

칠레 플랜트시설



김석구 대표
(주)쓰리디구조



정석재 소장
(주)쓰리디구조

1. 머리말

칠레중부 태평양 연안 쿼테로만(Quintero Bay)에 위치한 벤타나스 석탄화력발전소는 기존에 1, 2호기가 가동 중에 있으며, 기존 대지의 북측에 240MW 규모의 3호기를 증축하는 프로젝트로 포스코건설이 시공하고, 현대엔지니어링이 설계를 진행하고 있다. 이번 프로젝트는 칠레 플랜트 시장에 국내업체가 처음으로 진출하는 프로젝트로서 향후 예정되어 있는 일련의 발전소 건설 프로젝트의 수주를 위한 교두보 역할을 하는 매우 중요한 프로젝트라 할 수 있다. 현재 골조공사가 한창 진행 중에 있으며, 이번 프로젝트에서 보여준 설계 및 시공능력을 인정받아 향후 2개의 발전소 프로젝트를 이미 수주하였다.

2. 구조설계 개요

칠레는 진도 9.5의 세계 최대 지진 발생 기록을 갖고 있는 강진지역으로 최근에도 진도 7.7의 강진이 발생하여 가옥 수천 채가 피해를 입었고, 수많은 이재민이 발생하여 국가비상사태가 선포되는 등 지진에 대한 대책이 매우 중요시 되는 지역이다. 특히 발전소는 국가 기간시설물로서 주요 건물에 대해 지진이 발생하더라도 손상을 방지해야 함은 물론 즉시 기능을 수행해야 한다.

따라서 Steam Turbine Building 및 Steam Turbine Foundation, Main Control Building 등 발전소 내 주요시설물의 경우는 3차원 동적해석을 수행하고, 강진지역의 각종 제한사항 등을 충족시켜야 하며, 발주처가 선정한 지진전문가(Seismic Reviewer)의 최종 승인을 거쳐 공사가 진행되도록 하고 있다.

2.1 대지조건 (Site Condition)

- 대지위치 : Quintero Bay on the Central Coast of Chile
- 기온 : 최대 31℃, 최저 0℃
- 상대습도 : 최대 100%, 평균 86%
- 바람 : 42m/sec — 3 second gust
- 강우 : 50년 재현주기
- 지진 : 강진지역(Nch2369 Seismic Spectrum 적용)

2.2 적용기준 (Codes and Standards)

적용기준은 Project Specification, Chile Local Codes, 기타 기준 순서로 적용하는 것을 원칙으로 하며, 칠레코드가 미국 기준과 유사하므로 일반적으로 ASCE, UBC, IBC, ACI, AISC 등의 기준을 비교적 자유롭게 적용할 수 있다.

- Project Specification
- Chile Local Codes
 - Nch 427 for the Design of Structural Steel
 - Nch 430.aR86 for Concrete Ultimate Strength Design
 - Nch 432 for Wind Loads
 - Nch 433 Seismic Design of non Industrial Buildings
 - Nch 2369 Seismic Design of Industrial Buildings
 - NCh 1198 Design of Timber Structures
 - NCh 1537 Live Loads on Buildings
 - NCh 1928 Design of Reinforced Masonry
- ASCE American Society of Civil Engineers(latest edition)
- UBC Uniform Building Code(1997)

- IBC International Building Code(latest edition)
- ACI American Concrete Institute(latest edition)
- AISC American Institute of Steel Construction (latest edition)

2.3 사용재료 (Materials)

- 콘크리트 : 재령 28일 원형공시체 최소압축강도 기준
Hydraulic concrete structures $f_c=32\text{MPa}$
Other concrete structures $f_c=24\text{MPa}$
Lean concrete $f_c=10\text{MPa}$
- 철근 : ASTM A615M Grade 420 or equivalen
- 강재 : ASTM A 36M(or ASTM A 572)
- 볼트 : ASTM A325 or A490, or equivalent
- 앵커볼트 : ASTM A307 Grade C

2.4 내진설계고려사항 (Seismic Design Requirement)

- Seismic Spectrum : Soil Type II (Nch2369)

$$\frac{Sa(T)}{g} = \begin{cases} \frac{1.125}{R} \left(\frac{5}{\zeta}\right)^{0.4} & T \leq 0.35 [\text{sec}] \\ \frac{0.394}{RT} \left(\frac{5}{\zeta}\right)^{0.4} & 0.35 [\text{sec}] < T \leq 1.0 [\text{sec}] \\ \frac{0.394}{RT^{3/2}} \left(\frac{5}{\zeta}\right)^{0.4} & 1.0 [\text{sec}] < T \end{cases}$$

