

津波避難シェルターの耐震設計

久木留 貴裕¹・大竹 省吾²・梅林 福太郎³・平栗 昌明⁴

¹正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 事業本部（〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1）
E-mail:kukidome@oriconsul.com

²正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 事業本部（〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1）
E-mail:ohatake@oriconsul.com

³正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 事業本部（〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1）
E-mail:umebayashi@oriconsul.com

⁴正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 事業本部（〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1）
E-mail:hirakuri@oriconsul.com

全国の沿岸地域では，沿岸に到達することが予想されている津波から，人命を守るため，緊急的，一時的な避難を行う場所の整備が進められている．また，津波からの避難が容易ではない地域においても既存ビルの避難ビル指定など様々な工夫がなされている．高知県では，平成24年3月31日に国から公表された津波高の推計値を踏まえ，既存の避難場所の整備に加え，より大きな津波にも対応できる新たな避難場所として津波避難シェルターの実用化に取り組んでいる．本報告では，現在室戸市佐喜浜町都呂地区で施工中の津波避難シェルターの計画，設計のうち，耐震設計について報告する．

Key Words : tsunami escape facility , tsunami shelter , water-proof mountain tunnel , seismic design

1. はじめに

全国の沿岸地域では，沿岸に到達することが予想されている津波から，人命を守るため，緊急的，一時的な避難を行う場所の整備が進められている．また，津波からの避難が容易ではない地域においても既存ビルの避難ビル指定など様々な工夫がなされている¹⁾．高知県では，平成24年3月31日に国から公表された津波高の推計値を踏まえ，既存の避難場所の整備に加え，より大きな津波にも対応できる新たな避難場所として津波避難シェルターの実用化に取り組んでいる^{2), 3)}．

本報告では，現在室戸市佐喜浜町都呂地区で施工中の津波避難シェルター（図-1）の計画，設計のうち，耐震設計について報告する．

2. 津波避難シェルターの構造

設計対象は，崖地用の津波避難シェルターであり，避難用の本体横坑と，換気と出口の機能を有する立坑より構成される．本体横坑は水密トンネルであり，常時の土水圧と地震荷重および津波による波圧を考慮した設計を行った．また，立坑は仮設のライナープレートが常時の

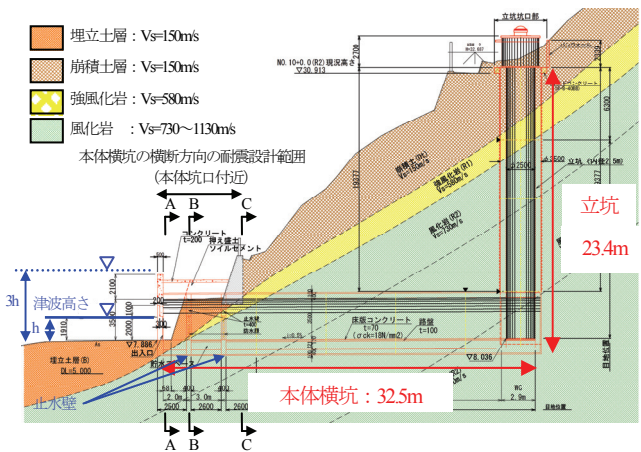
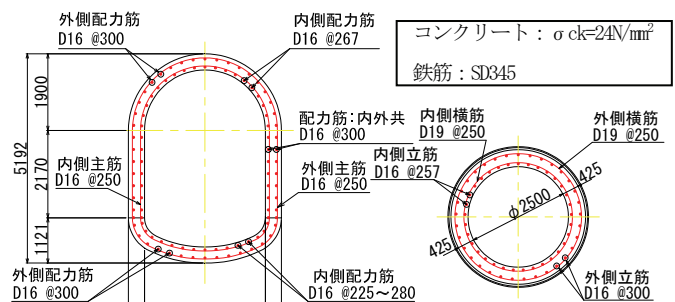


