

沈埋 터널의 내진設計

Earthquake Resistant Design of Submerged Tunnels

朴 承 範*
Seung Bum Park

Summary

A lot of submerged tunnels which cross rivers and channels have been constructed in the USA, European countries and Japan. It is very important to consider anti-seismicity of the tunnels when they are located in active seismic zone. Fortunately, the submerged tunnels have never been damaged by earthquakes, however a number of surveys and experiments to examine the anti-seismicity of the submerged tunnels have been carried out from various points of view. The dynamic characteristics of the submerged tunnels which are buried in the ground and have long total length differ from that of the structures above ground. "Specifications for Earthquake Resistant Design of Submerged Tunnels" was established by the Japan Society of Civil Engineers in 1975. These specifications greatly promote the construction of the submerged tunnels. In this technical paper, the outline of the construction and a few methods of earthquake resistant designs for the submerged tunnels are explained. Furthermore, recent research works on the submerged tunnels: earthquakes observations, indoor experiments by shaking table, and numerical analysis by computer are also mentioned.

I. 序 言

最近數年 國內外的으로 河川 및 航路의 橫斷方法으로서 Tunnel 構造物의 使用例가 急速히 增加되고 있는 實情이다. 特히 Europe, 美國, 日本 等地에서는 他工法에 比하여 軟弱地盤帶에서의 周航河川, 航路에 有利하고 Shield Tunnel에 比하여 經濟性, 安全性 및 作業性에서 有利한 沈埋 Tunnel의 利用例가 急增하고 있다. 여기에 河川도서가 많고 狹小 複雜한 地形的 與件을 갖고있는 우리나라의 경우 앞으로 이와같은 工法의 應用可能性을 考慮하여 本工法의 概要 및 近來의 그 設計施工上의 主要 問題中의 하나인 耐震性의 評價에 關하여 記述하고자 한다. 本工法의 進展歷史는 이미 80年을 經過하고 있

으며 Europe, 美國, 日本 等地에서 獨自的으로 開發 應用되었고 1950年代에 있어서 水中作業의 能率化, 基礎工法의 進展을 보아 1960年代부터는 急速히 施工例가 增加하고 있으며 그 經濟性과 施工性이 認定되고 있다. 沈埋 Tunnel은 Europe이나 美國의 東部 等地에서 있었던 큰 地震 等の 動力學的인 問題가 別로 없었던 곳에서 應用되었기 때문에 아직 震動에 依한 被害가 없었으나 美國 샌프란시스코의 Bart Tunnel의 施工을 最初로 地震이나 기타 動力學的인 要因에 對備한 本格的인 耐震設計가 始作되었다.¹⁾ 이 方法은 spector法으로 불리우는 것으로 地震計에서 얻어진 記錄을 토대로 하여 地震時의 地盤의 變位를 想定하여 그 變位를 기초로 하여 Tunnel의 耐震設計를 하고자 하는 方法이다. 그후 일본에서 設計 Spector法²⁾ 외에 應答計算法³⁾이 開發되고

* 忠南大學校 工業教育大學

沈埋터널의 耐震設計

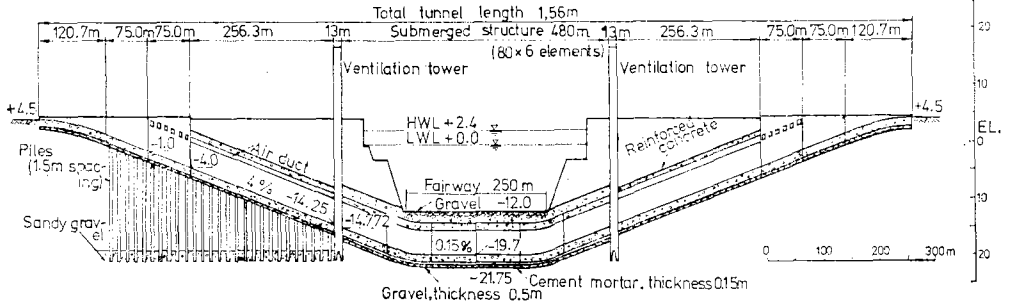


Fig. 1-a. Kinura Port Under Water Tunnel(longitudinal section)

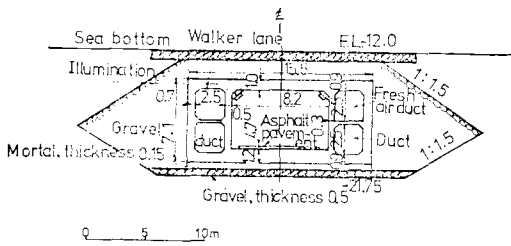


Fig. 1-b. Kinura Port Under Water Tunnel (typical cross section)

이러한 計算法을 체크하기 위하여 模型實驗⁴⁾ 및 現場觀測法⁵⁾을 開發하여 使用함에 의하여 耐震設計法이 漸次 確立되었으며 沈埋 Tunnel의 代表的인 施工例는 Fig. 1과 같다.

