙트럼가속도

녹색 글씨는 지하구조물 내진설계에 적용하는 지표층(기반암 상부의 토층) 지반의 고유주기에 해당되는 기반암의 지반증폭계수(단주기, 1초주기), 설계응답스펙트럼가속도, T_0 , T_s

붉은 글씨는 지하구조물의 영향을 고려한 지상구조물의 지반증폭계수(단주기, 1초주기), 설계응답스펙트럼가속도 T_0 , T_s , 지반종류, 내진설계범주

그래프에서 연두색 선은 지하구조의 영향을 고려하지 않은 지상구조 설계용 설계응답스펙트럼 가속도. 그래프에서 녹색 선과 글씨는 지하구조 설계용, 붉은색 선과 글씨는 지하구조의 영향을 고려한 지상구조 설계용. 연두색과 붉은색 선이 겹칠 경우에는 붉은 선만 나타남. 녹색과 붉은색 선이 겹칠 경우에는 녹색 선만 나타남.

6. 설계응답스펙트럼 속도



상부부터 지진구역/내진등급, 유효지반가속도, 지반의 동적특성, 지표면 기준 지반분류, 설계스펙트럼가속도(단주기, 1초주기), 지반증폭계수(단주기, 1초주기), 내진설계범주, 설계응답스펙트럼속도

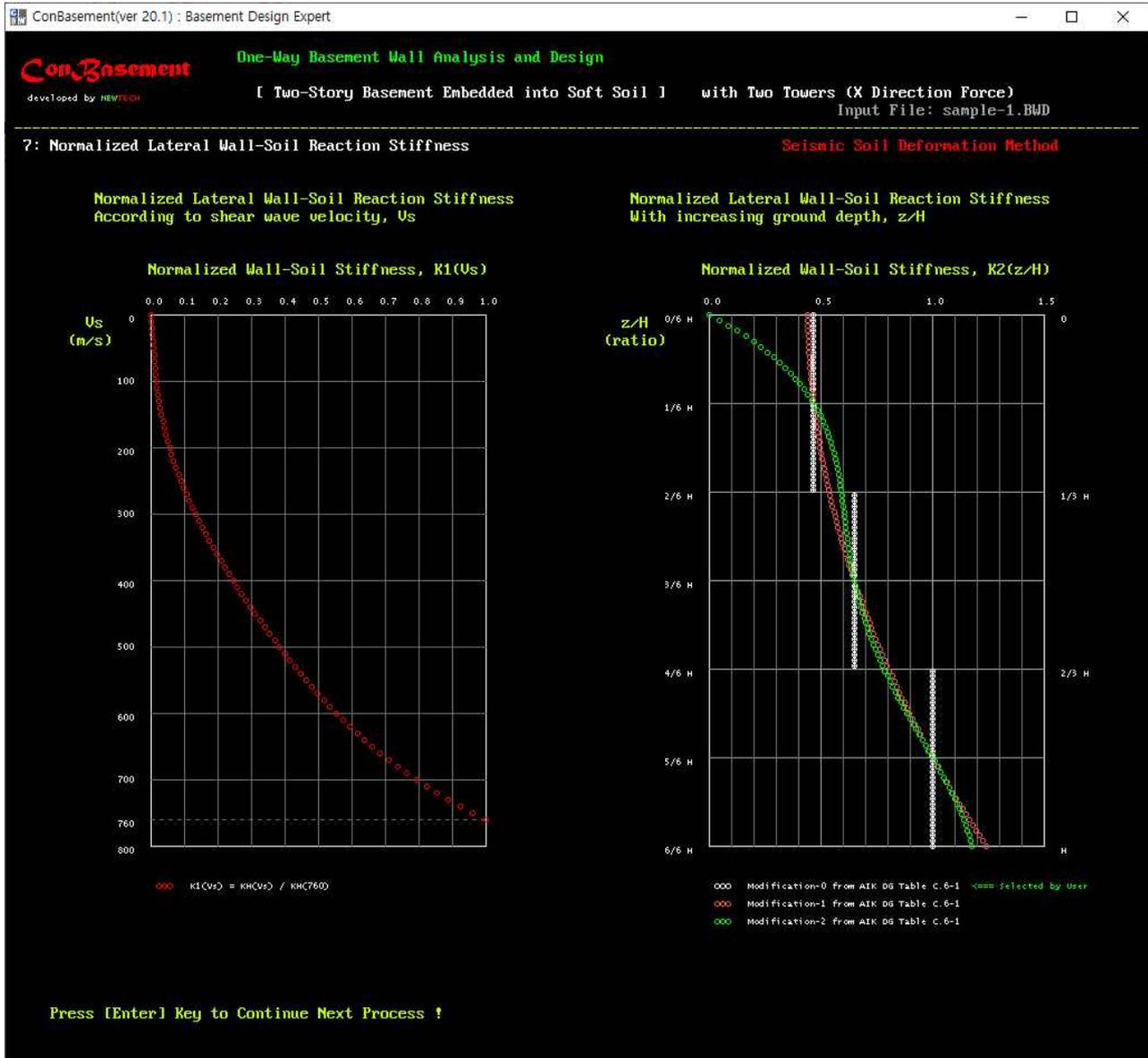
녹색 글씨는 지하구조물 내진설계에 적용하는 지표층(기반암 상부의 토층) 지반의 고유주기에 해당되는 기반암의 지반증폭계수(단주기, 1초주기), 설계응답스펙트럼속도, T_0 , T_s

붉은 글씨는 지하구조물의 영향을 고려한 지상구조물의 지반증폭계수(단주기, 1초주기), 설계응답스펙트럼속도, T_0 , T_s , 지반종류, 내진설계범주

그래프에서 연두색 선은 지하구조의 영향을 고려하지 않은 지상구조 설계용 설계응답스펙트럼 속도.

그래프에서 녹색 선과 글씨는 지하구조 설계용, 붉은색 선과 글씨는 지하구조의 영향을 고려한 지상구조 설계용. 연두색과 붉은색 선이 겹칠 경우에는 붉은 선만 나타남. 녹색과 붉은색 선이 겹칠 경우에는 녹색 선만 나타남.

7. 일반화한 외벽-지반 수평지반반력계수

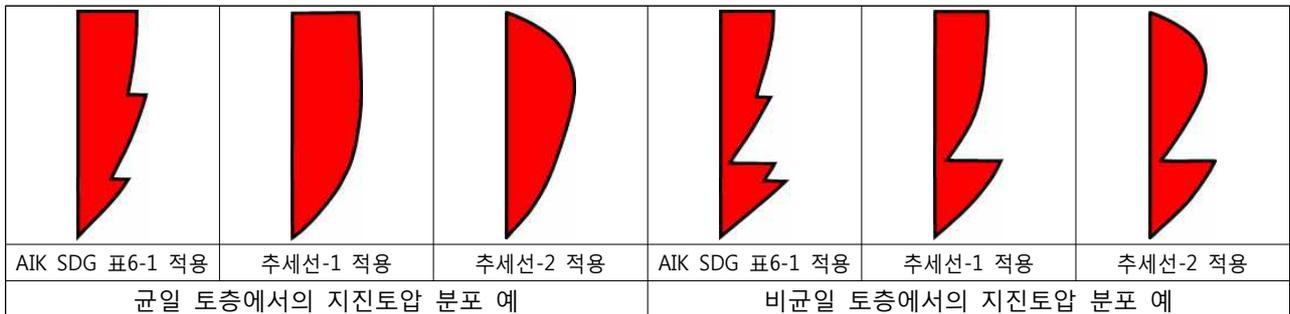


왼쪽 그래프 : 전단파 속도에 따른 일반화한 외벽-지반 수평지반반력계수

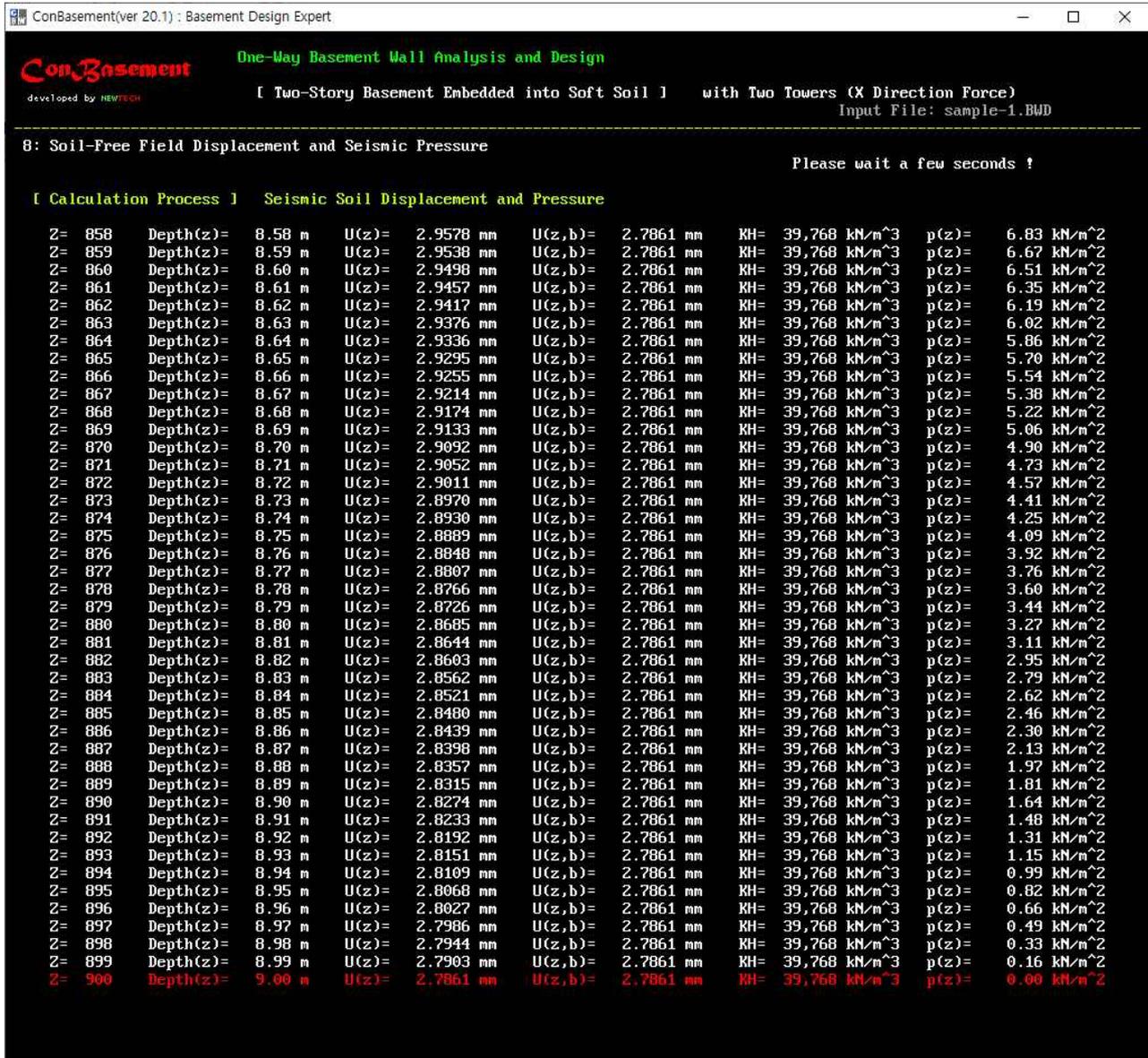
오른쪽 그래프 : 깊이 증가에 따른 일반화한 외벽-지반 수평지반반력계수

흰색선은 대한건축학회 건축물의 지하구조 내진설계지침 해설표 6-1을 일반화한 계수

빨간색선 및 초록색선은 해설표 6-1을 일반화한 추세선-1 및 추세선-2



8. 지하외벽에 작용하는 지진 횡토압 계산과정



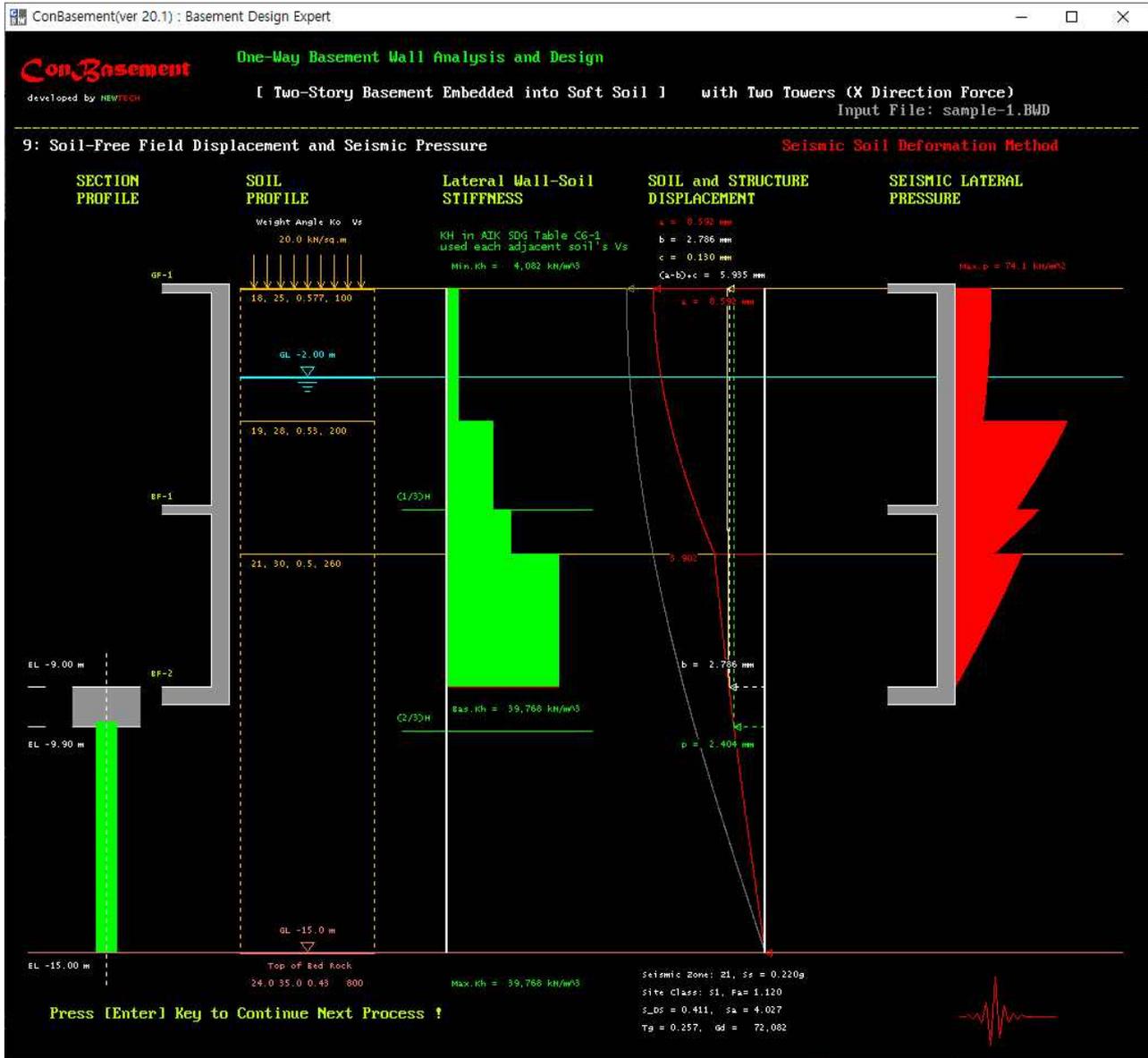
왼쪽부터 요소번호, 깊이, 지반 수평변위, 구조밀면 수평변위, 수평지반반력계수, 지진토압 이 예에서 수평지반반력계수 산정방법은 아래 표의 A0를 적용하였음

ConBasement에서 사용할 수 있는 외벽-지반 수평지반반력계수 산정방법 (15 종류)

구분	각 토층의 Vs 적용	단일 평균 값 Vs 적용	이중 평균 값 Vs 적용
	0	1	2
A AIK SDG Table C6-1 기반	A0	A1	A2
B C6-1기반 추세선 1	B0	B1	B2
C C6-1기반 추세선 2	C0	C1	C2
D 도시철도 내진설계 기준	D0	D1	D2
E 도시철도 내진설계 기준(kim,m.c.안)	E0	E1	E2