図-1 検討対象



(1)本体横坑の外周部材 (2)縦坑
図-2 常時の土水圧と津波波圧を考慮して設定した材料条件，配筋条件

偏土圧を受持つように設計しているため、埋戻し土の土圧と水圧、地震荷重および津波波圧に対して設計を行った。ここで、構造設計は常時、津波波圧作用時、地震時の順で行った。本編では、地震時の設計について報告する。地震動の作用を考慮しない状態での本体横坑の外周部材と立坑の配筋は、全区間にわたり図-2に示すとおりであった。また、止水壁の配筋は図-3に示すとおりであった。

3. 目標とする耐震性能

避難時における水密性の確保の観点より、耐震性と水密性に関する目標性能を設定した(表-1)。また、これを満足するため、シェルターの本体横坑、立坑、および構造目地に対する制限値の設定を行った(表-2)。ここで、津波避難シェルターには津波による水圧が直接作用することから、本体横坑に関しては、とくに高い水密性を確保するため、レベル2地震時の鉄筋の応答は弾性域に留めることとした。また、坑口付近に漏水の弱点となる構造目地を設けないこととした。立坑については、壁に貫通ひびわれが発生する可能性のある縦断方向の曲げモーメントによる鉄筋の応答は弾性域とし、横断方向は許容塑性率以下とした。

設計地震動は、レベル1地震動とレベル2地震動(タイプⅠ、タイプⅡ)を対象とした。設定方法を表-3に示す。また、設定した地震動波形を図-4～図-6に示す。

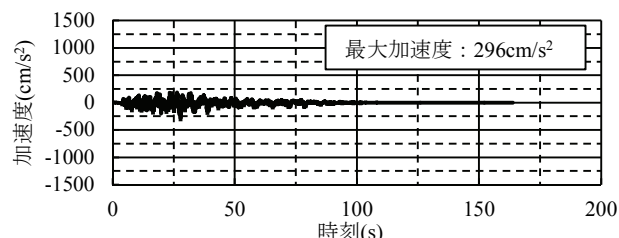


図-4 設計地震動 (レベル1: アスペリティⅠ)

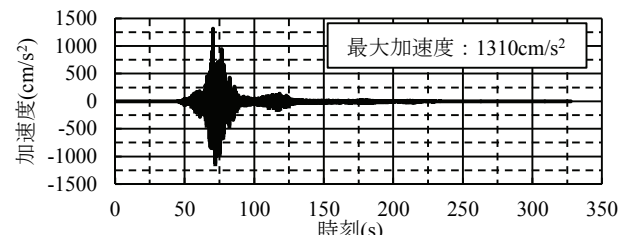


図-5 設計地震動 (レベル2タイプⅠ: 東側ケース)

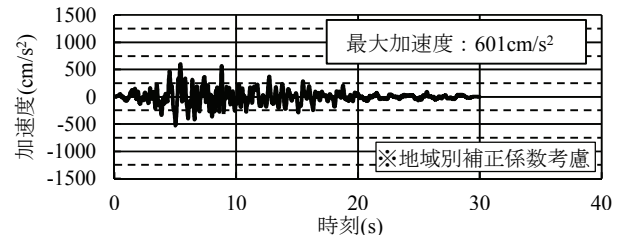


図-6 設計地震動 (レベル2タイプⅡ)

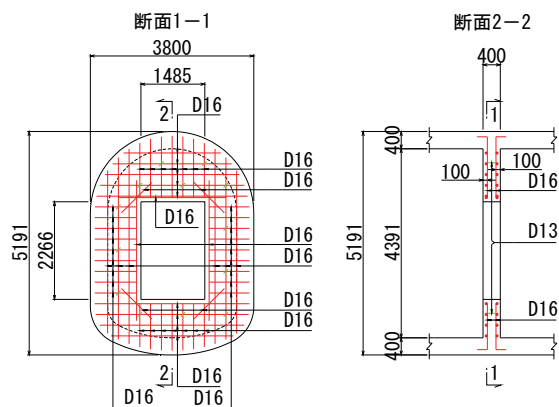


図-3 常時の土水圧と津波波圧を考慮して設定した止水壁の配筋条件

表-1 津波避難シェルターの目標性能

耐震性	設計地震動(推定南海地震(「南海トラフの巨大地震による最大クラスの震度分布 H24.3.31 内閣府」に対応した地震動), 直下型地震)に対して、浸水に繋がるひび割れ等が発生しない。
水密性	予測される津波(【高知県版第1弾】南海トラフの巨大地震による津波浸水予測について2012.5.10)からの水圧に対して水密性を確保する。