여기서,

S_a :spectral pseudo acceleration amplitude

g : value of the acceleration of gravity

T : natural vibration period of the structural system

R : response modification factor for the structure

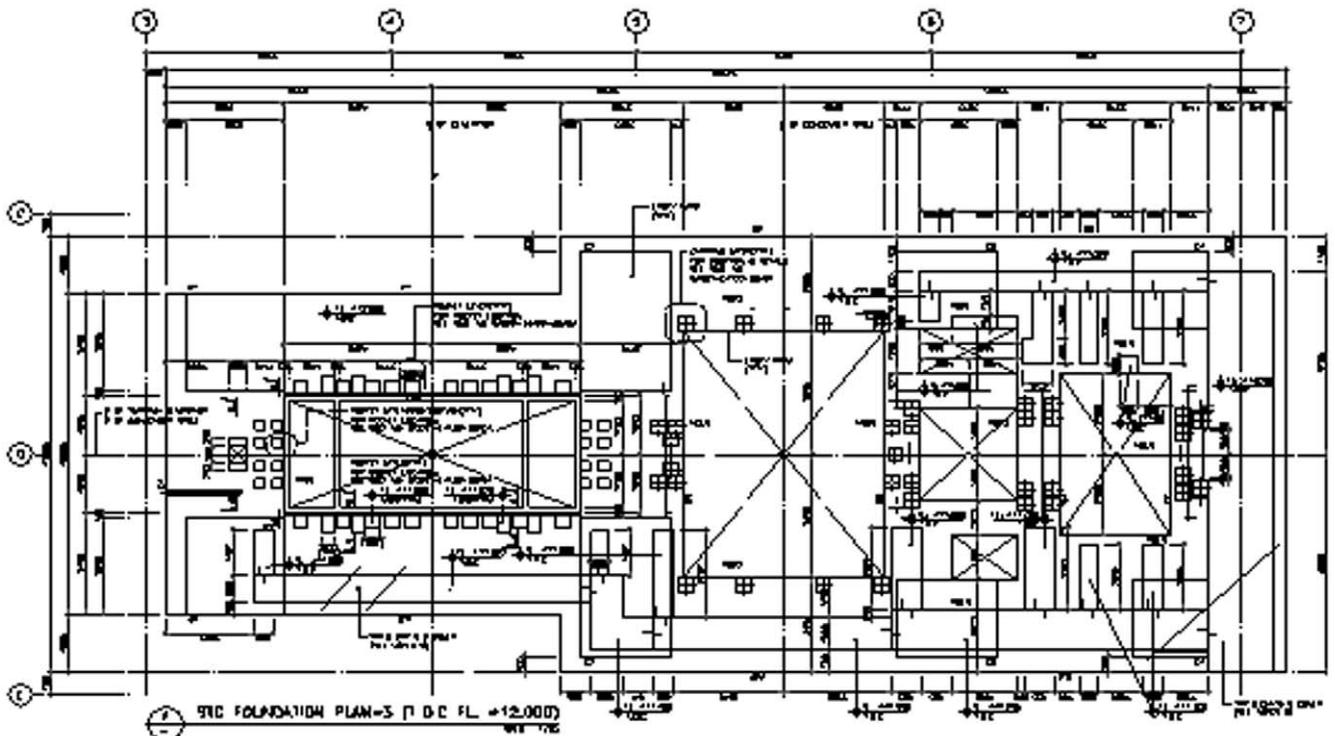
ζ : damping ratio

- CQC Method 적용, 질량참여율 95%이상
- 수평지진력의 66.7%(2/3)을 수직지진력으로 고려
- 최소밀면전단력 : 유효중량의 최소 10% 이상
- 적재하중의 25%를 유효중량에 추가
- 비틀림모멘트고려
- 직각효과고려(30% orthogonal effect)