권장 Option : A0, B0, C0

9. 수평지반반력계수, 토층자유장 지진수평변위와 지하외벽에 작용하는 지진 횡토압

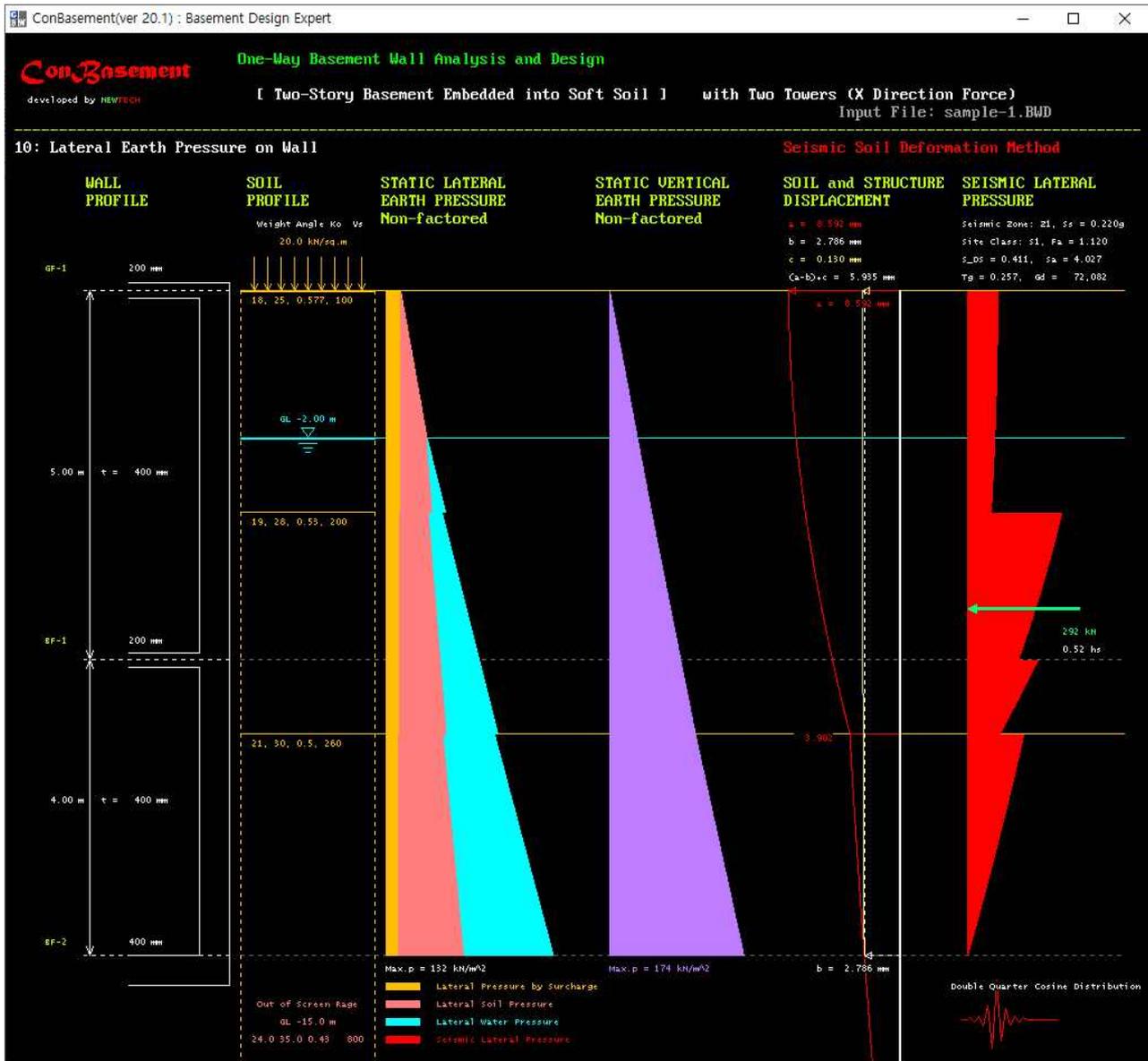


왼쪽부터 지하외벽/말뚝 단면, 토층단면, 수평지반반력계수, 지반/구조 수평변위, 지진 횡토압 (이 예의 수평지반반력계수는 ConBasement의 여러 가지 옵션 중에 내진설계 지침의 아래 표를 적용한 경우임)

건축물의 지하구조 내진설계 지침해설 표 6-1 (대한건축학회)

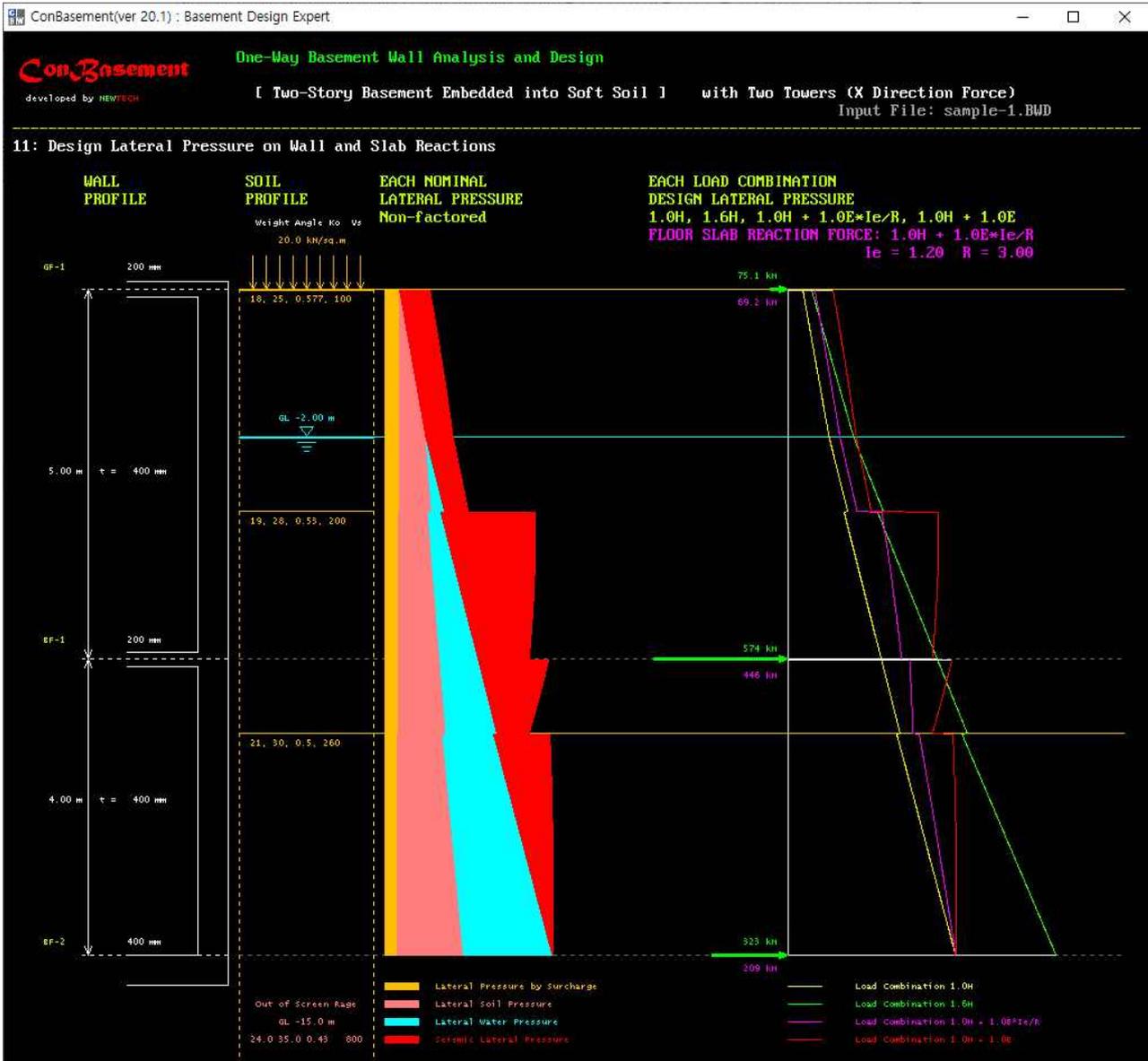
V_s (m/s)	질량밀도 (ton/m ³)	프아송 비	전단탄성계 수(kPa)	탄성계수 (kPa)	수평지반반력계수, K_H (kN/m ³)		
					지표면 ~ $H/3$	$H/3$ ~ $2H/3$	$2H/3$ ~ 기반면
100	1.8	0.4	18000	50400	4082	5695	8770
200	1.8	0.4	72000	201600	16360	22725	34997
300	1.8	0.4	162000	453600	36809	51130	78743
400	1.9	0.4	304000	851200	69074	95948	147764
500	1.9	0.4	475000	1330000	107929	149919	230881
600	1.9	0.4	684000	1915200	155417	215883	332469
700	2.0	0.4	980000	2744000	222673	309307	476345

10. 지하외벽에 작용하는 정적 및 지진 횡토압



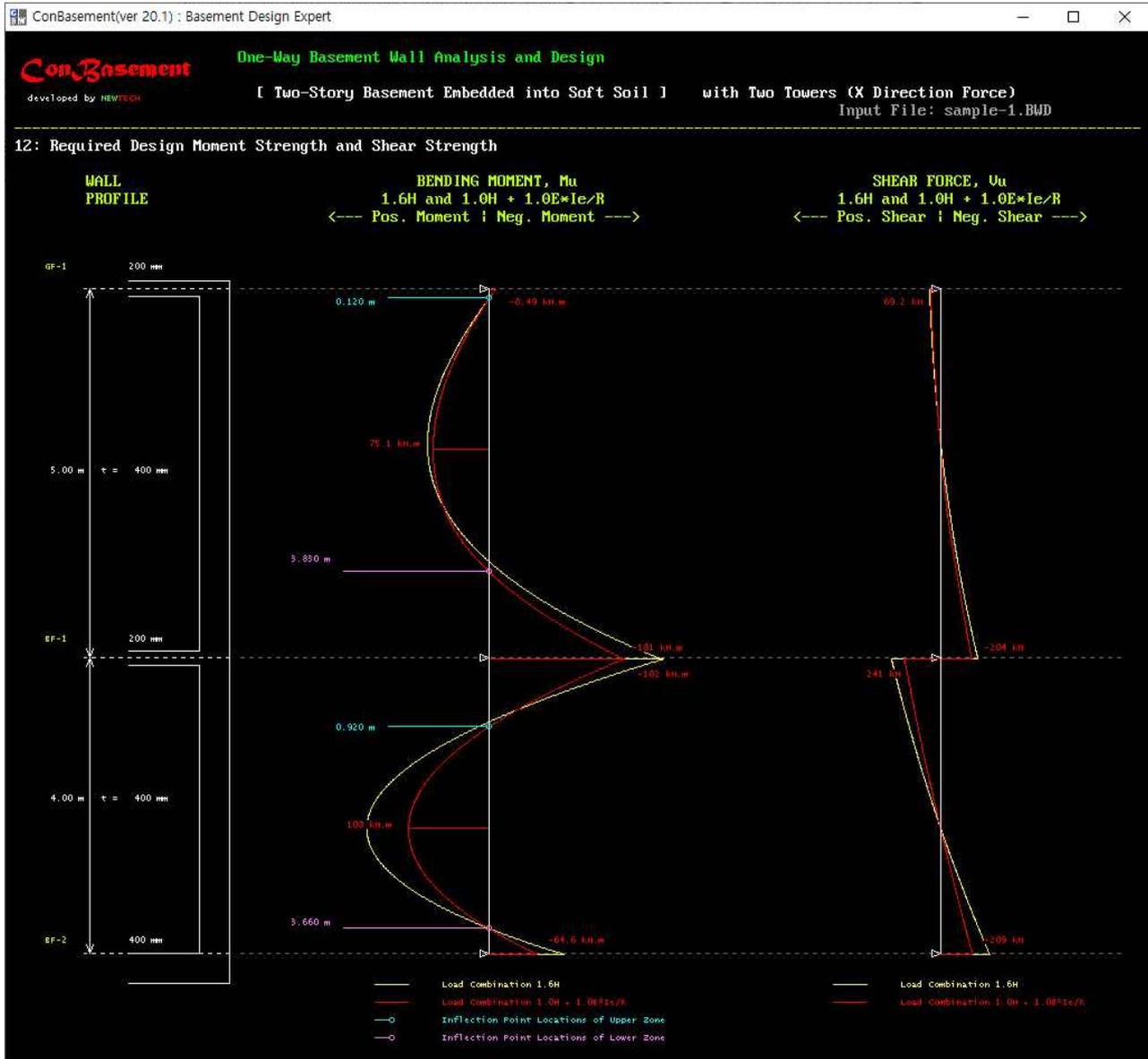
왼쪽부터 지하외벽, 토층단면, 정적 횡토압, 지반수직응력, 지반/구조 수평변위, 지진 횡토압

11. 지하외벽에 작용하는 횡하중



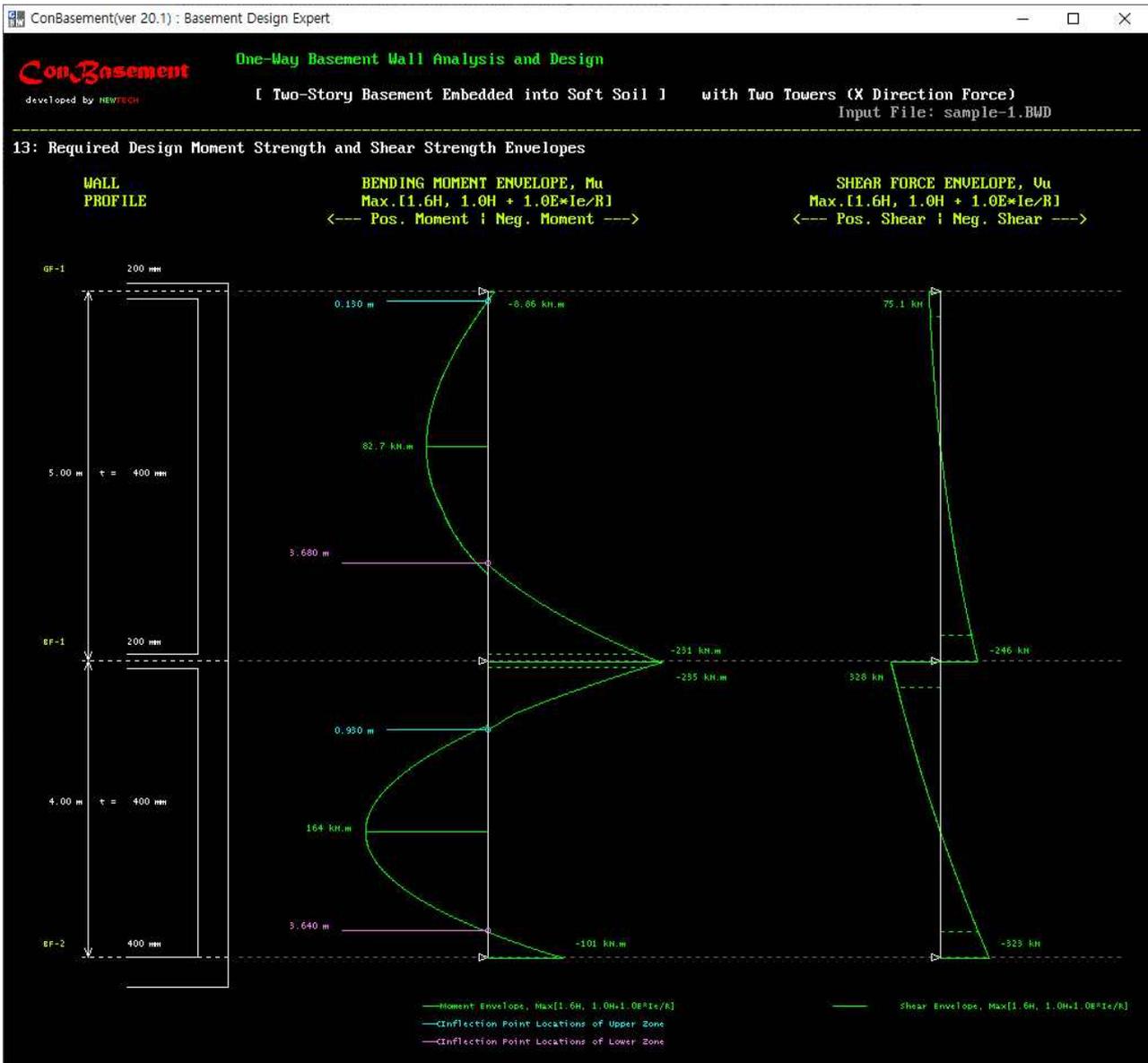
왼쪽부터 지하외벽 단면, 토층단면, 지하외벽에 작용하는 횡하중, 슬래브 반력, 각 하중조합의 횡하중