表-2 応答の制限値 (レベル2地震動)
(1)レベル1

	照査対象	照査項目	制限値
本体の横断方向	躯体	曲げ	降伏曲率に1.15の安全率
		せん断	許容せん断応力度以下
	止水壁	圧縮応力度	コンクリートの圧縮強度以下
本体と立坑の縦断方向	躯体	引張応力度	コンクリートの引張強度以下
		曲げ圧縮	コンクリートの許容圧縮応力度以下
		曲げ引張	コンクリートの引張強度以下
	構造目地	曲げ	ひびわれモーメント以下
		せん断	許容せん断応力度以下
		開き量	開き量に応じた継手の設置
立坑の横断方向	躯体	ずれ量	ずれ量に応じた継手の設置
		せん断	スリップバーのせん断降伏強度以下
		曲げ圧縮	コンクリートの許容圧縮応力度以下
立坑の横断方向	躯体	曲げ引張	鉄筋の許容引張応力度以下
		せん断	許容せん断応力度以下

※許容圧縮応力度・許容せん断応力度は道示Ⅳ⁴⁾による

(2)レベル2

	照査対象	照査項目	制限値
本体の横断方向	躯体	曲げ	降伏曲率以下
		せん断	せん断耐力以下
	止水壁	曲げ圧縮	コンクリートの圧縮強度以下
本体と立坑の縦断方向	躯体	曲げ引張	鉄筋の降伏強度以下
		曲げ圧縮	コンクリートの圧縮強度以下
		曲げ引張	コンクリートの引張強度以下
	構造目地	曲げ	降伏曲率以下
		せん断	せん断耐力以下
		開き量	開き量に応じた継手の設置
立坑の横断方向	躯体	ずれ量	ずれ量に応じた継手の設置
		せん断	スリップバーのせん断降伏強度以下
		曲げ	許容塑性率以下
立坑の横断方向	躯体	せん断	せん断耐力以下

※許容塑性率・せん断耐力は道示Ⅴ⁵⁾による

表-3 設計地震動の設定方法

地震動	設計地震動の設定方法
レベル1	高知県の被害想定で設定された安政南海地震を震源とするモデルの基盤波形 ⁶⁾
レベル2タイプⅠ	内閣府(2012)「南海トラフの巨大地震モデル検討会」で検討された震源モデルの基盤波形 ⁷⁾
レベル2タイプⅡ	兵庫県南部地震の観測波を用いて地中構造物用に設定されたタイプⅡ地震動 ⁸⁾ に、道示 ⁵⁾ の地域別補正係数0.85を考慮した基盤波形

4. 設計方法と結果

(1) 本体横坑の横断方向の耐震設計

緩い地盤が存在する本体横坑坑口付近（図-1）に対し耐震設計を行った。検討断面は、坑口部で地盤条件の異なるA-A断面、B-B断面と躯体がすべて岩盤内に位置するC-C断面の3断面（図-1）とした。全断面ともに地形が不整形なことから、地盤とシェルターを2次元非線形FEMによりモデル化し、動的解析による設計を行った。解析プログラムは、SoilPlus（（株）伊藤忠テクノソリューションズ）を用いた。

横断方向の耐震設計では、躯体の外周部材と止水壁を照査対象とした。ここで、躯体の外周部材を設計する際には、躯体の外周部材を非線形はり要素、地盤を平面ひずみ要素でモデル化（図-7(1)）し、躯体に発生する断面力を算出した。一方、止水壁を照査する際には、上記に加えて、止水壁をシェル要素でモデル化（図-7(2)）し、止水壁に発生する応力度を算出した。