II. 沈埋 Tunnel의 概要

沈埋 Tunnel이란 水底 혹은 地下水面 以下の 構造物 全體 또는 一部를 caisson의 形으로 別도의 場所에서 製作하여 이것을 물에 띄워 부설현장까지 曳인하고 所定의 位置에 침수시켜 既設部分과 連結한後, 매설을 行하여 해당 構造物을 완성시키는 것을 沈埋工法(Submerged Tunnel Method)이라 부르고 이 方法으로 施工된 Tunnel을 沈埋 Tunnel(Submerged Tunnel)이라 부른다.⁶⁾ 여기서 沈埋Tunnel의 施工順序를 간단히 紹介하면 다음과 같다.

1) Tunnel의 水底部分이 없고 掘削時에 水面以不로 되는 部分을 曳船, 沈設作業에 支障이 없는 範圍의 크기로 分轄한다. 이 分轄部分을 침매함(Sunken Caisson)이라 부른다.

2) 이 침매함은 그것을 부설하고자 하는 水路에 面한 陸地內의 凹地(dry dock) 혹은 造船所의 dock

內에서 築造된다. 침매함 兩端의 開口部에는 一時的인 止水壁을 붙여서 內部에 물이 들어가지 않도록 하여 水路內에 끌어들여 부설현장까지 dock-boak 등을 使用하여 曳인한다.

3) 부설현장의 水底는 먼저 所定의 깊이와 形狀으로 整正하여 놓는다. 이것을 위하여는 통상 水底에 溝(Trench)가 파여지기 때문에 이 工法에 의한 Tunnel을 Trench Tunnel이라고도 부른다.

4) 이 Trench에 曳인하여온 沈埋함을 가라앉혀 既設函의 假接合을 行하고 양자의 端部 假隔壁間에 밀폐되어진 물을 뽑아낸후 그 假隔壁을 除去하여 兩沈埋函의 通路部分을 完成한다.

5) 하나의 沈埋函의 沈設 및 接合作業이 끝나면 沈埋函內부의 作業에 併行하여 外部에서는 水上으로부터의 土砂에 의한 매설(基礎에 砂의 압입을 포함)이 行하여 진다.

6) 各沈埋函마다에 이들의 作業을 반복하여 Tunnel을 完成시키는 水底 Tunnel 특유의 프리체브 공법이다.

Tunnel構造體의 主要部分은 造船臺라던가 dry dock等の 大氣中에서 만들어지는 것으로 보통의 Tunnel工事에서 遭遇하는 土壓이라던가 水壓 等の 外壓下에서 限定된 空間內에서의 覆工작업등의 필요가 없다. 따라서 均一하게 品質이 좋은 水密한 Tunnel構造體를 만든다. Tunnel水底位置는 선박의 항해와 장래의 항로준설에 支障이 없는 程度면 좋기 때문에 最小限의 깊이로한다. 따라서 Tunnel全體의 길이도 필요한 최소한도까지 短縮할 수 있다. 沈設시킨 Tunnel의 比重은 작고, 물론 浮上하지 않도록하는 配慮가 必要한 정도이기 때문에 Tunnel底의 地盤은 통상으로 沈設시킨 沈埋函의 重量보다 큰 先行荷重을 받고 있게된다. 이 때문에 地盤 支持力

自體는 거의 문제로 되지 않는다. 이점은 地質의 製約을 크게 받는 교량이라던가 Shield工法 등의 掘進工法에 의한 Tunnel과 비교하여 현저히 우수하다고 말할수 있다. 이러한 觀點으로부터 沈埋工法은 軟弱地盤에도 적합하며 물론 發破를 필요로 하는 견고한 암초 등이 있으면 반대로 Trench費用을 增大시키게 된다. 이밖에 우수한 點으로서 프리체브型式이므로 沈埋에 要하는 現場作業을 短時間에 마칠수 있다. 또한 예인 沈設用 기계장치를 대형화 함에 의하여 安全하고도 確實하게 극히 大斷面의 Tunnel을 施工할 수 있고 工期도 현저히 短縮시킬 수 있다.