12. 각 하중조합에 대한 소요설계강도



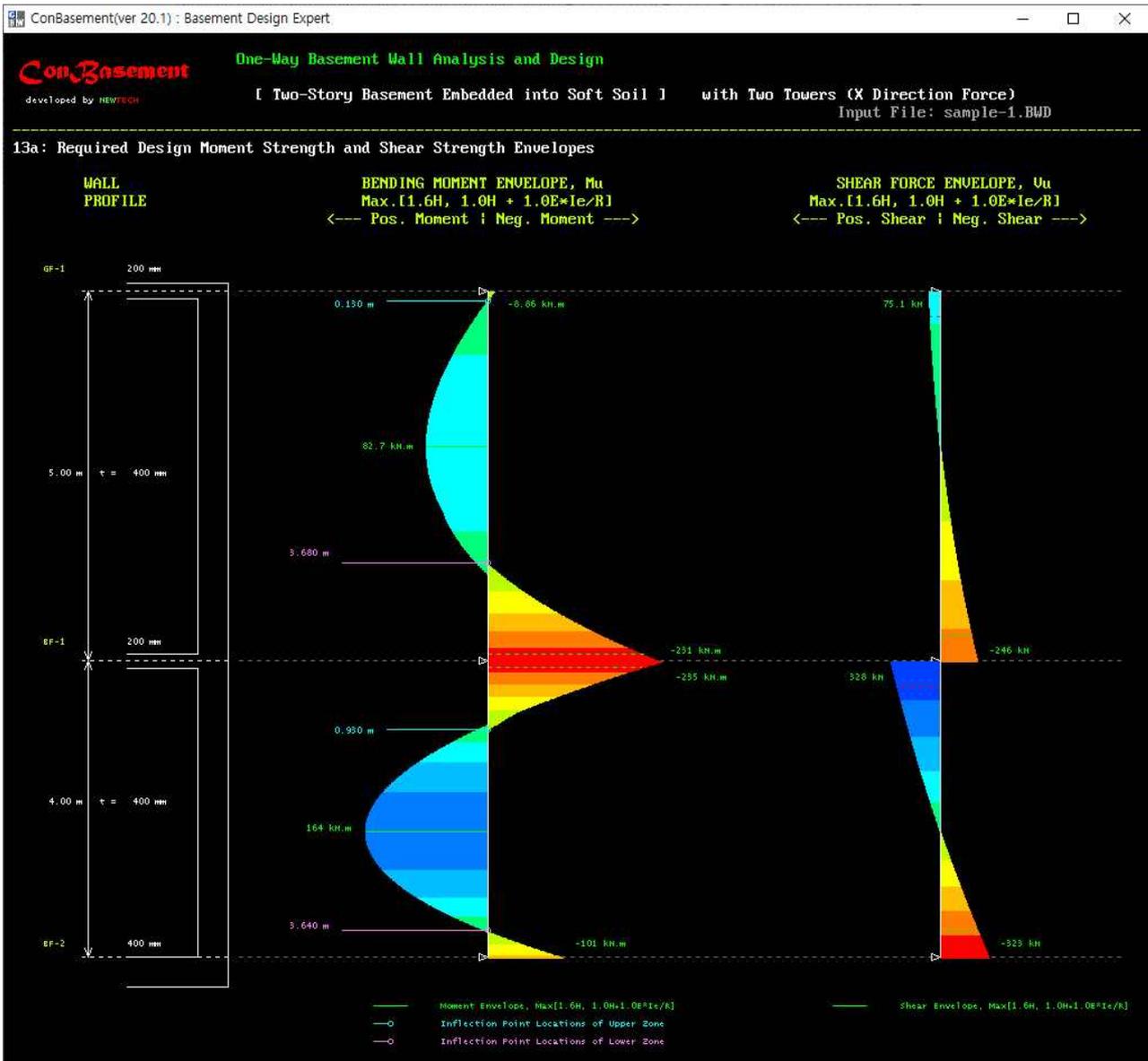
왼쪽부터 지하외벽 단면, 소요설계힘강도($1.6H$, $1.0H + 1.0EI_c/R$), 소요설계전단강도($1.6H$, $1.0H + 1.0EI_c/R$)

13. 최대 소요설계강도



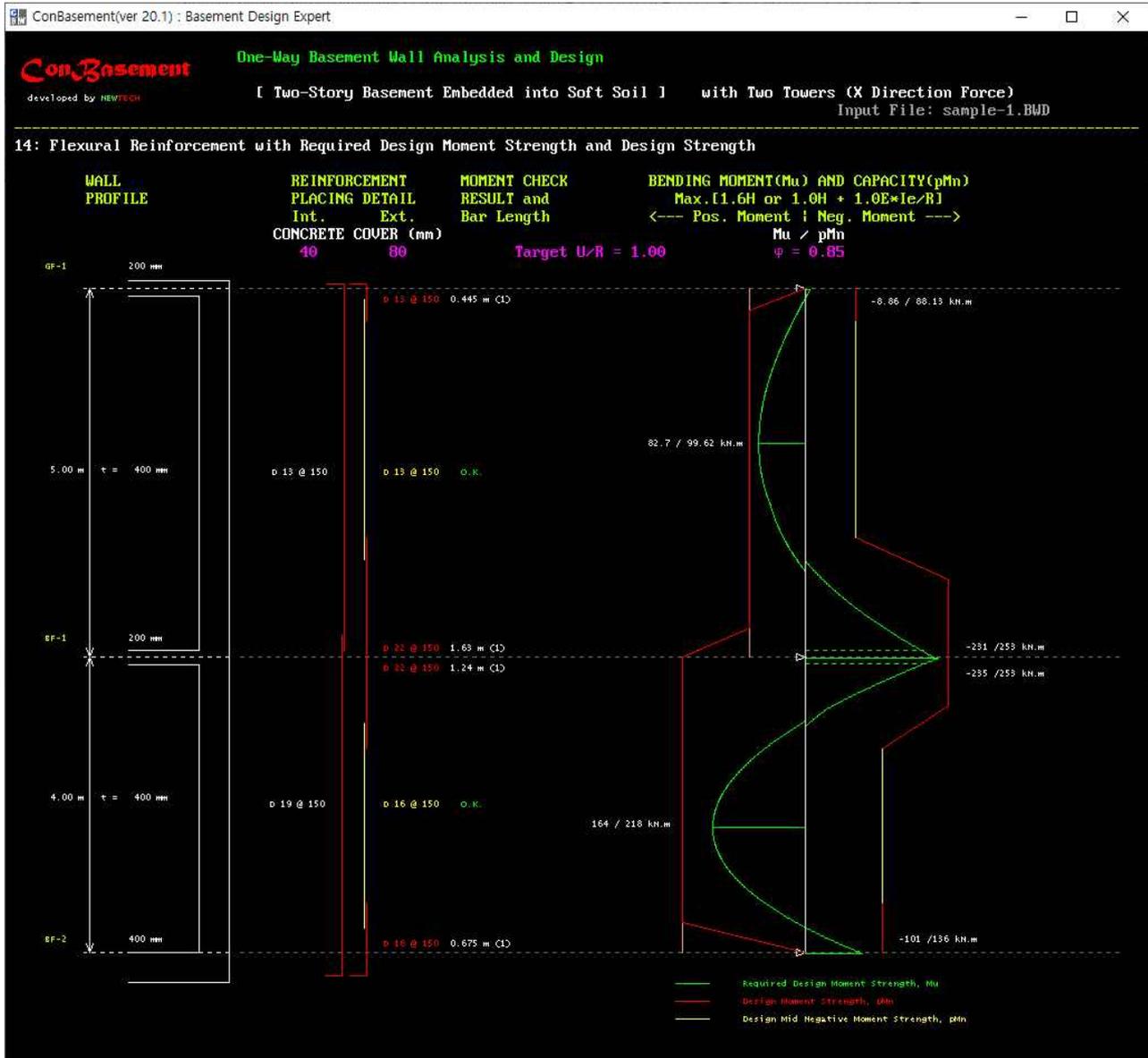
왼쪽부터 지하외벽 단면, 최대 소요설계힘강도(Moment Envelopes), 최대 소요설계전단강도(Shear Envelopes)

13a. 최대 소요설계강도



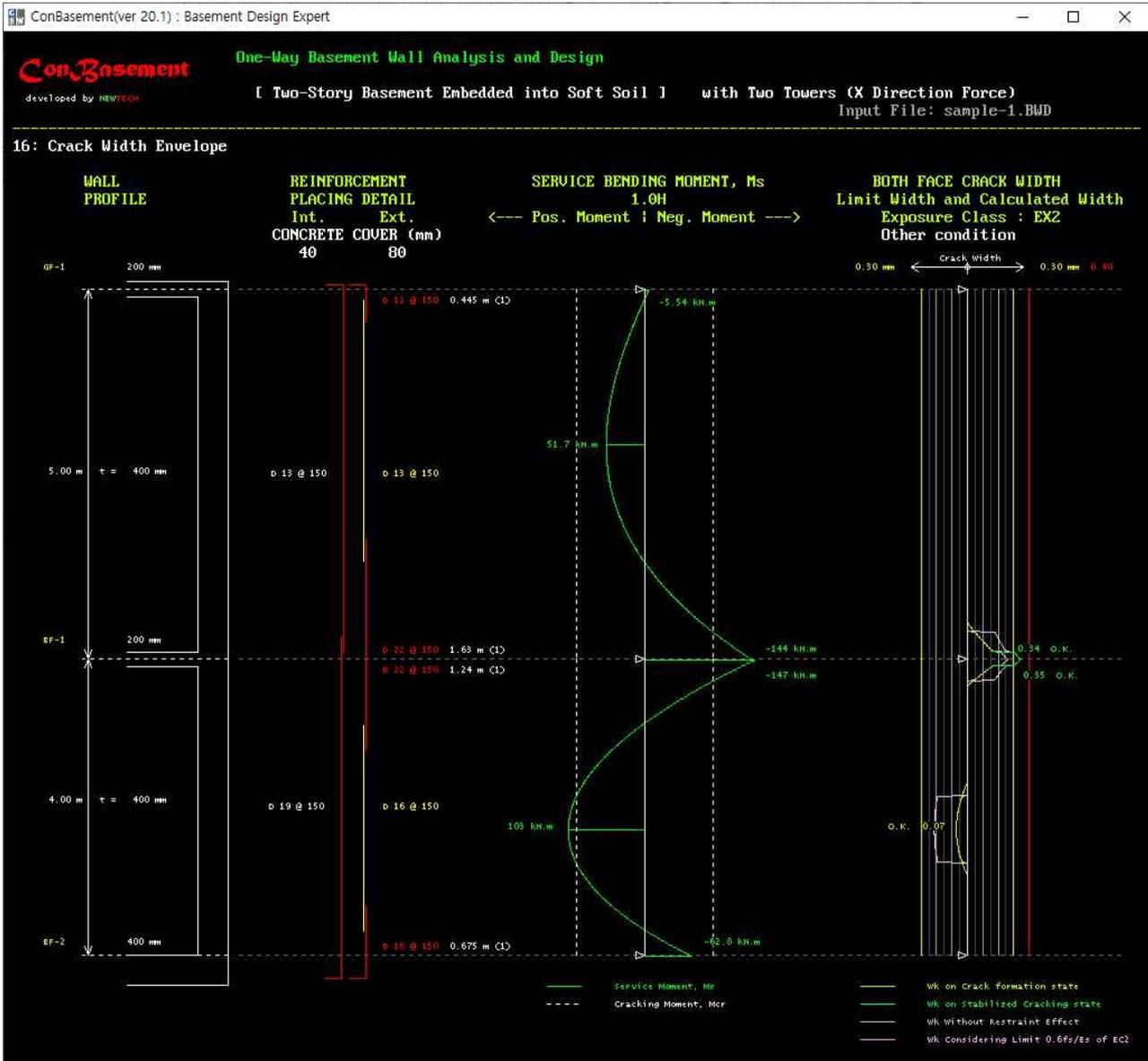
왼쪽부터 지하외벽 단면, 최대 소요설계힘강도(Moment Envelopes), 최대 소요설계전단강도(Shear Envelopes)

14. 휨철근 상세 및 소요설계휨강도/설계휨강도



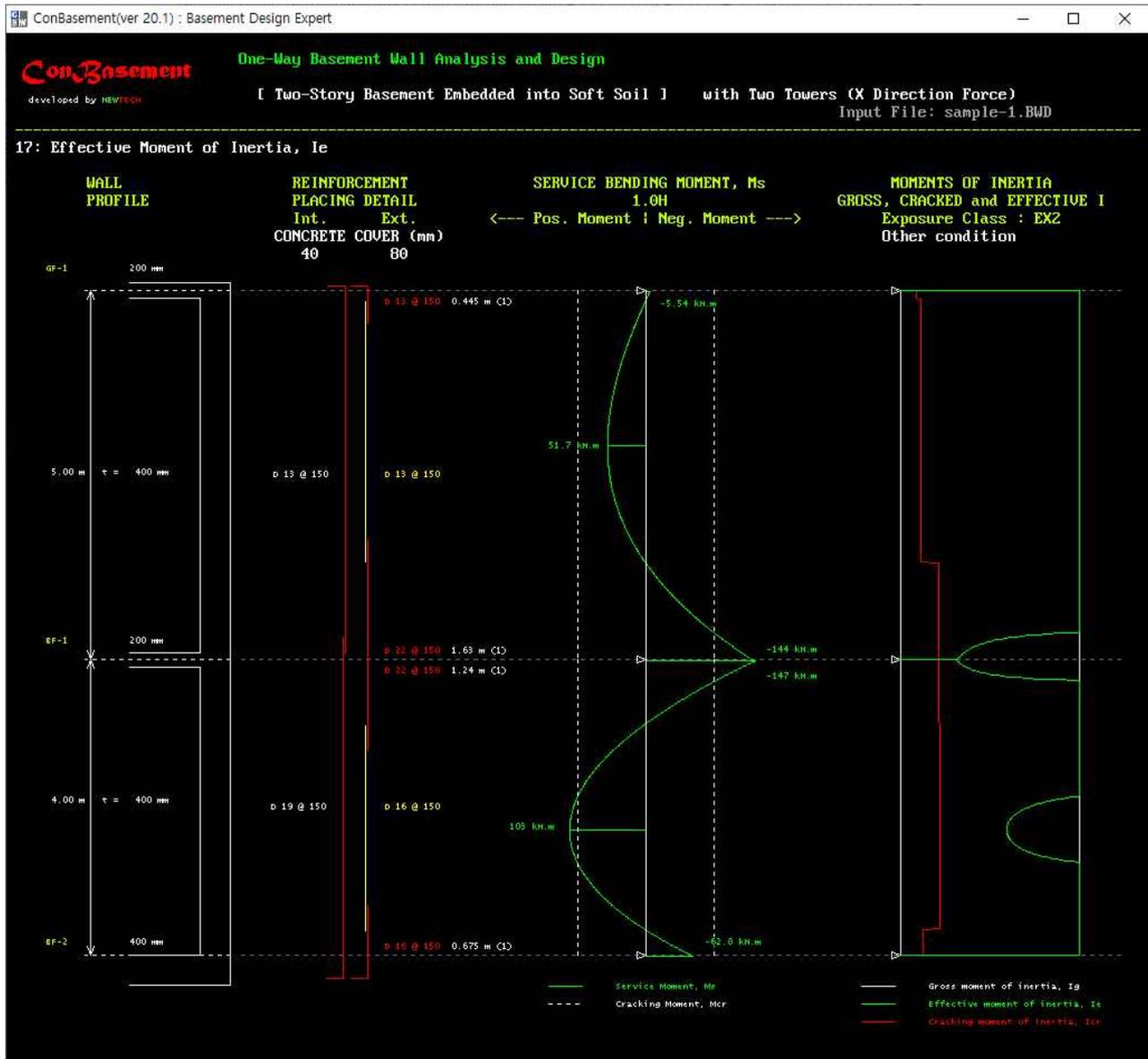
왼쪽부터 지하외벽 단면, 휨철근배근상세(철근 직경, 간격, 이음, 정착 등), 소요설계휨강도/설계휨강도 (Envelopes)