レベル2地震動に対する動的解析の結果、躯体については、曲げは全部材ともに降伏曲率以下となったが、せん断については、コンクリートのみでは、せん断耐力を超過する部材があったため、せん断補強筋を配置することとした。また、止水壁については、圧縮応力度は、コンクリートの圧縮強度以下であった。引張応力度に対しては、局部的にコンクリートの引張強度を超過するものの、常時土水圧と津波波圧により決定した鉄筋が降伏強度以下となることを確認した（図-8）。

(2) 本体横坑と立坑の縦断方向の耐震設計

縦断方向の耐震設計は、本体横坑と立坑の坑口付近に緩い地盤が存在し、本体横坑と立坑の接合部が構造変化点となるため、構造全体系の骨組みモデルを用い、本体横坑の軸方向と軸直角方向の地震動を考慮した。時刻歴の応答変位法により耐震設計を行った。解析プログラムは、TDAPIII（（株）アーク情報システム）を用いた。

ここで、縦断方向の耐震設計では、躯体と構造目地を照査対象とし、モデルに作用させる地盤変位は、本体横坑の横断方向の動的解析により得られた本体横坑の上下端深度の変位の平均値と、立坑位置の地盤変位より補間して設定した。立坑位置の地盤変位は、別途、地盤の1次元地震応答解析(SHAKE)を行い算定した。また、本体横坑軸方向の地盤変位は、横断方向の解析モデルを面外方向に拡張して算定した。構造物と地盤のモデル化は、構造物を非線形はり要素、地盤を線形ばね要素とした（図-9）。構造目地のモデル化は軸方向については、圧縮側は剛、引張側は自由のばねとした。直角、鉛直方向については、スリッパを設置する箇所は、非線形ばね、スリッパを設置しない箇所は自由とした。回転

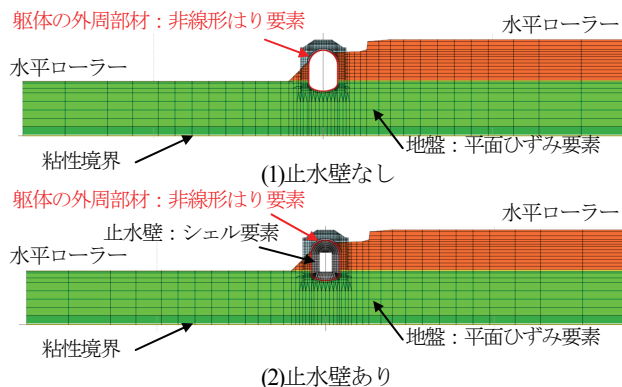
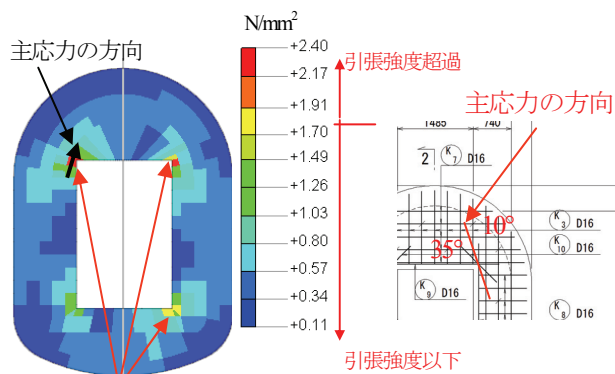