Ⅲ. 耐震設計法の 種類

沈埋 Tunnel의 耐震設計時 그 各部의 設計를 爲하여 震度法, 變位法, 或은 動的方法을 使用하며 보통 周邊의 地盤을 包含한 全構造物에 對하여는 主로 變位法 및 動的方法을 使用하여 檢討하며 地震이 일어날 경우를 생각하여 諸撤安全施設의 設置를 設計時 考慮하여야 한다. 耐震設計를 위한 Flow char의 한 例는 Fig. 2와 같고 以上 3種類의 設計法 概略을 간단히 소개하면 다음과 같다.

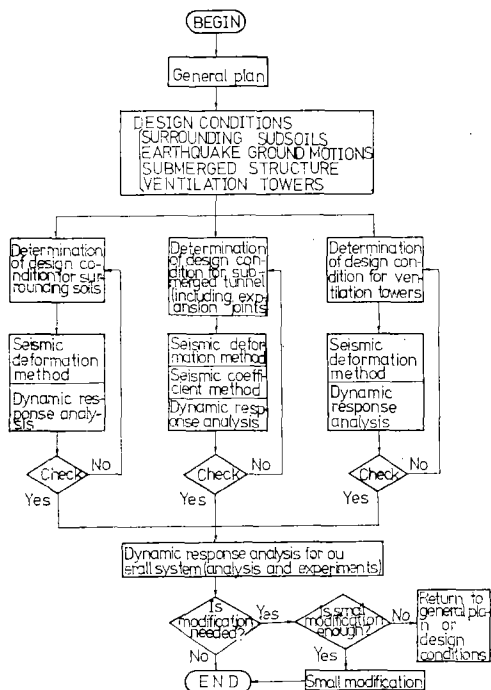


Fig. 2. Flow Chart for Seismic Design

1) 震度法(慣性法)

地震에 依한 慣性力은 構造物과 軸의 重量인 死荷重에 震度を 곱하여 얻을수 있다. 慣性力의 作用位置는 死荷重의 重心位置이고 基本的으로 慣性力은 水平 2方向과 上下方向의 3方向에 作用하게 된다. 이 慣性法을 利用하여 地盤의 Sliding, 換氣施設의 設計, Approach(接續施設)의 設計 및 附屬施設等 이외에 沈埋 Tunnel의 橫斷方向設計에 利用된다. 沈埋 Tunnel 및 換氣塔內에 設備되어 있는 附屬施設은 큰 慣性力을 받을 可能性이 있기 때문에 震度の 값을 조금 크게하여 놓음이 좋다. 한편 수평 2方向의 意味는 通常 Tunnel軸方向과 이에 直角方向을 말하며 水平震度は 다음(式-1)에 依하여 算定한다.⁹⁾

$$K_h = V_2 \cdot V_1 \cdot V_s \cdot K_{oh} \text{ --- (式-1)}$$

여기서 K_h : 水平震度

V_2 : 地域別 震度係數

V_1 : 重要度 係數

V_s : 地盤種別 係數

K_{oh} : 標準設計 震度

即 水平震度は 沈埋 Tunnel의 建設地點에서 地震의 規模, 地盤의 種類와 沈埋 Tunnel의 重要度を 감안하여 決定하며 鉛直方向의 震度は 通常 水平震度の 1/2로 한다.

2) 變位法

이 方法은 地震時 地盤의 變位를 基礎로 解析하는 것이다. 地盤과 比較하여 剛性이 크지만 密度가 작은 沈埋Tunnel과 같은 構造物에 發生하는 變形은 周邊의 地盤에 生기는 變位에 支配된다. 이러한 沈埋 Tunnel의 性質을 考慮하면 沈埋 Tunnel의 數學的 모델은 沈埋 Tunnel을 彈性 地盤上의 보로서 取扱한다. 이 假定에 依하여 Tunnel에 生기는 B.M와 軸力은 다음(式-2)에 依하여 算定한다.¹⁰⁾

$$B.M = \frac{EI \cdot U_h \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2}{1 + \frac{EI}{K_a} \left(\frac{2\pi}{L} \right)^4} \quad \left. \vphantom{B.M} \right\} \text{(式-2)}$$

$$\text{軸力 } P = \frac{E \cdot A \cdot U_h}{1 + \frac{E \cdot A}{2K_b} \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2} \cdot \frac{\pi}{L}$$