16. 균열폭 분포



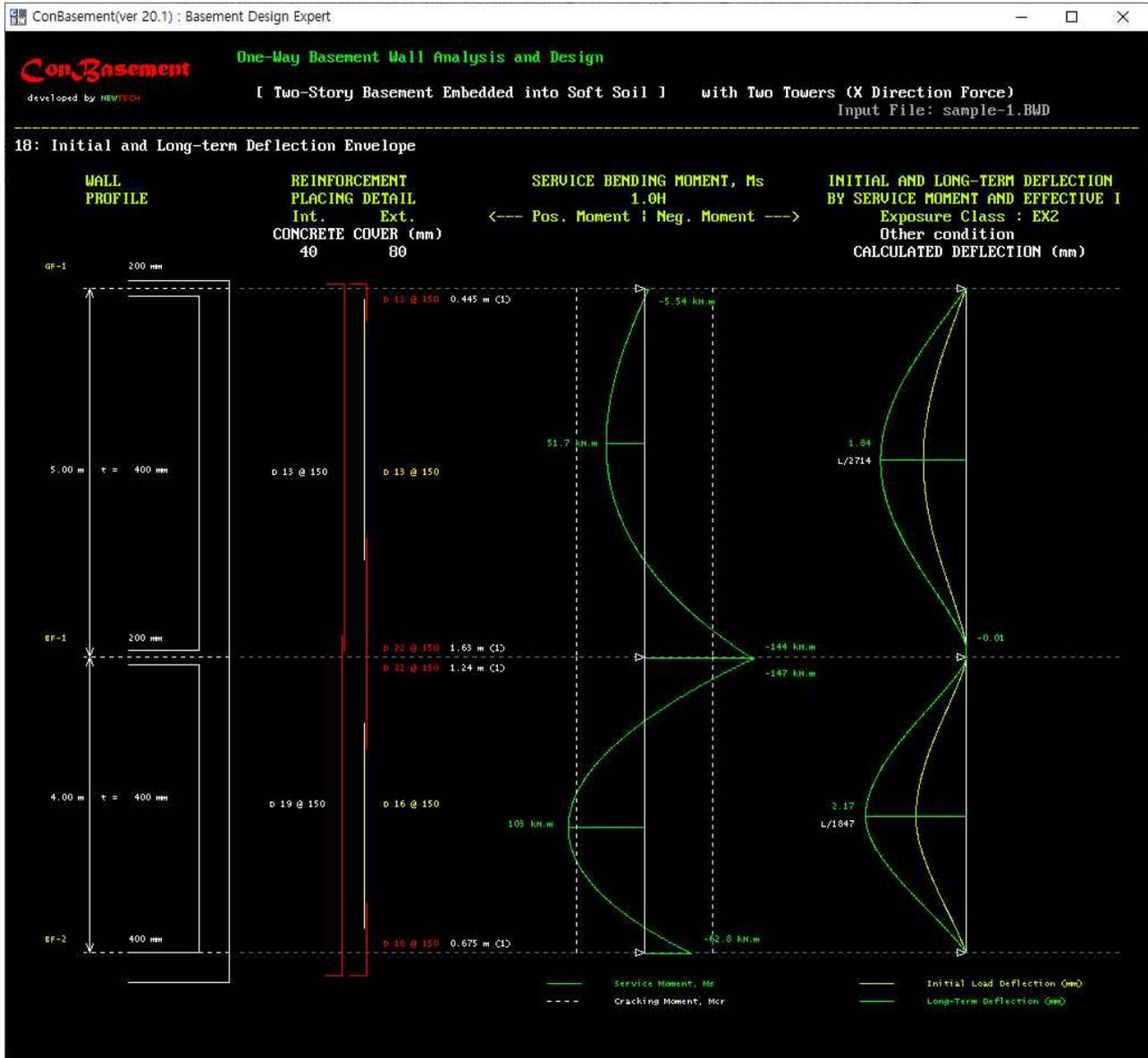
왼쪽부터 지하외벽 단면, 힘철근배근상세, 사용하중모멘트/균열모멘트, 균열폭(균열 상태별 구분)

17. 유효2차단면모멘트 분포



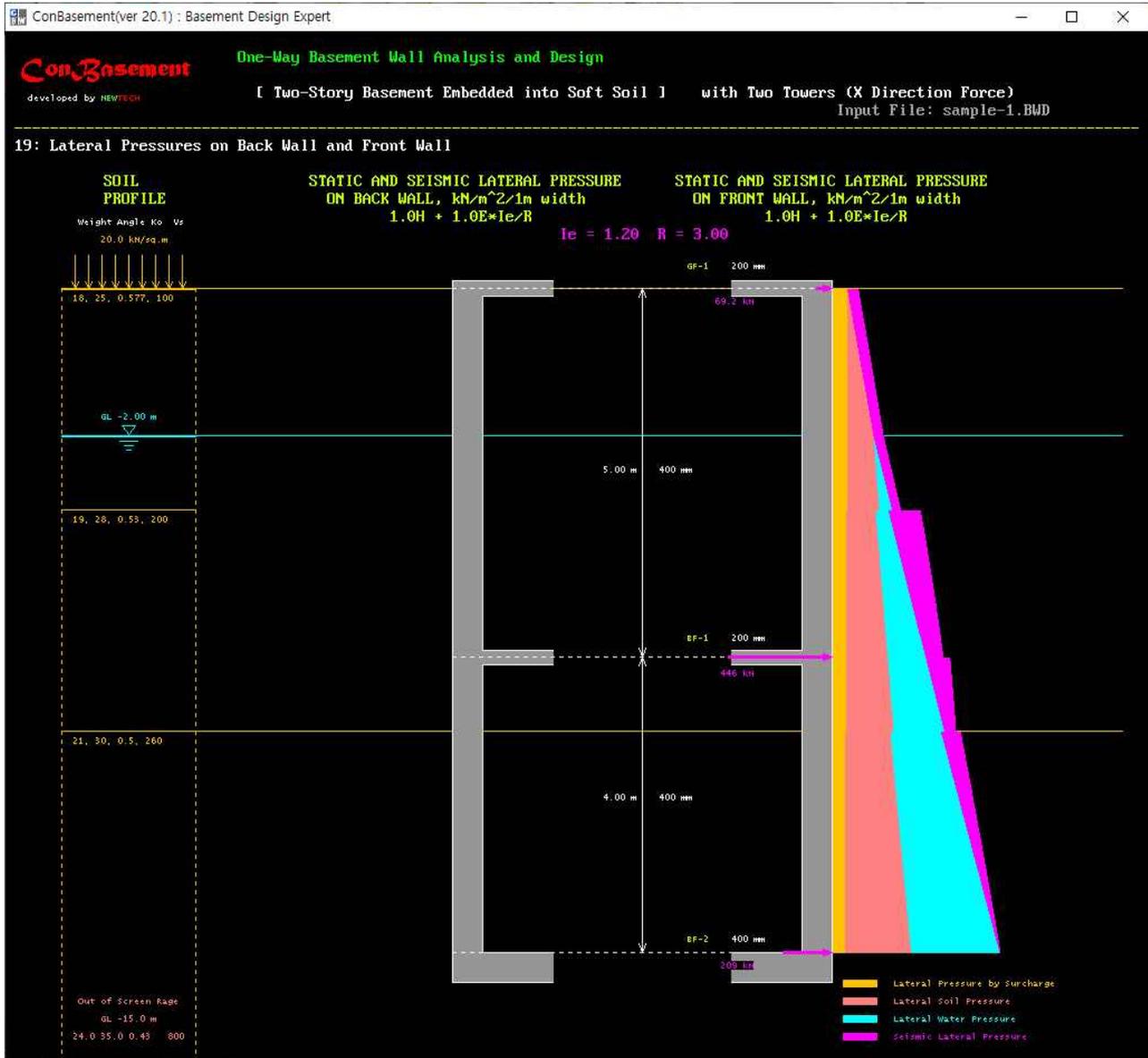
왼쪽부터 지하외벽 단면, 힘철근배근상세, 사용하중모멘트/균열모멘트, 2차단면모멘트(I_g , I_{cr} , I_{eff})

18. 처짐 분포



왼쪽부터 지하외벽 단면, 힘철근배근상세, 사용하중모멘트/균열모멘트, 처짐(초기처짐, 장기처짐)

19. 앞쪽 및 뒤쪽 벽에 작용하는 횡압(단위 폭) 분포, 전단벽설계용

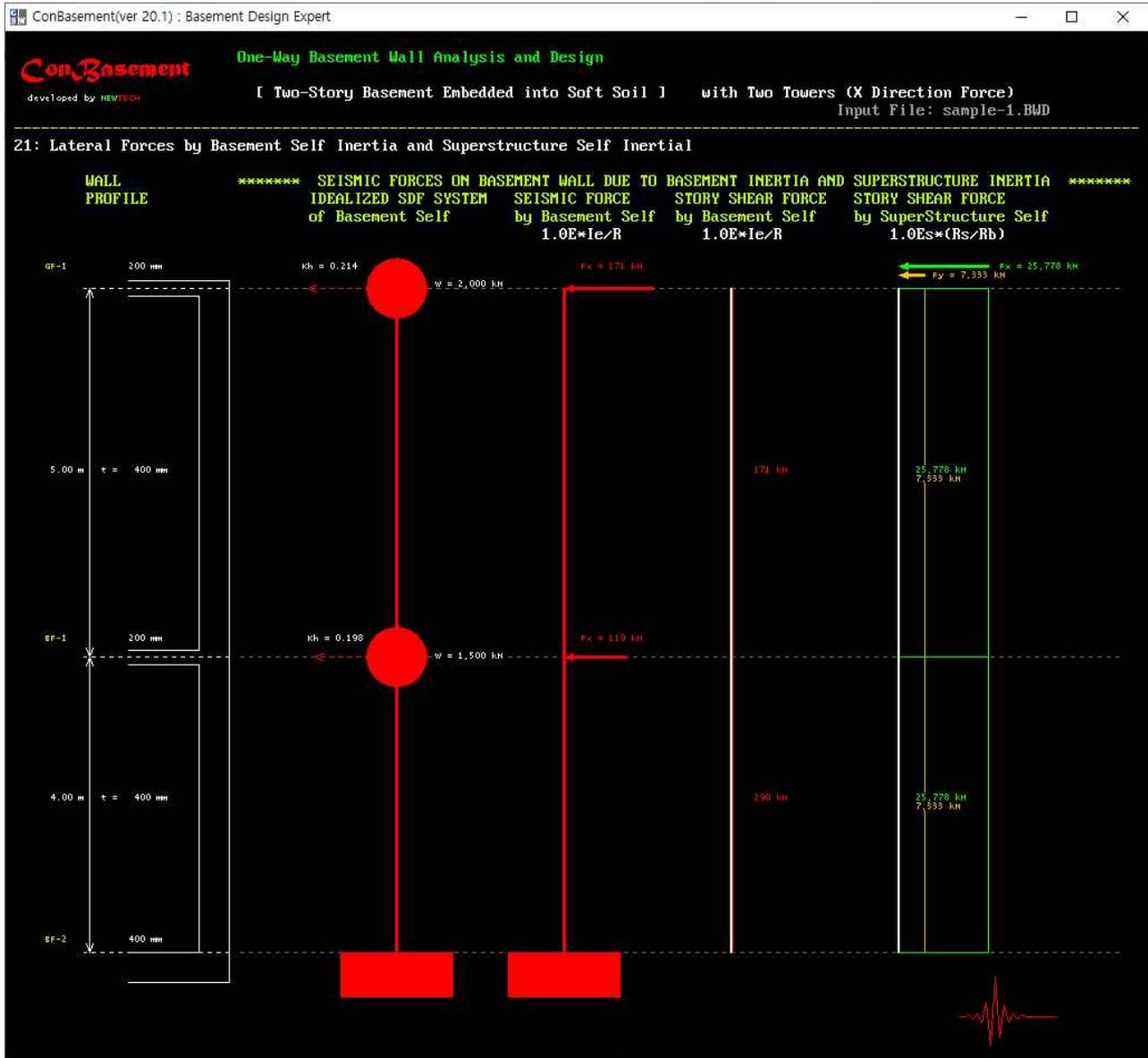


왼쪽부터 토층단면, 앞쪽 및 뒤쪽 지하외벽에 작용하는 지반 횡압 분포

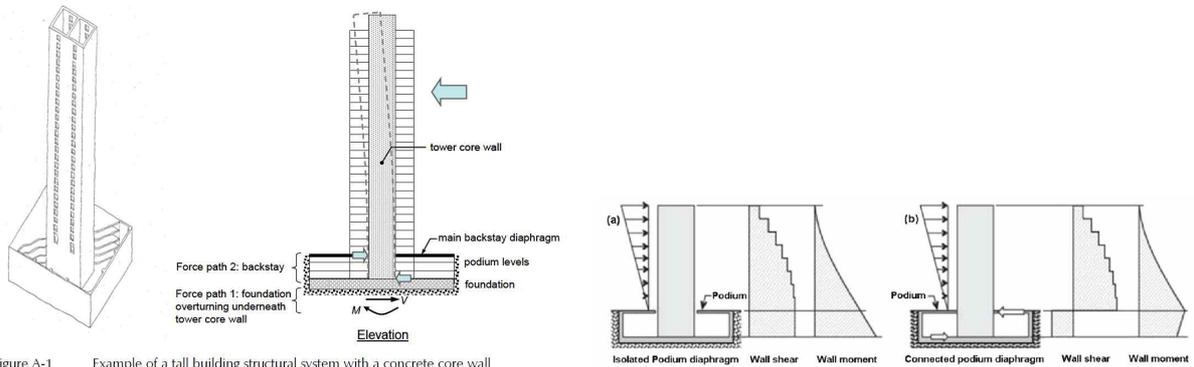
뒤쪽 지하외벽에 작용하는 지반의 정적 횡압 적용 여부는 사용자의 선택에 따름
 이 예는 뒤쪽 지하외벽에 작용하는 지반의 정적 횡압을 적용하지 않은 경우임.

이 화면부터 지하구조의 횡력저항시스템인 지하외벽으로 구성된 전단벽시스템에 대한 해석과 설계가 시작된다.

21. 지하 및 지상 구조의 지진하중에 의한 층 전단력, 전단벽 설계용



왼쪽부터 지하외벽 단면, 지하층 유효중량/수평가속도, 지하층관성력, 지하층관성력에 의한 층전단력, 지상부 밑면 전단력 및 전도모멘트에 의한 층전단력



22. 각 지하외벽 요소의 소요설계전단력 분포(단위 길이), 전단벽 설계용



X방향 하중 적용 시, 각 층의 분할 벽요소에 작용하는 전단력(Vu)의 분포(kN/m)

이 예는 뒤쪽 지하외벽에 작용하는 지반의 정적 횡압을 적용하지 않은 경우임.

23. 각 하중 효과에 의한 층 전단력(단위 길이), 전단벽 설계용



위 그림은 앞 그림 22의 전단력 분포 그래프에서 최대값을 갖는 전단벽요소에 대한 하중종류별 전단력 왼쪽부터 지하외벽 단면, 각 하중효과에 의한 층전단력(정적토압, 지진토압, 지하관성력, 지상관성력 영향), 소요설계전단강도

이 예는 뒤쪽 지하외벽에 작용하는 지반의 정적 횡압을 적용하지 않은 경우임.

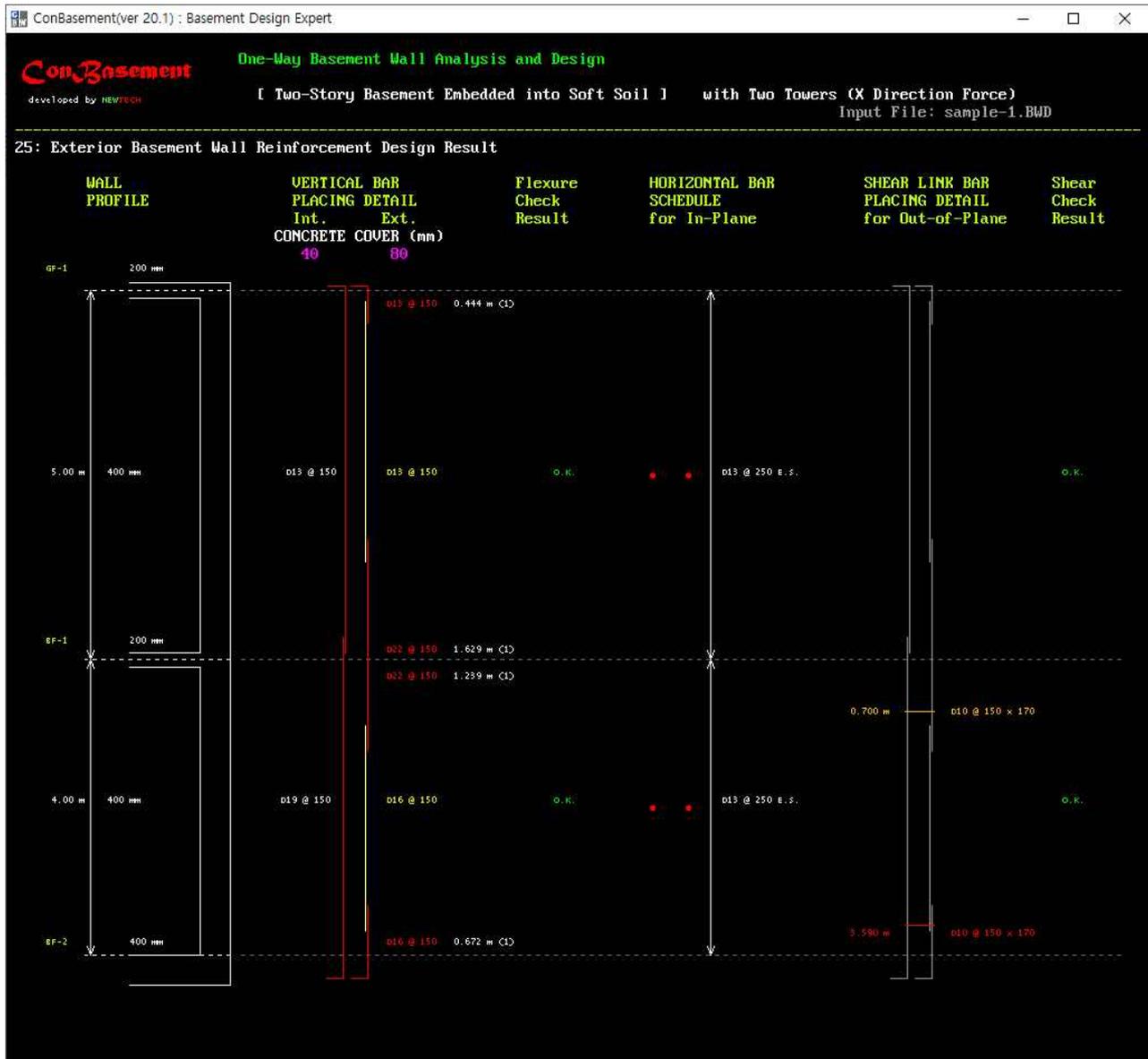
24. 전단벽으로서의 지하외벽 검토결과



왼쪽부터 지하외벽 단면, 토층단면/지진토압, 전단벽 검토결과(소요설계전단강도, 소요전단철근량, 콘크리트설계전단강도, 단면설계전단강도, 제한설계전단강도 등), 지진토압에 의한 수평변위(층변위, 국부변위)

이 예는 뒤쪽 지하외벽에 작용하는 지반의 정적 횡압을 적용하지 않은 경우임.