図-7 本体の横断方向の耐震設計モデル（B-B断面）



局部的に引張強度を超過

※コンクリートの引張強度：1.91N/mm²、鉄筋の降伏強度：345N/mm²

図-8 止水壁に発生する引張応力度(L2T I)と常時土水圧と津波波圧による配筋

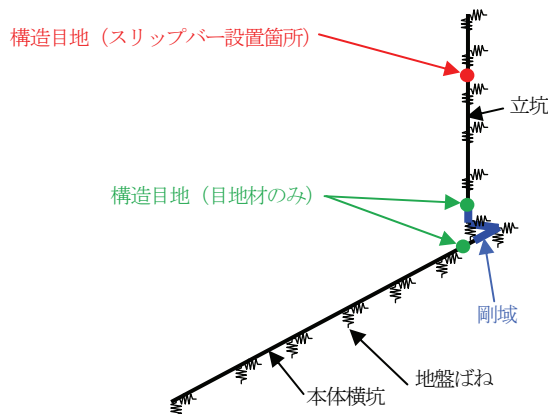


図-9 本体と立坑の縦断方向の耐震設計モデル

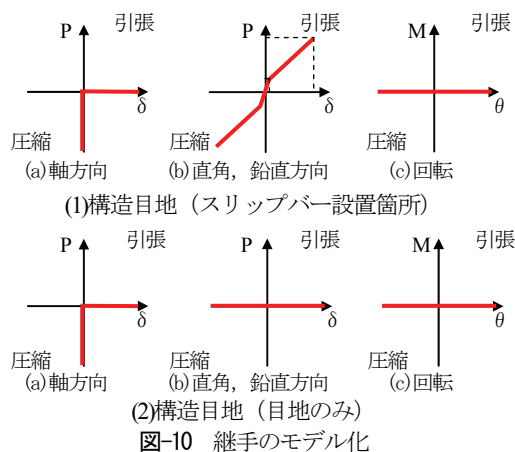


図-10 継手のモデル化

ばねについては自由とした（図-10）。

耐震解析結果より、立坑の地盤剛性の変化位置と、本体横坑との接合部に構造目地を設け応答変位に応じた止水ゴムを配置した。また、大きなせん断ずれの予想される立坑上側の構造目地にはスリップバーを設けた。

躯体については、レベル2地震時に、曲げ圧縮は、コンクリートの圧縮強度以下、曲げ引張は、コンクリートの引張強度以下となることを確認した。せん断については、本体の坑口部および立坑の天端付近でせん断耐力を超過する部材があったため、縦断方向のせん断力に対してせん断補強筋となる主鉄筋の径をランクアップすることで所要の耐震性能を満足させた。

(3) 立坑の横断方向の耐震設計

立坑の横断方向の耐震設計では、躯体を照査対象とした。図-11に解析モデルを示す。立坑の横断面は、左右対称な円形断面である。このため、躯体を非線形より要素、地盤を線形ばね要素とする1/2モデルとした。境界条件は、端部をX方向自由、Y方向自由、回転固定、中央部をX方向固定、Y方向自由、回転固定とした。作用荷重は、縦断方向の解析で得られた、地盤ばねの最大反力とし、これを躯体へ静的に作用させた。解析プログラムは、TDAPⅢ（（株）アーク情報システム）を用いた。

耐震設計の結果、立坑の天端付近の緩い層（崩積土層）では、輪切り方向において、レベル1地震動でコンクリートの許容圧縮応力度を超過し、レベル2地震動で、許容塑性率を超過するため、主鉄筋の径をランクアップした。また、せん断については、コンクリートのみでは、せん断耐力を超過するため、せん断補強筋を配置することで所要の耐震性能を満足することを確認した。