여기서 L : 地震動의 波長(cm)

U_h : 地盤의 水平變位 振幅(cm)

EA : 軸 剛性(kgf)

K_a, K_b : 地盤의 剛性(Kgf/cm²)

EI : 樑 剛性(Kgf/cm²)

(式-2)에 使用한 主要한 값들의 設定法을 간단히 약술하면, 먼저 地表面에서 水平方向 地盤의 變位振幅은 다음式으로 나타낸다⁹⁾

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T \cdot A_{0h} \cdot \nu_1 \text{ (式-3)}$$

여기서 U_h : 地表面에서 水平方向 地盤의 變位振幅(cm)

S_v : 基盤上 最大加速度的 1gal當 應答速度值, 이 값은 地盤의 固有周期下로 減衰하고 定數로 한다. (cm/sec/gal)

T : 表層의 基本 固有周期(sec)

A_{0h} : 基盤面上에서의 水平加速度(gal)

ν_1 : 重要度 係數

上記의 式은 흙의 두께 H 의 表層地盤이 均一하다고 假定하고 基盤面上的의 最大加速度 A_{0h} 를 作用시켰을 때 生기는 地盤의 變位를 求하는 것이다. 또한 固有周期(T)는 a) 常時 微動觀測으로부터 predominate period 求하는 方法, b) 現場測定 또는 室內實驗에 依하여 얻어지는 地盤의 剪斷係數(G_s) 또는 剪斷波速度(V_s)를 利用하여 $T=4H/V_s$ (H : 表層地盤의 두께)에 依하여 求하는 方法등이 있다. 어느것의 경우에도 地震時에 生기는 地盤變形의 크기를 考慮하여 固有周期를 求함이 좋다. 또한 地表面의 鉛直變位로서는 水平變位の 1/4~1/2의 값을 取함이 보통이다.

3) 動的法

動的法⁹⁾은 地震應答解析과 動的模型試驗으로 分類할 수 있다. 地震應答解析으로는 理想化된 解析模型을 利用하여 詳細히 動的應答를 調査한다. 한편 動的模型試驗에는 地盤과 構造物의 3次元 舉動을 調査하게되며 이들 各 方法은 各各의 長點을 가지고 있으므로 目的에 따라서 적절히 應用함이 좋다. 動的法에서 解析模型은 構造物의 諸元 및 地盤의 動的 性質과 관련하여 設定된다. 이들의 解析을 通하여 沈埋 Tunnel에 生기는 斷面力, 動的土壓, Element間 혹은 換氣塔과 Element間的 joint 등의 舉動이 明確하게 된다. 地震應答解析을 爲하여는 일반적으로 다음 2가지 方法을 使用한다.

- a) 平均應答 Spector를 利用하는 方法⁹⁾
- b) 地震動的의 Time-history記錄을 利用하는 方法⁹⁾. (Fig. 3)⁹⁾

地震應答解析의 解析模型化는 地盤, 沈埋部, 換氣塔의 各部와 全構造物에 對하여 行하여지며 만약 必要한 경우는 물의 存在에 對한 影響도 考慮하여야

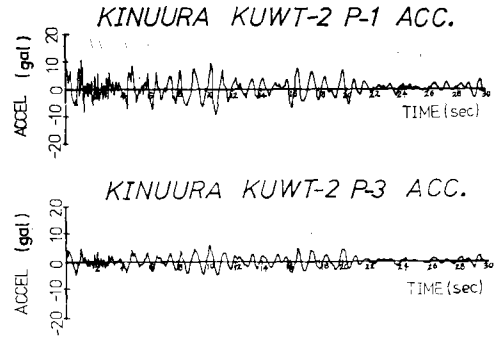


Fig. 3. Seismic Records Gained

한다. 地盤의 固有周期, 振動性狀, 감쇠성질등 地盤의 特性, 부속構造物, 地盤과 構造物과의 상호작용등을 模型化함에 考慮할 必要가 있다. 地盤과 構造物의 動的特性을 나타내는 解析模型은 간단하게 作成할 수 없으나 간편하게 그리고 動的特性을 表現하도록 考慮할 必要가 있다. 動的法의 一連의 研究成果로부터 다음의 主要結果가 얻어지고 있다.