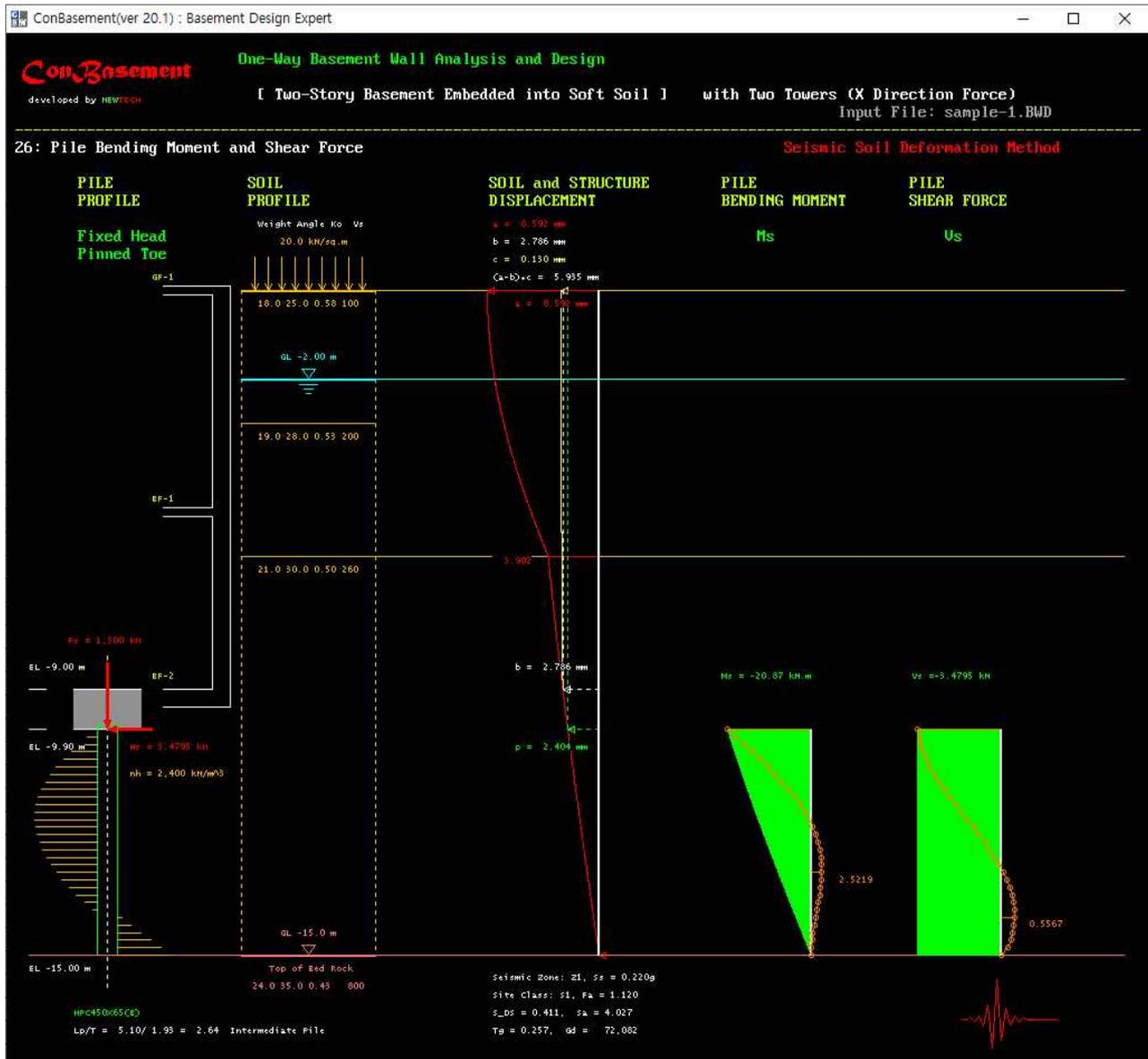
25. 면외하중 및 면내하중에 대해 모두 만족하는 지하외벽단면의 철근배근



왼쪽부터 지하외벽 단면, 수직철근배근, 수평철근배근, 면외하중에 대한 전단철근배근

위 화면은 면외하중 및 면내하중에 대해 독립적으로 모두 만족하는 지하외벽의 철근배근과 강도검토 결과

26. 지반 지진 수평변위에 의해 말뚝에 작용하는 휨모멘트와 전단력



왼쪽부터 지하외벽/말뚝 단면, 토층단면, 지반/구조 횡변위, 말뚝에 작용하는 휨모멘트 및 전단력 분포

27. 출력 데이터 다시보기, 및 화면그림파일 저장 및 보고서 만들기



초록색 숫자(1~26)가 있는 각 상자를 클릭하면 해당 화면이 재생된다.

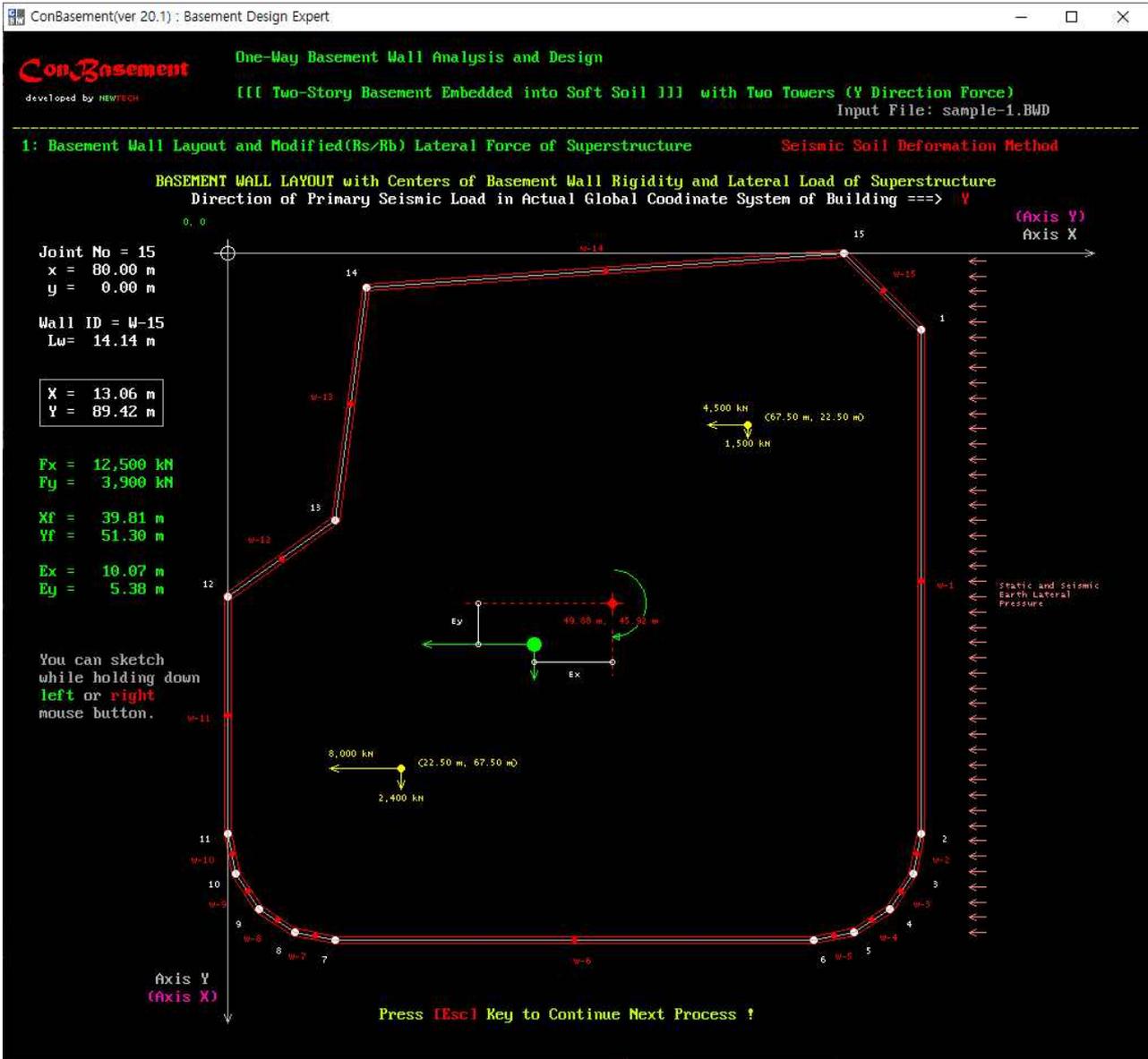
초록색 글씨 [All] 상자를 클릭하면 모든 화면의 그림파일이 저장된다.

노란색 숫자(1~3)가 있는 상자를 클릭하면 해당 보고서 파일이 열린다.

노란색 글씨 [All] 상자를 클릭하면 모든 보고서 파일이 열린다.

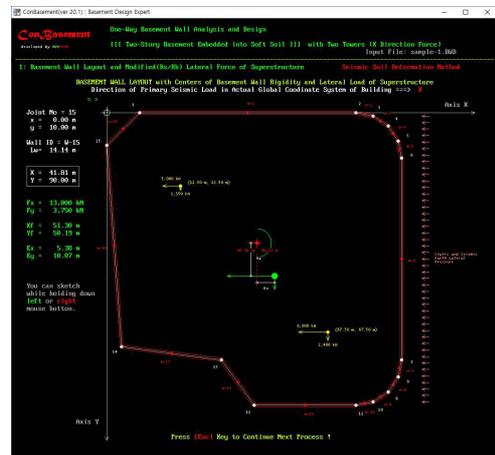
최하부에 Press [Enter] Key to Continue ! (또는 Terminate !) 구문이 나온 후 [Enter] Key를 누르면 보고서용 주요 그림파일들이 자동으로 저장된다. 이 그림파일들은 ConBasement-Editor에 의해 Brief Report에 자동으로 삽입된다.

1. 평면도 : Y방향 횡하중에 대한 해석 및 설계 시작



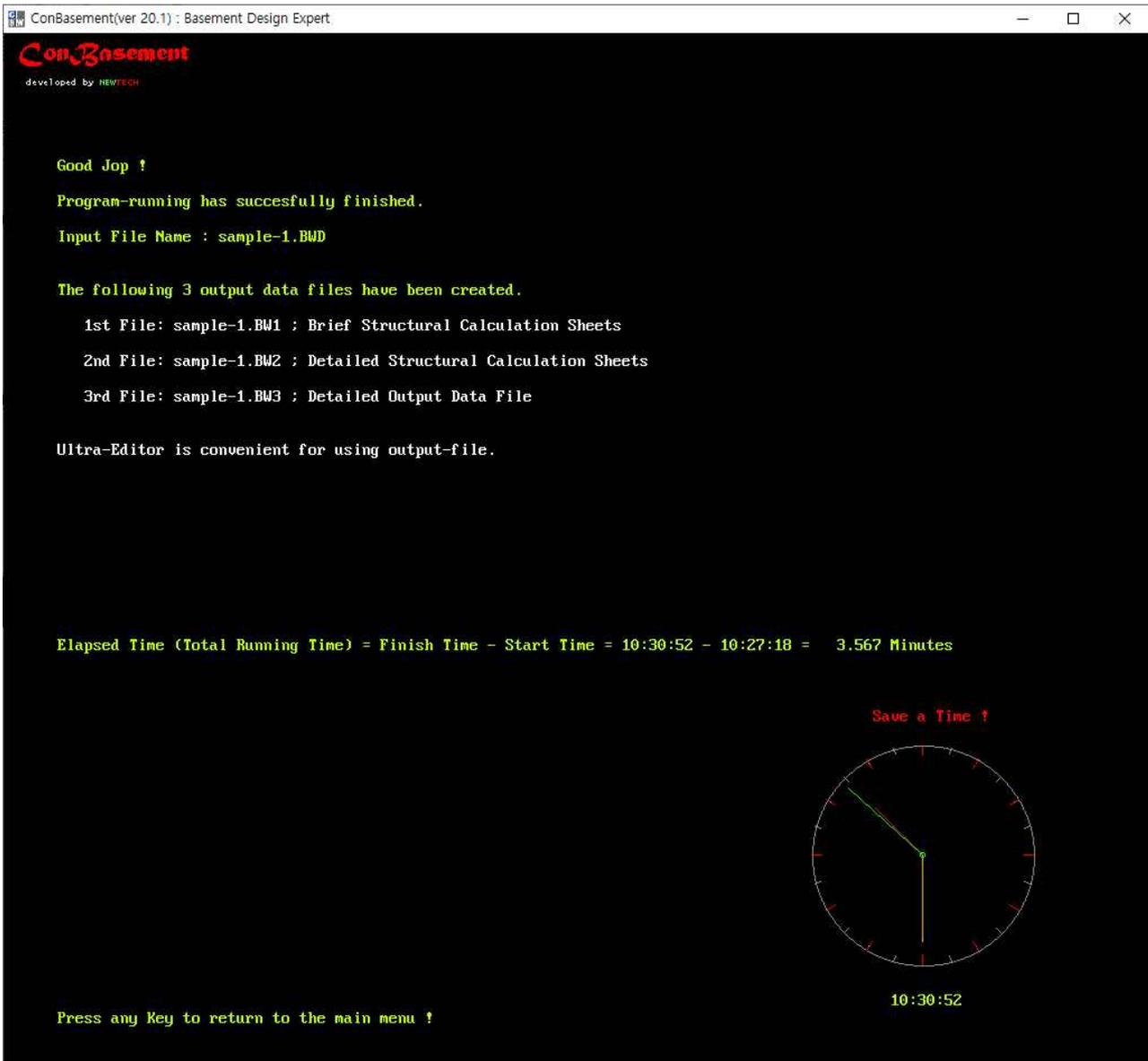
앞의 26개 화면들은 X방향 횡하중에 대한 것이다.

이 화면부터는 Y방향 횡하중에 대한 설계가 다시 연속적으로 시작된다. 앞의 X방향 횡하중에 대한 것과 같은 순서로 진행된다. 따라서 나머지 25개의 화면은 포함시키지 않았다.



X방향 횡하중에 대한 설계를 위한 평면도

ConBasement 종료 창



이 예(sample-1)의 X방향 및 Y방향 하중에 대한 해석과 설계에 약 4분 소요되었다.

이 예는 입력 자료가 준비된 상태에서
[입력파일 작성] ⇒ [해석 및 설계] ⇒ [보고서 작성] 까지 약 10분 소요되었다.

ConBasement Editor에 의한 출력 데이터 관리

- ConBasement 전용 Editor의 오른쪽 창에서 [.BWD], [.BW1], [.BW2], [.BW3] 또는 [.BWO]의 Tab을 클릭하면 해당 파일이 열린다.
- [.BWO] Tab을 클릭하면 [.BW1] 파일에 화면 그래픽 이미지를 포함시킨 보고서 파일이 작성된다.