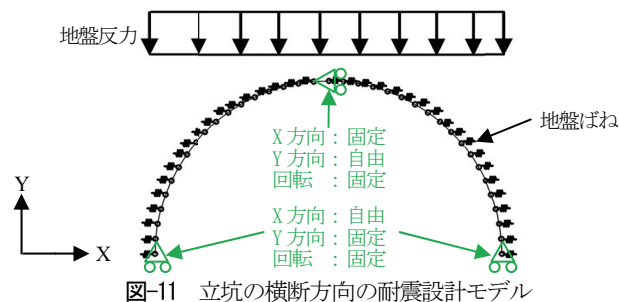
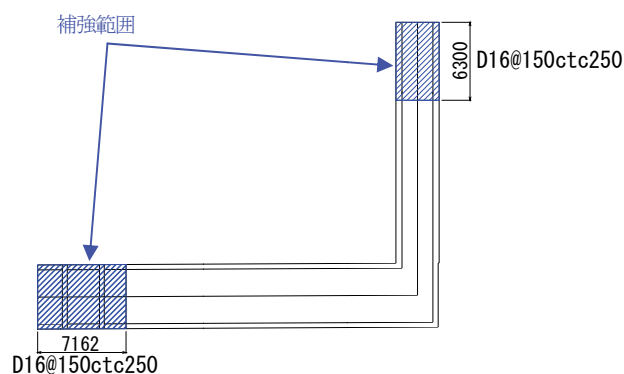
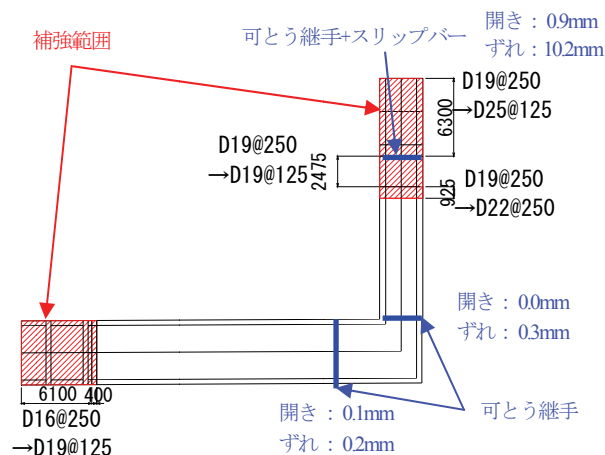


図-11 立坑の横断方向の耐震設計モデル



(1)せん断補強筋（輪切り断面に対する）



(2)主鉄筋と継手配置

図-12 補強範囲

5. おわりに

津波避難シェルターに対する地震時の目標性能を設定し、照査項目と制限値を定めて、耐震上の弱点に着目して耐震設計を行った。

図-12に耐震設計の結果による補強範囲を示す。本体横坑の坑口部および立坑の天端付近で輪切り断面に対するせん断補強筋を配筋することと、主鉄筋をランクアップすることで所要の耐震性能を満足する設計が行えた。また、構造目地の開き量とずれ量についても設計が行えた。

参考文献

- 1) 内閣府政府統括官（防災担当）：津波避難ビル等に係るガイドライン，2005。
- 2) 大竹省吾，堀田幸雄，有光郷司，服部和広，梶原唯

史，山川仙和：津波からの避難方法の選択に係るガイドラインの検討，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，VI-252，pp.503-504，2013。

- 3) 久木留貴裕，堀田幸雄，吉岡重雄，大竹省吾，倉田雅人，宇都宮毅：津波避難シェルターの技術検討，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，VI-253，pp.505-506，2013。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，2012。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2012。
- 6) 高知県：第 2 次高知県津波防災アセスメント調査事業，2002。
- 7) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデルの検討会（第 2 次報告）－強震断層モデルと震度分布について－，2012。

- 8) 首都高速道路：トンネル構造物設計要領（開削工法編），2008.

(2015.8.7 受付)

SEISMIC DESIGN OF TSUNAMI SHELTER

Takahiro KUKIDOME, Shogo OTAKE, Fukutaro UMEBAYASHI
and Masaaki HIRAKURI

Plans for the development of tsunami escape facility are progressing in all coastal areas in the country where tsunami disaster is expected. Especially, in the areas where it is not easy to escape from the tsunami, various measures against tsunami has been made, such as designation of evacuation building using existing buildings. In Kochi Prefecture, a Tsunami shelter is being constructed as one of tsunami escape facilities in Muroto city. The shelter is designed by the conventional tunneling method based on the official estimated tsunami height published by the Cabinet Office in March 31, 2012.

In this paper, the seismic design method and the evaluation of seismic capacity of the Tunami shelter are explained.