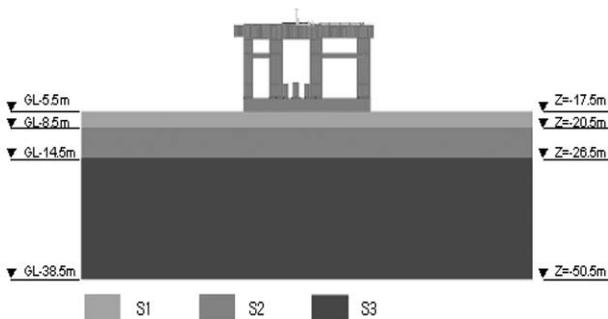
3. 주요구조물의 구조설계

3.1 Steam Turbine Foundation

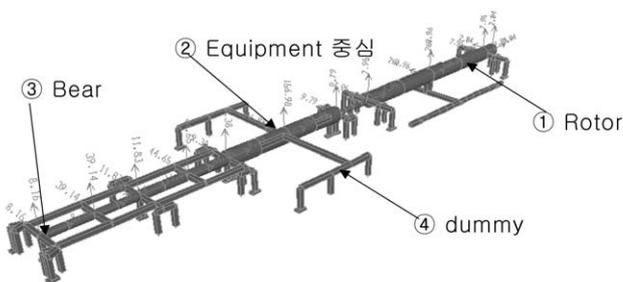
Generator와 Turbine을 지지하는 기초로, 지진이 발생하여 기계작동이 일시적으로 멈추더라도 즉시 사용이 가능하도록 설계하는 조건이다. 따라서 일반적인 진동기초 설계절차와는 다르게 지진하중의 영향을 정확히 파악하기 위하여 골조요소 뿐만 아니라 지반특성을 고려한 지반요소 및 상부기계 요소를 고려한 전체해석모델을 작성하였다.



- 기초 형태 : Table Type
- 구조 형식 : RC구조
- 기초 형식 : 온통지내력기초
- 허용지내력 : 400kN/m²
- 기초 크기 : 폭 15.3m, 길이 32.0m, 높이 17.0m :
Quintero Bay on the Central Coast of Chile
- 안정성검토 : 지진하중 - 전도, 활동, 부상 등
기계하중 - 공진, 진폭
- 해석모델
 - Soil & Structure model : 깊이에 따라 3단 모델링, 탄성계수의 변화 반영
 - 해석방법에 따른 전단탄성계수
 $G_{static} = E_s / (2 \times (1 + \mu))$
 $G_{seismic} = G_{static} \times 2.5$
 $G_{max} = \rho \times V_s^2$
 $G_{dyn} = G_{max} \times (0.85 - 0.9)$
 - 적용하중
 Equipment Load, Operating Load, Temperature Load
 Seismic Load (Zone 4, R=1, 3)
 Emergency Load (short circuit, blade loss 등)
 지진하중과 Short Circuit하중을 동시에 고려해야 함



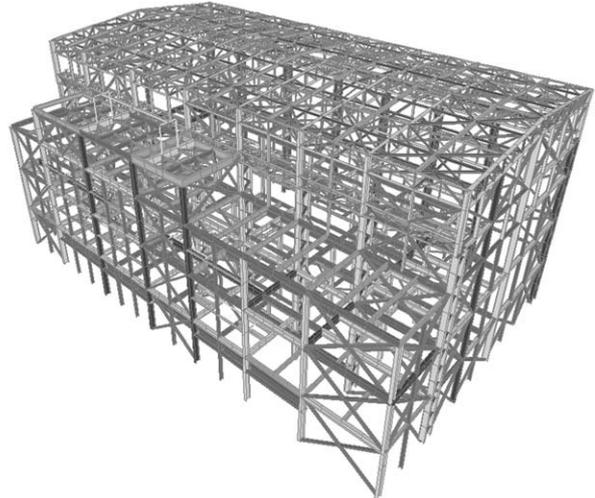
〈지반요소를 고려한 해석모델〉



〈상부 기계해석모델〉

3.2 Steam Turbine Building

Steam Turbine Foundation을 감싸고 있는 건물로 횡력을 중심가새부재가 지지하도록 모든 보부재는 단부를 힌지로 설계하였다.