상세 계산서(sample-1.BW3)

[Condition of Basement Bottom]
Basement Bottom Level = 9.40 m < Rock Top Level = 15.00 m ==> 5.60 m

[Seismic Design Parameters Based on Bedrock(Site Class S1)]
 * Spectral Response Acceleration Parameter at Short-Period : $S_s = 0.220g$
 * Short-Period Site Coefficient : $F_a = 1.120$
 * 1-second-Period Site Coefficient : $F_v = 0.840$
 * Effective Ground Acceleration : $S_a = 4.027$
 * Effective Ground Velocity : $S_v = 0.165$
 * Design Spectral Response Acceleration at Short period : $SDS = 55 \times 2.5^{F_a} \times 2/3 = 0.411$
 * Design Spectral Response Acceleration at 1-second period : $SOL = 55 \times F_v \times 2/3 = 0.123$
 * Seismic Design Category (More severe SDC in SDCs or SDC1) : $SDC = \text{Max}[C \text{ or } B] = C$

[Parameters for Analysis of Soil Free-Field Deformation]
 Total Soil Layer : $H = 15 \text{ m}$ $\Gamma_{\text{max}} = 20.00 \text{ kN/m}^3$ $V_s = 188 \text{ m/s}$ $\nu_u = 0.339$
 Upper Soil Layer : $H_1 = 6 \text{ m}$ $\Gamma_{\text{max}1} = 18.50 \text{ kN/m}^3$ $V_{s1} = 133 \text{ m/s}$ $\nu_{u1} = 0.373$
 Lower Soil Layer : $H_2 = 9 \text{ m}$ $\Gamma_{\text{max}2} = 21.00 \text{ kN/m}^3$ $V_{s2} = 260 \text{ m/s}$ $\nu_{u2} = 0.320$
 Impedance Ratio : $\alpha = (\Gamma_{\text{max}1} \times V_{s1}) / (\Gamma_{\text{max}2} \times V_{s2}) = (18.5 \times 133) / (21.0 \times 260) = 0.452$
 Site Fundamental Natural Frequency : $\omega_{og} = 24.430 \text{ rad/sec}$ (Circular nature frequency)
 Average Dynamic Shear Modulus of Soil : $G_d = 72,082 \text{ kN/m}^2$

[Lateral Wall-Soil Reaction Stiffness]
Estimate Method : Three Constant Wall-Soil Stiffnesses in Table c6-1 of AIK Seismic Design Guide used each adjacent soil's V_s

[Soil Free-Field Lateral Deformation and Seismic Pressure on Front Wall]
 * Used Not Modified F_a and F_v
 * Seismic Earth Pressure Distribution Shape : Double Quarter Cosine Distribution.

z	Depth(z) m	U(z) mm	U(z, Building) mm	U(z, B)mm	KH(z) kN/m ³	Seismic Lateral p(z) kN/m ²
1	0.01	8.5915	2.7861	0.1308	5.8854	4.082
2	0.02	8.5915	2.7861	0.1308	5.8854	4.082
3	0.03	8.5914	2.7861	0.1299	5.8853	4.082
4	0.04	8.5913	2.7861	0.1299	5.8852	4.082
5	0.05	8.5912	2.7861	0.1298	5.8850	4.082
6	0.06	8.5910	2.7861	0.1298	5.8849	4.082
7	0.07	8.5908	2.7861	0.1297	5.8847	4.082
8	0.08	8.5906	2.7861	0.1297	5.8845	4.082
9	0.09	8.5904	2.7861	0.1296	5.8842	4.082
10	0.10	8.5901	2.7861	0.1296	5.8840	4.082
11	0.11	8.5898	2.7861	0.1295	5.8837	4.082
12	0.12	8.5895	2.7861	0.1295	5.8833	4.082
13	0.13	8.5891	2.7861	0.1294	5.8830	4.082
14	0.14	8.5887	2.7861	0.1293	5.8826	4.082
15	0.15	8.5883	2.7861	0.1293	5.8822	4.082
16	0.16	8.5879	2.7861	0.1292	5.8817	4.082
17	0.17	8.5874	2.7861	0.1292	5.8812	4.082
18	0.18	8.5869	2.7861	0.1291	5.8807	4.082
19	0.19	8.5863	2.7861	0.1291	5.8802	4.082

화면 이미지가 포함된 보고서(sample-1.BWO)

[Approximate Design Story Displacement and Drift for In-Plane Shear Force due to Seismic Soil Pressure]

Floor Level	Story Height (m)	Elastic Story Total Disp. dxe,t (mm)	Design Story Total Disp. dx = dxe,t * Cd / Ie (mm)	Interstory Drift delta (mm)	Interstory Drift Ratio (%)
Upper ~ Lower					
GF-1 ~ BF-1	5.00	0.0624	0.0624 * 2.50 / 1.20 = 0.130	0.0254	0.00053
BF-1 ~ BF-2	4.00	0.0497	0.0497 * 2.50 / 1.20 = 0.104	0.1036	0.00259

H. Pile Bending Moment and Shear Force

* Pile Section Type : HPC450X65(S)
 * Pile Properties : Dia. = 450 mm $E_p = 40,000 \text{ MPa}$ $I_p = 1,600,000,000 \text{ mm}^4$
 * Pile Cap : Thickness = 900 mm Bottom Level = -9.90 m
 * Pile Length : $L_p = 5,100 \text{ m}$
 * Characteristic Length of The Soil-Pile System :
 $n_h = 2,400 \text{ kN/m}^3$ $T = 1.9284 \text{ m}$ $\text{MAX } Z = L/T = 5.10 / 1.928 = 2.645 \text{ ==> Intermediate Pile}$

* Axial Force from Input Data of User : $P_s = 1,300 \text{ kN}$ (Compression under service load)
 * Displacement at Top Level of Pile : $U(bp) = 2.40 \text{ mm}$ (Lateral displacement at bottom level of pile cap)
 * Bending Moment at Top Level of Pile : $M_s = (P_s + 3E_p I_p / L_p^2) * U(bp) = -20.87 \text{ kN.m}$ (under service load)
 * Shear Force at Top Level of Pile : $V_s = (3E_p I_p / L_p^3) * U(bp) = -3.48 \text{ kN}$ (under service load)

Graphic Report:
 One Way Basement Wall Analysis and Design
 (1) Two-Story Basement Embedded into Soft Soil (1) with Two Towers (X Direction Force)
 Input File: sample-1.BWD
 1) Basement Wall Layout and Modified (Ro/Rb) Lateral Force of Superstructure
 Seismic Soil Reaction Method
 BASEMENT WALL LAYOUT with Centers of Basement Wall Rigidity and Lateral Load of Superstructure
 Direction of Primary Seismic Load in Actual Global Coordinate System of Building ==>

깊은 지하구조물의 뒷벽에 정적토압/수압 및 스프링지지력을 고려한 경우의 예

다음 그림1-4와 같이 1차 해석에서 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위가 지반의 상대변위를 초과하는 경우에는 지침에 따라서 다음과 같이 뒷벽에 횡스프링지지력을 고려한다.

(a) Case 1

그림1-4(a)는 지하구조의 횡변위가 하부층에서만 초과한 경우이다. 이 경우는 지침 2.5(3)의 ②에 해당되며, 1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위를 직접 적용하여 뒷벽에 발현되는 횡스프링지지력을 산정하여 2차 해석에 고려할 수 있다.

(b) Case 2

그림1-4(b)는 지하구조의 횡변위가 모든 층에서 초과한 경우이다. 이 경우는 지침 2.5(3)의 ③에 해당되며, 1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위를 1층에 해당하는 지반변위에 일치하도록 조정하여 이 조정된 횡변위를 적용하여 뒷벽에 발현되는 횡스프링지지력을 산정하여 2차 해석에 고려할 수 있다.

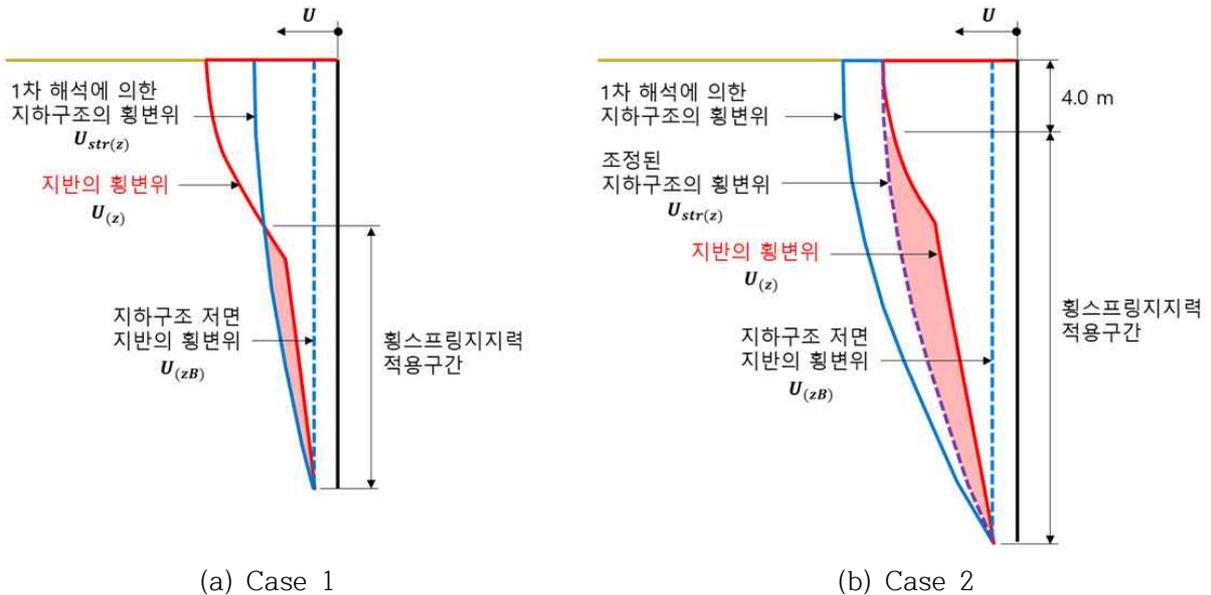


그림1-4. 뒷벽의 횡스프링지지력 적용구간

반대쪽에 위치한 외벽면에 작용하는 횡스프링지지력(횡하중)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$(u(z) - u_{(zB)}) \geq u_{str(z)} \text{인 구간, 횡스프링지지력} = \text{횡하중} = p(z) = 0$$

$$(u(z) - u_{(zB)}) < u_{str(z)} \text{인 구간, 횡스프링지지력} = \text{횡하중} = p(z) = [(u(z) - u_{(zB)}) - u_{str(z)}] K_{H(z)}$$

여기서, $u(z)$ = 지반의 지진횡변위, $u_{(zB)}$ = 지하구조물 저면 지반의 지진횡변위, $u_{str(z)}$ = 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위, $K_{H(z)}$ = 수평지반반력계수, z = 지표면으로부터 고려하는 깊이

[유의사항] 지침 해설 2.5(3)의 ③에 의하면 지하구조의 변위가 지반의 상대변위를 초과하지 않아야 한다. 즉, 지반의 상대변위에 따른 지진토압을 적용하여 내진설계 검토 시 각층에 대한 최종 지하구조물의 변위는 각층에 대응하는 지반의 상대변위보다 작아야 한다. 따라서 지하의 지진력저항시스템에 대한 1차 해석에서 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위가 지반의 지진 횡변위 보다 큰 경우에는 뒷벽에 횡스프링지지력을 추가로 고려한 2차 해석에 의해 지하구조의 횡변위가 지반의 횡변위를 초과하지 않도록 하여 합리적인 설계를 도모해야 한다. 또한, 상부 4m 구간에는 횡스프링지지력이 발생하는 조건이라도 횡스프링지지력을 적용하지 않아야 한다.

Case 1 : 기반암에 일부 묻힌 지하 8층 구조(기반암 깊이 22.5m)의 예

이 예는 1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위가 하부층에서만 초과한 경우이다. 이 경우는 지침 2.5(3)의 ②에 해당되며, 합리적인 설계를 위해서 1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위를 2차 해석에 직접 적용하여 뒷벽에 발현되는 횡스프링지지력을 고려한다.

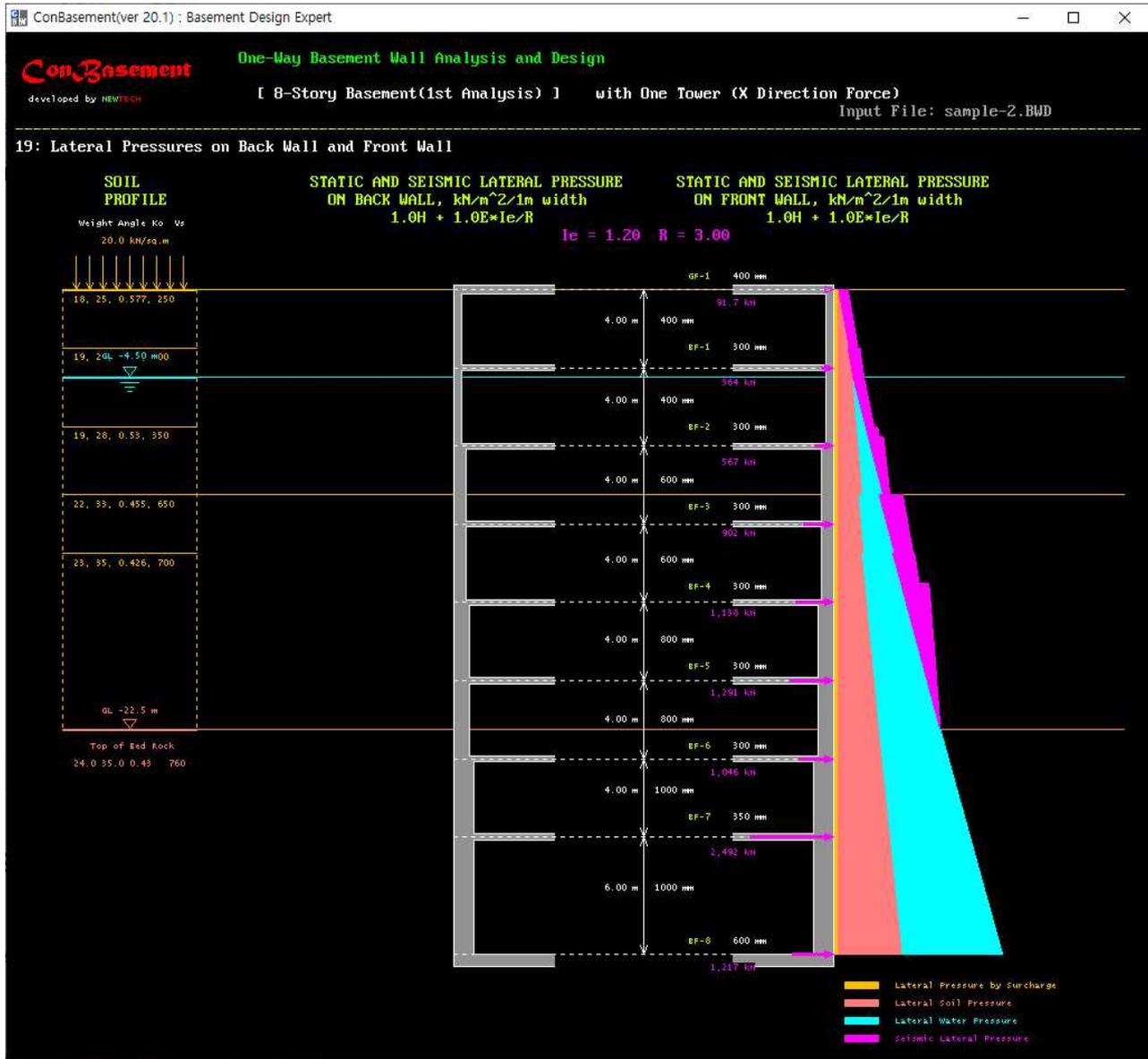
1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위



지반과 구조의 횡변위 그래프에서 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위(노란색 곡선)가 하부층에서 지진에 의한 지반의 횡변위(빨간색 곡선)를 초과한다.