1) 地盤에서는 固有周期의 振動이 輻등하다. 즉, 固有周期의 값이 1~3秒인 경우 基本 Mode의 振動이 큰 振幅을 地震時에 主게된다. 일반적으로 沈埋 Tunnel근방을 除外하고는 沈埋 Tunnel存在에 依하여 地盤의 應答는 그다지 影響을 받지 않는다.

2) 地震時 地盤은 粘性감쇠를 일으킨다. 이 경우 감쇠定數의 값은 10~20% 정도이고 일반적으로 硬質地盤에서의 減衰값은 작고 軟弱地盤에서는 이 값은 크다.

3) 地盤의 動的特性은 地盤條件이 急變하는 곳에서 變化하지만 그 影響은 急變部の 부근에 限定된다.

4) 周邊地盤의 活動에 對한 沈埋 Tunnel의 地震應答는 通常의 경우는 無視할 수 있다. 即, 沈埋 Tunnel은 靜的인 地盤變形을 받는 地盤중의 보로 取扱할 수 있다.

5) 沈埋 Tunnel의 一部分에 作用하는 外力의 影響은 構造物의 一部分에 限定된다. 特別히 휨變形인 경우의 影響은 작다. 한편으로 지만만 혹은 地盤과 構造物의 양자를 Model化하여 3次元 有限要素로 解析되는 경우가 있지만 이 경우는 다음 순서에 의하여 解析을 하게된다. Fig. 4에 나타낸것처럼 먼저 Tunnel軸方向으로 地盤을 分割하고 2次元 모델에 依하여 각각 分割된 地盤의 特性을 調査한다. 다음에

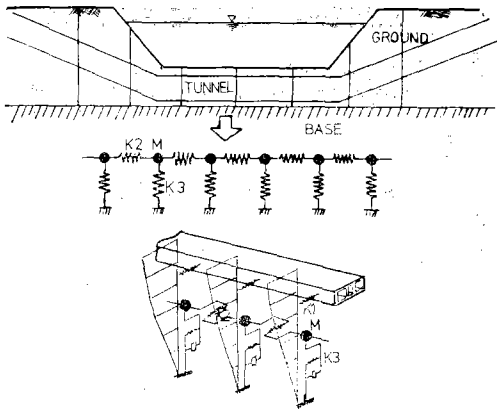


Fig. 4. Model of Response Calculation

그 分割한 地盤을 Spring-Mass System^{3), 6), 8)}으로 置換하고 質點間 地盤의 剛性を 表示하는 Spring에 依하여 연결한다. 이 方法에서는 通常 Spring은 線型으로하여 생각할 수 있지만 실제地盤의 地震時 舉動은 線型으로는 限定되지 않는다. 이 觀點으로 부터 경우에 따라서는 線型和 非線型 兩方의 Spring을 考慮할때도 있다.

IV. 最近의 究研結果

沈埋 Tunnel의 耐震設計를 위하여 最近의 國에서 主로 研究活用되고 있는 現場觀測, 模型實驗 및 數值解析方法의 概要는 다음과 같다.

1) 現場觀測

실제 건설된 沈埋 Tunnel中에 規模가 큰 地震이나 건설지점에서의 加速度값이 큰 地震이 發生한적은 아직없고 地震時 沈埋 Tunnel의 舉動에 對하여는 아직 一定한 假定下에서 解析되고 있다. 이러한 觀點에서 日本의 경우 衣浦港 海底 Tunnel, 川崎港 海底 Tunnel等 數個所의 沈埋 Tunnel에서의 地震應答觀測이 行하여지고 있으며, 미국 샌프란시스코의 Bart Tunnel의 경우 2臺의 強震計(AR 240)이 Tube의 中間 및 1/4지점에 부착되어 地震時의 舉動狀態를 調查하고 있다. 地震應答觀測에 사용되는 測定計器는 加速度計, 콘크리트 變形 測定裝置, 鐵筋計혹은 變位 測定計器等을 利用하며 일반적으로 地震時 地盤과 構造物의 舉動을 同時에 觀測한다. 현재 觀測結果의 수집 및 解析研究가 계속되고 있고 여러 公법의 沈埋 Tunnel에 대한 耐震設計法의 妥當性

等에 대한 檢討가 계속되고 있다.