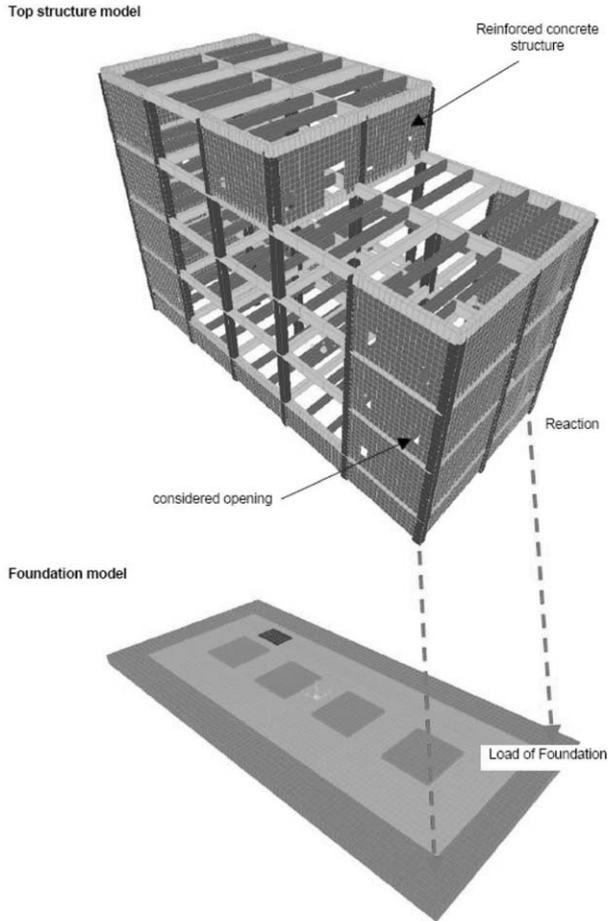


〈상부구조물 해석모델〉

- 구조 형식 : 철골구조
- 기초 형식 : 독립지내력기초
- 건물 규모 : 폭 24m, 길이 56m, 높이 28.8m
- 허용지내력 : 400kN/m²
- 지진력저항시스템 : Ordinary Concentrically Braced Frame(OCBF)
- 안정성검토 : 전도 (안전율 2.143), 활동 (안전율 1.5), 층간변위
- 해석모델
 - 응답스펙트럼 동적해석 (CQC, Ritz)
 - 적용하중
 지진하중 : Nch2369, R=5.0, Orthogonal Effect, Vertical Seismic Load, Operating Load, Temperature Load
 - 해석프로그램 : Sap2000 v11.0
- 내진설계특별고려사항
 - 가새부재는 지진력 1.25배 할증, 접합부 전강설계
 - 가새부재는 인장력만 지지하도록 계획
 - 가새부재 한계세장비 $1.5 \pi \sqrt{E/F_y}$
 - 가새부재 폭두께비
 - 지붕트러스 상하현재 수평가새 설치
 - 기둥 주각부는 핀으로 설계, 더블베이스플레이트 설치해야 함
 - 주각부 횡력은 전단키(Shear Key)가 지지하도록 설계
 - 앵커볼트는 ACI 318, Appendix D에 따라 연성설계 해야 함

- 모든 주각부는 최대 수직하중의 10%을 인발하중으로 고려해야 함

3.3 Main Control Building



<해석모델>

Main Control Building은 철근콘크리트 전단벽+모멘트구조의 이중골조방식으로 벽체는 특수전단벽구조로 설계하였다.

- 구조 형식 : RC구조
- 기초 형식 : 온통지내력기초
- 건물 규모 : 폭 17m, 길이 37.5m, 높이 24.0m
- 허용지내력 : 400kN/m²
- 지진력저항시스템 : 이중골조방식(I.M.F+S.C.W)
- 안정성검토 : 전도(안전율 2.143), 활동(안전율 1.5), 층간변위
- 해석모델
 - 응답스펙트럼 동적해석 (CQC, Ritz)
 - 적용하중
 - 지진하중 : Nch2369, R=5.0
 - 해석프로그램 : Sap2000 v11.0
- 내진설계특별고려사항
 - 전단벽은 철근콘크리트 특수전단벽을 설계
 - 벽체 개구부를 고려한 구조해석
 - 계단실 바닥슬래브 신축이음설치

4. 맺음말

중국 쓰촨성 지진으로 내진설계에 대한 관심이 전세계적으로 고조되고 있는 현시점에서, 이번 프로젝트를 통해 강진지역 내 각종 구조물에 대한 내진설계를 수행하고 기술력을 축적한 점은 의미 있는 일이라 사료된다. 이와 같은 기술력은 플랜트 구조물에만, 그리고 칠레라는 지역에만 국한되지 않으며 향후 진행될 각종 국내외프로젝트에 기술적으로 조금이나마 도움이 되길 바란다.