Case 1 : 기반암에 일부 묻힌 지하 8층 구조(기반암 깊이 22.5m)의 예

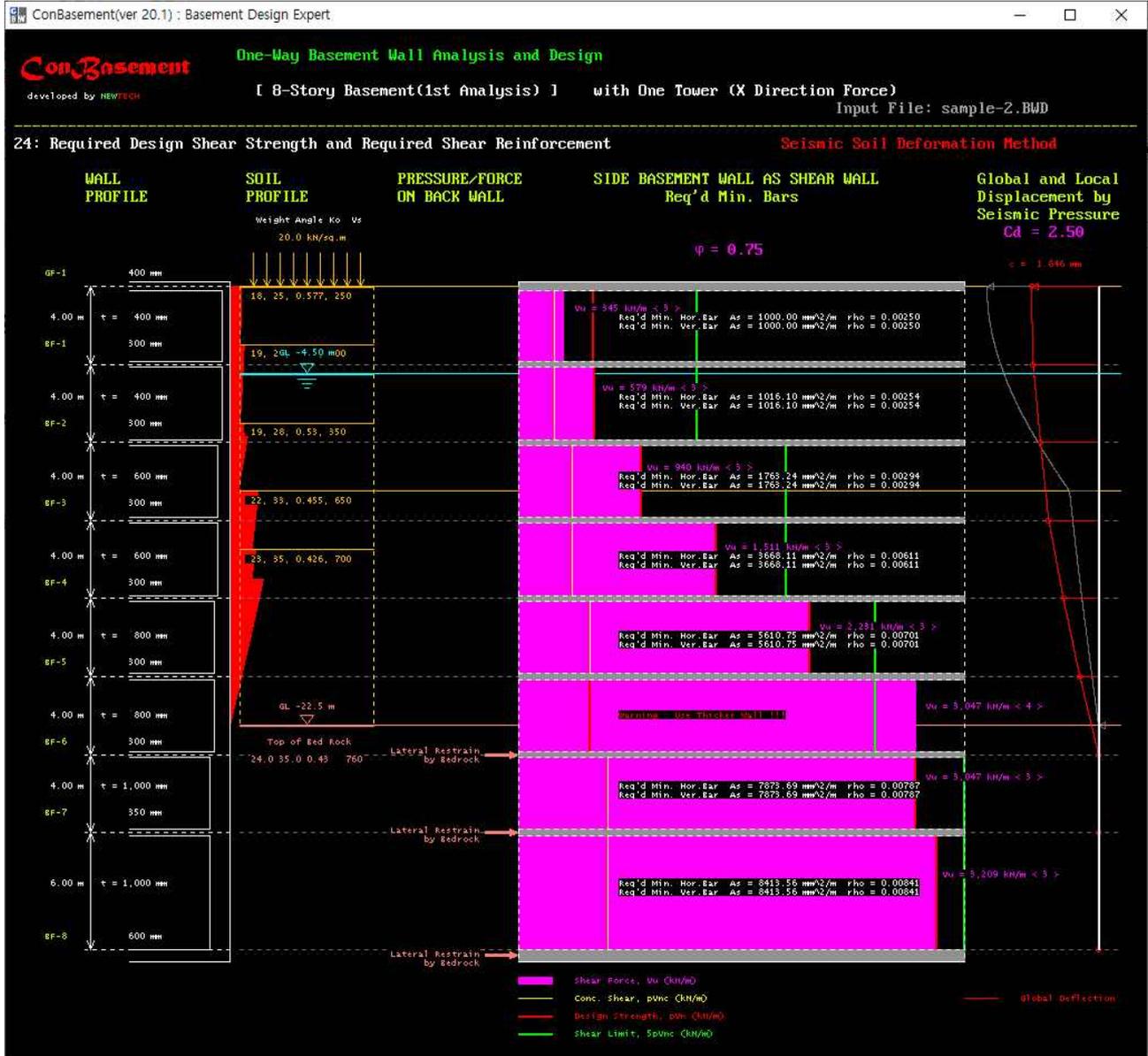
1차 해석에 의한 지하구조에 작용하는 횡력



이 예는 1차 해석에서 뒷벽에 기반암에 의한 횡구속만 고려하고 추가 횡하중(정적횡압, 스프링지지력)을 고려하지 않는 경우이다.

Case 1 : 기반암에 일부 묻힌 지하 8층 구조(기반암 깊이 22.5m)의 예

1차 해석에 의한 지하구조 외벽(전단벽)의 면내 설계소요전단강도와 소요철근



1차 해석에 의한 지진력저항시스템의 설계결과

구분	면내 전단강도			지진토압에 의한 지하구조의 횡변위		
	두께(mm)	소요수평철근비	소요수직철근비	위치	결과	
				1층 바닥	지반의 횡변위보다 작음	
지하 1층	400	-	0.00250	0.00250	지하 1층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 2층	400	-	0.00254	0.00254	지하 2층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 3층	600	-	0.00294	0.00294	지하 3층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 4층	600	-	0.00611	0.00611	지하 4층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 5층	800	-	0.00701	0.00701	지하 5층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 6층	800	부족	제한 초과	제한 초과	지하 6층 바닥	기반암에 의한 횡구속
지하 7층	1000	-	0.00787	0.00787	지하 7층 바닥	기반암에 의한 횡구속
지하 8층	1000	-	0.00841	0.00841	지하 8층 바닥	기반암에 의한 횡구속

Case 1 : 기반암에 일부 묻힌 지하 8층 구조(기반암 깊이 22.5m)의 예

2차 해석에 의한 지하구조의 횡변위

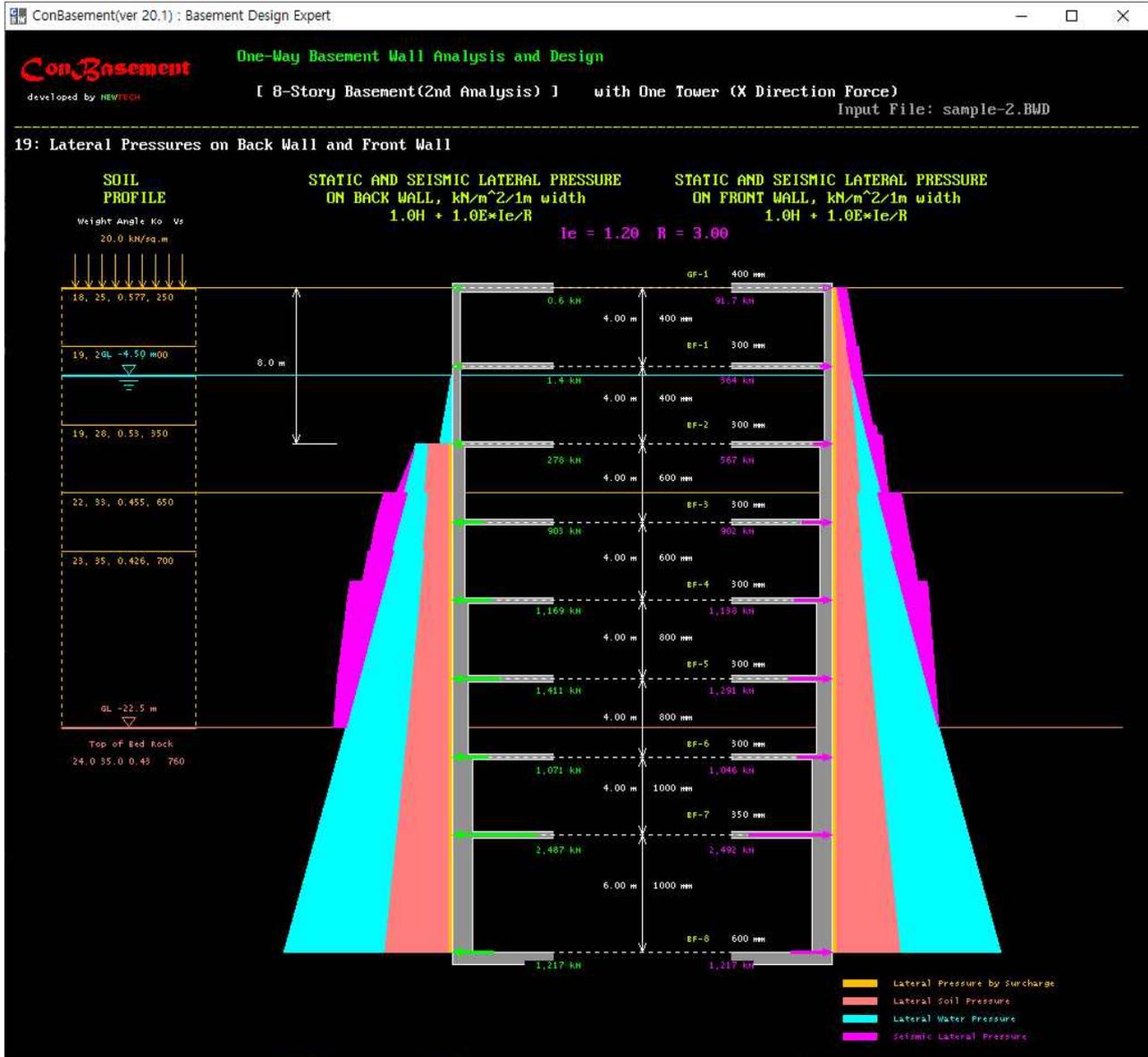


지반과 구조의 횡변위 그래프에서 청보라색의 곡선은 1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위, 빨간색의 곡선은 지반의 횡변위, 노란색의 곡선은 뒷벽에 횡스프링지지력을 추가로 고려한 2차해석에 의한 지하구조의 횡변위를 나타낸다.

2차 해석에 의한 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위(노란색 곡선)는 지진에 의한 지반의 횡변위(빨간색 곡선)보다 작다.

Case 1 : 기반암에 일부 묻힌 지하 8층 구조(기반암 깊이 22.5m)의 예

2차 해석에 의한 지하구조에 작용하는 횡력



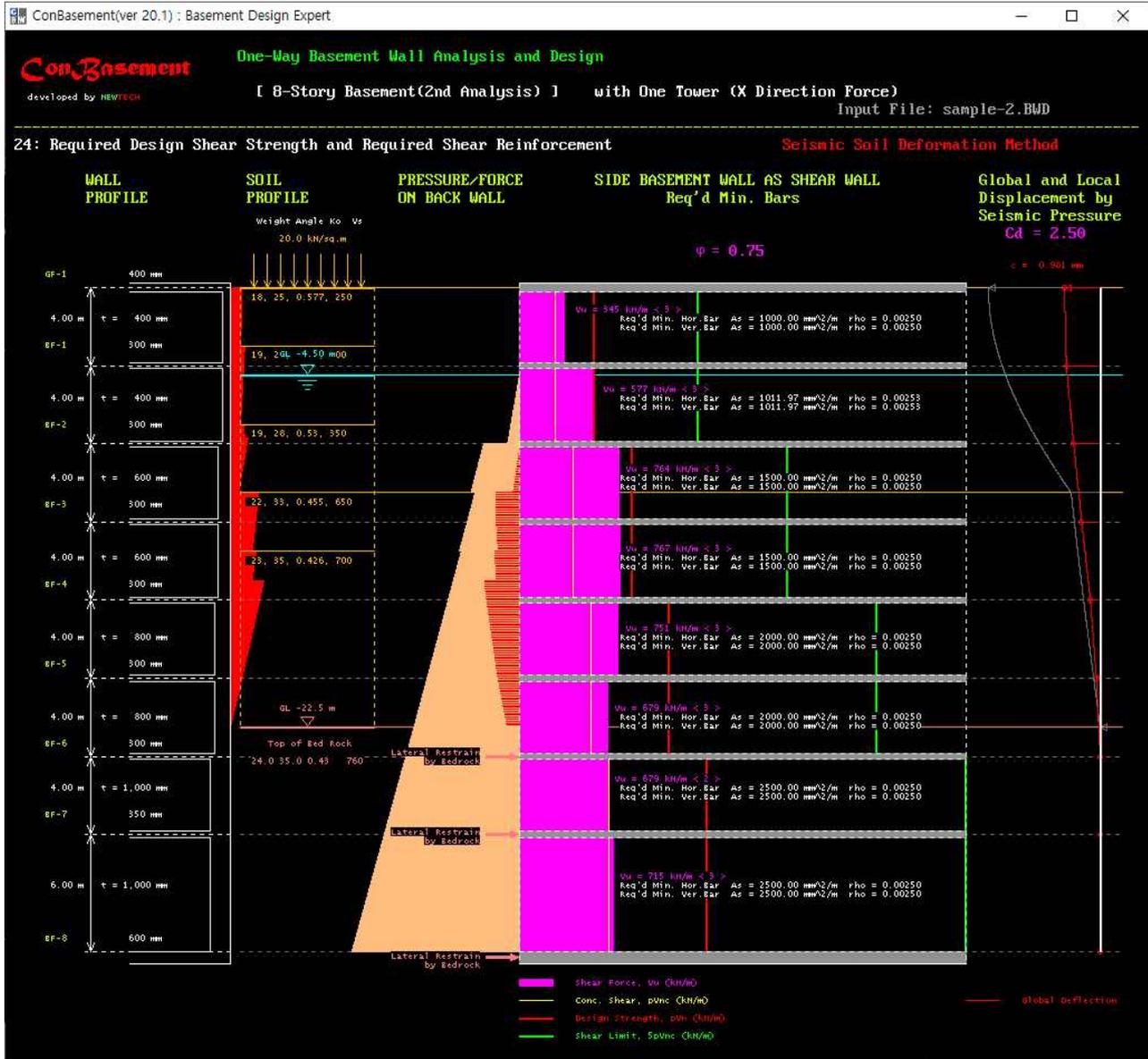
이 예는 2차 해석에서 뒷벽에 기반암에 의한 횡구속과 추가로 고려한 횡하중(정적횡압, 스프링지지력)을 고려한 경우이다.

위 그림에서 오른쪽 벽은 앞벽을 의미하며, 가장 오른쪽에 있는 분홍색은 지반변위에 의한 지진토압의 분포를 나타낸다.

위 그림에서 왼쪽 벽은 뒷벽을 의미하며, 가장 왼쪽에 있는 분홍색은 앞벽에 작용하는 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위에 의해 발현된 횡스프링지지력의 분포를 나타낸다.

Case 1 : 기반암에 일부 묻힌 지하 8층 구조(기반암 깊이 22.5m)의 예

2차 해석에 의한 지하구조 외벽(전단벽)의 면내 설계소요전단강도와 소요철근



2차 해석에 의한 지진력저항시스템의 설계결과

	면내 전단강도				지진토압에 의한 지하구조의 횡변위	
	두께(mm)		소요수평철근비	소요수직철근비	위치	결과
					1층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 1층	400	적합	0.00250	0.00250	지하 1층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 2층	400	적합	0.00253	0.00253	지하 2층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 3층	600	적합	0.00250	0.00250	지하 3층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 4층	600	적합	0.00250	0.00250	지하 4층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 5층	800	적합	0.00250	0.00250	지하 5층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 6층	800	적합	0.00250	0.00250	지하 6층 바닥	기반암에 의한 횡구속
지하 7층	1000	적합	0.00250	0.00250	지하 7층 바닥	기반암에 의한 횡구속
지하 8층	1000	적합	0.00250	0.00250	지하 8층 바닥	기반암에 의한 횡구속

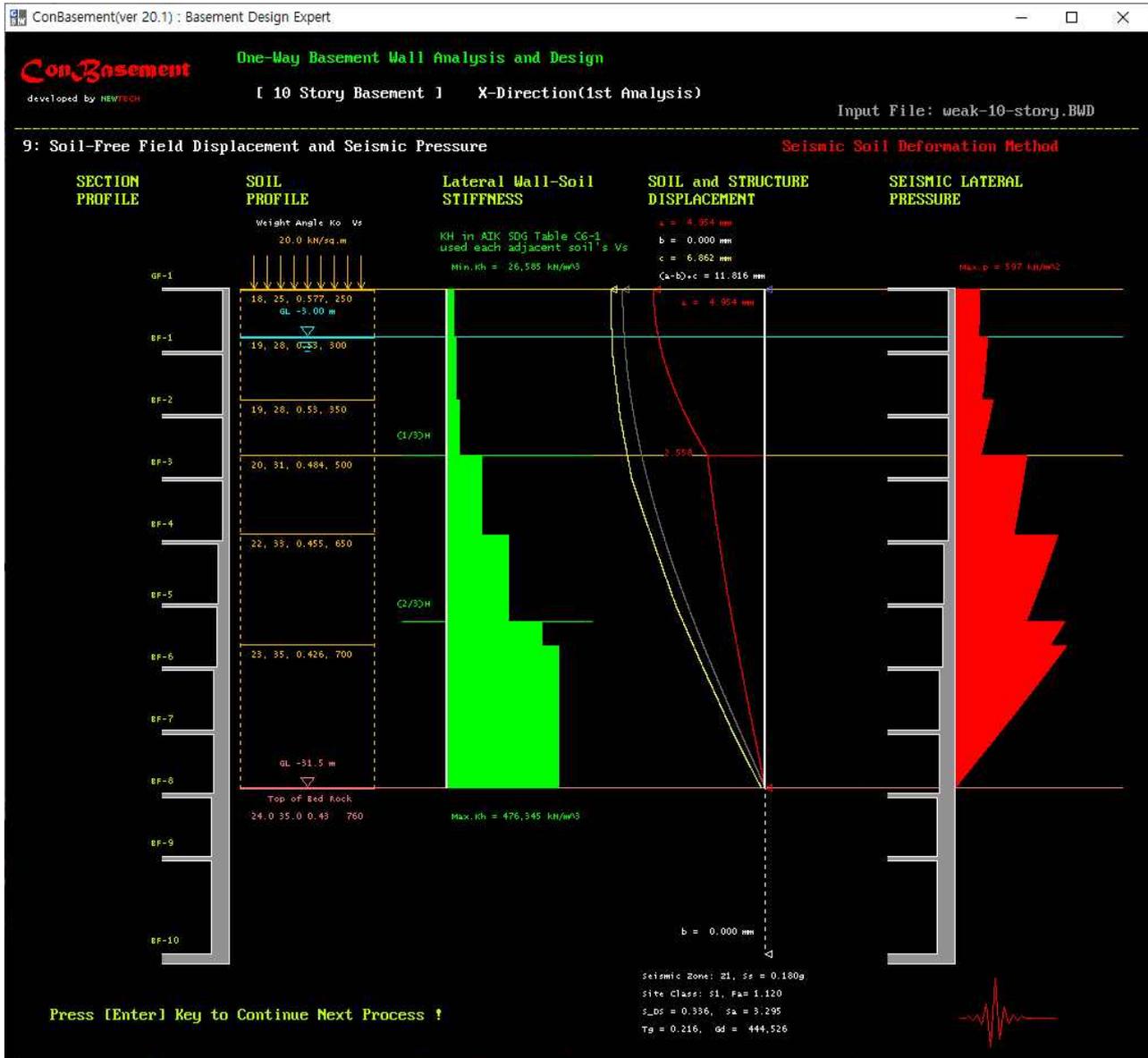
주) 지하외벽의 두께 및 재료강도는 1차 해석모델과 동일한 조건

Case 2 : 기반암에 일부 묻힌 지하 10층 구조(기반암 깊이 31.5m)의 예

이 예는 지하구조의 횡변위가 모든 층에서 초과한 경우이다.