2) 模型振動 實驗⁹⁾

模型振動 實驗에서는 沈埋 Tunnel 및 現地地盤의 形狀 및 力學的 特性을 考慮하여 實物과 모형의 相似則(=상사율)을 만족하는 模型을 振動臺위에 설치하고 地盤과 沈埋 Tunnel의 3次元의 舉動을 把握한다. 사용하는 入力地震波로서는 地震觀測에서 取得된 地震波 및 正弦波, 白色雜音波(white noise wave) 등의 模擬地震波가 있다. 이 實驗에서 실제의 沈埋 Tunnel 및 地盤의 地震時의 舉動을 再現하기는 困難하며 通常 模型振動實驗은 模型材料가 彈性範圍內에서 行하여진다. 結局 地盤과 構造物의 非線型性은 考慮하지 않는다. 그렇지만 全體的인 沈埋 Tunnel 및 地盤의 振動特性을 알기위한 主된 方法으로 인정 되고 있다. 한편으로 計算機를 利用한 動的應答解析方法과 實驗結果를 利用한 解析方法에 대한 發展研究가 行하여지고 있다.

3) 數值解析^{3), 6)}

電子計算機의 發達 및 有限要素法(F. E. M)의 導入 等에 의하여 最近實用化된것이 動的應答 計算方法이다. 振動모델의 設定, 入力地震波의 選定 및 土性의 把握 等 문제점 및 미해결부분이 있지만 現在로는 沈埋 Tunnel의 地震時 舉動을 大局的으로 把握하는 意味에서 가장 效果的인 方法이 되고 있다. 가까운 日本에서 最近 建設된 主要한 沈埋 Tunnel은 모두 이 方法을 利用하여 耐震性의 檢討를 行하고 있다. 이 動的應答計算方法으로는 A) 沈埋 Tunnel과 地盤과의 舉動을 3次元 有限要素法으로 算定하는 方法, B) 地盤과 沈埋 Tunnel을 Mass-spring System으로 置換하여 各種應力, 變形等을 算定하는 方法이 있으며 現在는 後者의 方法이 많이 利用되고 있다.

V. 將來의 展望과 結論

Europe 및 美國에서 考案된 다목적 沈埋 Tunnel은 최근에 이르러 이돌지역 및 日本 等地에서 많은 研究와 努力을 집중 시키고 있으며 앞으로 이와 類似한 Tunnel工法은 여러 分野에서 우리나라에도 導入活用될것으로 생각된다. 특히 수많은 技術者와 學者들의 研究結果 地震發生 地域에서의 耐震設計法의 눈부신 發展으로 地震地帶에서의 沈埋 Tunnel의 建設이 可能하게 되었다. 여기서 地震은 地域性이 強하기 때문에 各國의 事情에 알맞게 耐震設計法의

獨立的인 開發과 함께 相互 밀접한 情報 및 技術交換을 行하면서 적절한 檢討를 수행함이 必要하다. 筆者는 今後 이와같은 경우의 構造物 建設에 임하여 本文이 參考資料가 될 수 있을 것으로 생각하여 主로 美國과 日本에서 發達된 沈埋 Tunnel의 耐震設計法의 概要를 紹介하는 바이다.

參 考 文 獻

- 1) Tomas R. Kuesel; Earthquake Design Criteria for Subway, June 1969. Proc. of ASCE, ST6, pp.1213~1231.
- 2) Yoshinori Aoki and Hiroshi Maruyama; Spectra for Earthquake Resistive Design of Trench Type Tunnel, Technical Note of Port and Harbour Research Institute. No.172, December 1973, 87pp.
- 3) 浜田政則; 沈埋トンネル의 地震應答計算, 土木學會 第26回 年次學術講演會 講演集, 第一部,

- 1971.10. pp.317~118. Japan.
- 4) 中野拓治 外; 沈埋トンネル의 耐震計算 と 模型 振動實驗について, 港灣技研資料, No.172, 1973, pp.54~71.
- 5) 清宮理 外; 衣浦港海底トンネル 地震應答觀測 および 地震應答計算, 港灣技研資料, No.221, 1975, pp.3~67.
- 6) The Japan Society of Civil Engineers; Earthquake Resistant Design for civil Engineering Structures, Earth Structures and Foundations in Japan, 1977, pp.147~204.
- 7) 輪湖建雄, 清宮理; 沈埋トンネル・及び海底パイプライン, 上級港灣技術者 研究テキスト, 1980, pp.1~43.
- 8) 清宮理, 海底パイプライン의 耐震設計法 の 檢討, 港灣技研資料, No.307, 1978, pp.4~20.
- 9) 青木義典 丸山浩; 沈埋トンネル 耐震設計スペクトルについて, 港灣技術研究所報告, Vol.11, No.4, 1972, pp.301~308.