이 경우는 지침 2.5(3)의 ③에 해당되며, 1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위를 2차 해석에서 1층에 해당하는 지반변위에 일치하도록 조정하여 이 조정된 횡변위를 적용하여 뒷벽에 발현되는 횡스프링지지력을 고려한다.

1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위



지반과 구조의 횡변위 그래프에서 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위(노란색 곡선)가 모든 층에서 지진에 의한 지반의 횡변위(빨간색 곡선)를 초과한다.

Case 2 : 기반암에 일부 묻힌 지하 10층 구조(기반암 깊이 31.5m)의 예

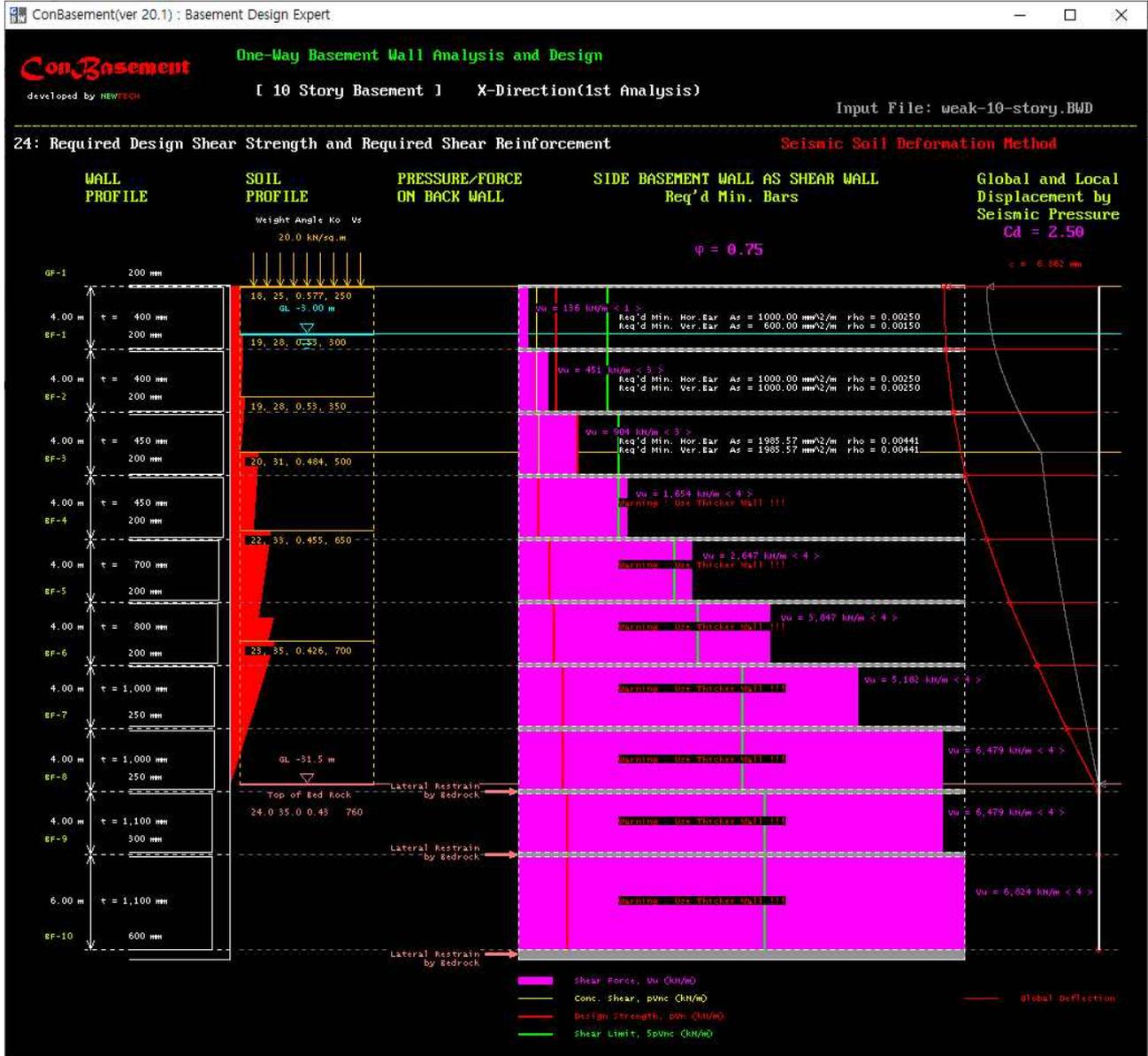
1차 해석에 의한 지하구조에 작용하는 횡력



이 예는 1차 해석에서 뒷벽에 기반암에 의한 횡구속만 고려하고 추가 횡하중(정적횡압, 스프링지지력)을 고려하지 않는 경우이다.

Case 2 : 기반암에 일부 묻힌 지하 10층 구조(기반암 깊이 31.5m)의 예

1차 해석에 의한 지하구조 외벽(전단벽)의 면내 설계소요전단강도와 소요철근

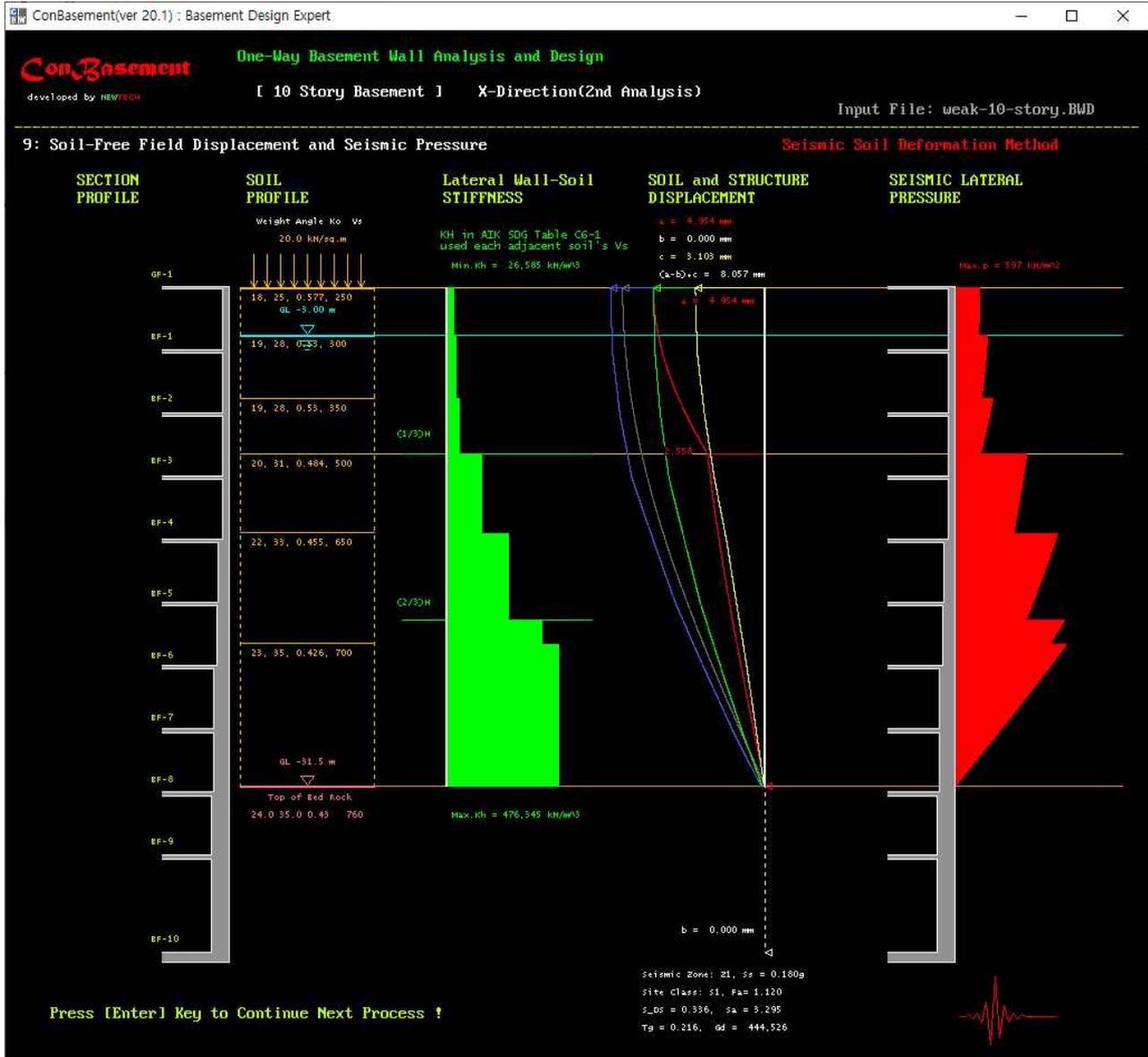


1차 해석에 의한 지진력저항시스템의 설계결과

구분	면내 전단강도			지진토압에 의한 지하구조의 횡변위		
	두께(mm)	소요수평철근비	소요수직철근비	위치	결과	
				1층 바닥	지반의 횡변위를 초과	
지하 1층	400	-	0.00250	0.00150	지하 1층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 2층	400	-	0.00250	0.00250	지하 2층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 3층	450	-	0.00441	0.00441	지하 3층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 4층	450	부족	제한 초과	제한 초과	지하 4층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 5층	700	부족	제한 초과	제한 초과	지하 5층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 6층	800	부족	제한 초과	제한 초과	지하 6층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 7층	1000	부족	제한 초과	제한 초과	지하 7층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 8층	1000	부족	제한 초과	제한 초과	지하 8층 바닥	지반의 횡변위를 초과
지하 9층	1100	부족	제한 초과	제한 초과	지하 9층 바닥	기반암에 의한 횡구속
지하 10층	1100	부족	제한 초과	제한 초과	지하 10층 바닥	기반암에 의한 횡구속

Case 2 : 기반암에 일부 묻힌 지하 10층 구조(기반암 깊이 31.5m)의 예

2차 해석에 의한 지하구조의 횡변위

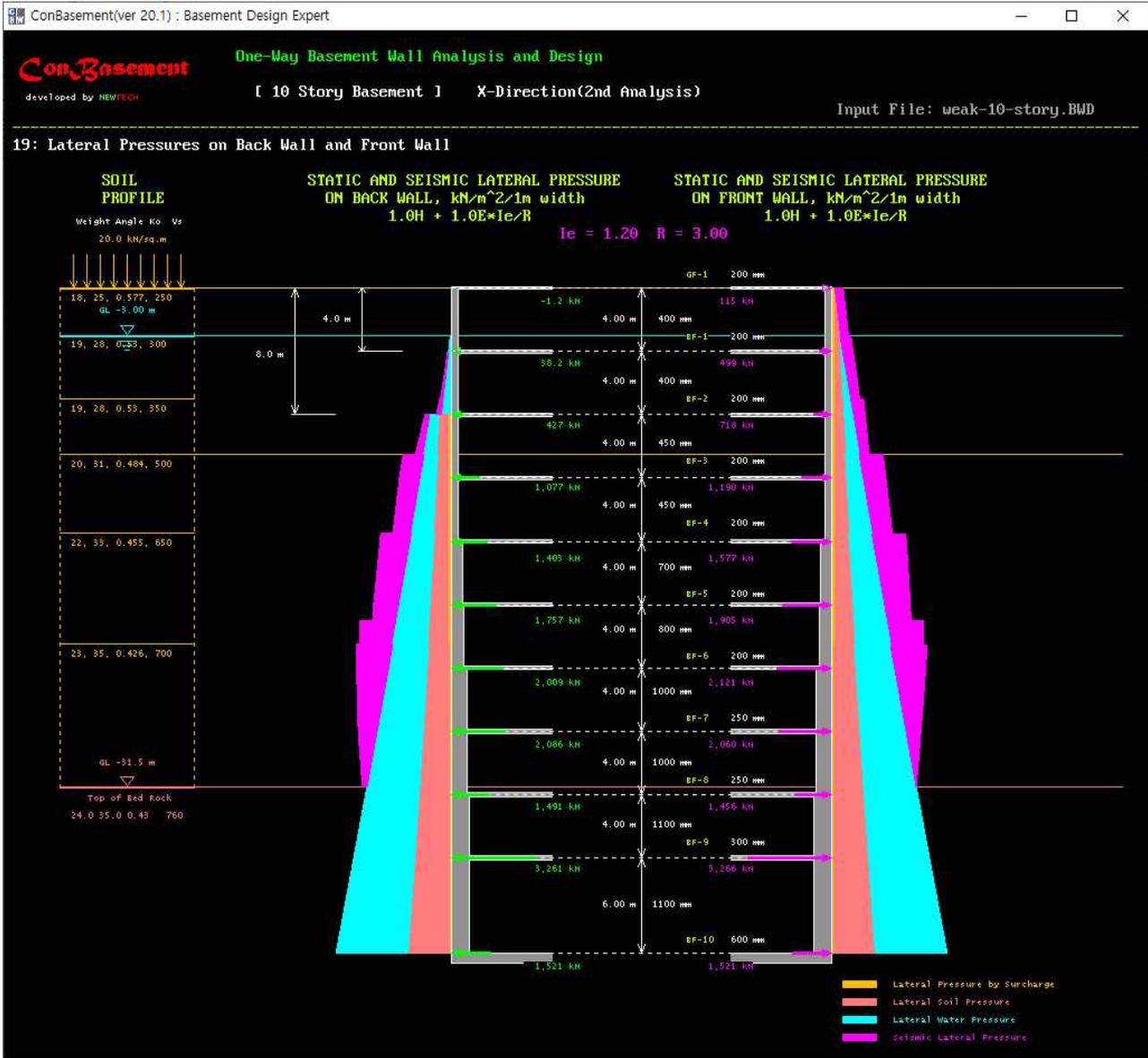


지반과 구조의 횡변위 그래프에서 청보라색의 곡선은 1차 해석에 의한 지하구조의 횡변위, 초록색의 곡선은 횡스프링지지력을 산정하기 위해 조정한 지하구조의 횡변위, 빨간색의 곡선은 지반의 횡변위, 노란색의 곡선은 뒷벽에 횡스프링지지력을 추가로 고려한 2차해석에 의한 지하구조의 횡변위를 나타낸다.

2차 해석에 의한 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위(노란색 곡선)는 지진에 의한 지반의 횡변위(빨간색 곡선)보다 작다.

Case 2 : 기반암에 일부 묻힌 지하 10층 구조(기반암 깊이 31.5m)의 예

2차 해석에 의한 지하구조에 작용하는 횡력



이 예는 2차 해석에서 뒷벽에 기반암에 의한 횡구속과 추가로 고려한 횡하중(정적횡압, 스프링지지력)을 고려한 경우이다.

위 그림에서 오른쪽 벽은 앞벽을 의미하며, 가장 오른쪽에 있는 분홍색은 지반변위에 의한 지진토압의 분포를 나타낸다.

위 그림에서 왼쪽 벽은 뒷벽을 의미하며, 가장 왼쪽에 있는 분홍색은 앞벽에 작용하는 지진토압에 의한 지하구조의 횡변위에 의해 발현된 횡스프링지지력의 분포를 나타낸다.

Case 2 : 기반암에 일부 묻힌 지하 10층 구조(기반암 깊이 31.5m)의 예

2차 해석에 의한 지하구조 외벽(전단벽)의 면내 설계소요전단강도와 소요철근



2차 해석에 의한 지진력저항시스템의 설계결과

구분	면내 전단강도				지진토압에 의한 지하구조의 횡변위	
	두께(mm)		소요수평철근비	소요수직철근비	위치	결과
					1층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 1층	400	적합	0.00250	0.00250	지하 1층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 2층	400	적합	0.00250	0.00250	지하 2층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 3층	450	적합	0.00250	0.00250	지하 3층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 4층	450	적합	0.00279	0.00279	지하 4층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 5층	700	적합	0.00250	0.00250	지하 5층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 6층	800	적합	0.00250	0.00250	지하 6층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 7층	1000	적합	0.00250	0.00250	지하 7층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 8층	1000	적합	0.00250	0.00250	지하 8층 바닥	지반의 횡변위보다 작음
지하 9층	1100	적합	0.00250	0.00250	지하 9층 바닥	기반암에 의한 횡구속
지하 10층	1100	적합	0.00250	0.00250	지하 10층 바닥	기반암에 의한 횡구속

주) 지하외벽의 두께 및 재료강도는 1차 해석모델과 동일한 조건