

津波避難ビルの構造部材性能に関する研究
— RC 耐力壁の崩壊波圧および限界波高における算定方法の検討 —
Study on Structural Performance of Tsunami Evacuation Buildings
— Evaluation Methods for Wave Pressure at Collapse and Critical Wave Height of RC Shear Walls —

○永吉琉莖¹, 上原皐暉¹, 北嶋圭二²

*Rui Nagayoshi¹, Koki Uehara¹, Keiji Kitajima²

Abstract: The 2011 Great East Japan Earthquake emphasized the need for tsunami evacuation buildings. The diagnostic manual of Shizuoka Prefecture evaluates RC shear walls using a complex procedure. This study examines a simplified method, deriving collapse loads and allowable wave pressure heights. Results showed values 0.75–0.87 times those of the manual, indicating the simplified approach reduces computational complexity while maintaining practical applicability.

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、地震に伴う津波により甚大な被害が生じり、多くの人命や財産が失われた。こうした被害を受け、人命の一時的な安全確保を目的として、全国的に沿岸域では津波避難ビル(Fig.1)や津波避難タワー(Fig.2)の整備が進められている。これまでに、津波避難ビルの整備・指定の一環として、「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に関わる暫定指針」(以下、新ガイドライン)²⁾が公表されている。さらに静岡県では、新ガイドラインの内容を踏まえた「静岡県既存建築物(RC造、S造)の対津波診断マニュアル」(以下、診断マニュアル)³⁾が策定されている。診断マニュアルは、主に建築構造技術者が既存建築物の対津波性能を診断するために制定されたものである。

本報では診断マニュアルに記載されているRC耐力壁の面外崩壊波圧および崩壊波圧に達する限界波圧高さ ah について解説し、これらをより簡便に算定する方法について検討する。

2. 診断マニュアルにおける算定方法の解説

本章では、診断マニュアルに記載されている、津波波圧によりRC耐力壁が面外方向に崩壊形を形成する崩壊荷重(以下、崩壊波圧)および崩壊波圧に達する限界波圧高さ ah (以下、限界波圧高さ)の算定方法について解説する。



Fig.1 Tsunami evacuation building



Fig.2 Tsunami evacuation tower

2.1 崩壊波圧の算定方法(診断マニュアル)

診断マニュアルの崩壊波圧算定で用いる作用波圧および算定モデルをFig.3a, b)に示す。診断マニュアルでは、津波波圧が台形分布で作用し、RC耐力壁を四辺固定と仮定し、Fig.3に示す亀甲形の降伏線が形成されるとする。Fig.3a)に基づき、台形分布作用時の外部仕事(図中式(1))を算定する。さらにFig.3b)に基づき、亀甲形の降伏線を仮定した場合の内部仕事(図中式(2))を算定する。これらを用い、仮想仕事の原理により崩壊波圧算定式(式(3))が得られる。なお、Fig.3b)の内部仕事の算定では、RC耐力壁の曲げモーメント成分(m_x, m_y, m_{xy})が同一条件下で終局状態に達すると仮定し、そのときの曲げモーメントを終局曲げモーメント M_u とする。

$$\frac{(w_1 + w_2)}{2} = 16M_u \frac{(L + H)}{L \cdot H^2} \quad (3)$$

L : 壁の幅(m) H : 壁の高さ(m)
 w_1 : 壁上端波圧(kN/m²)
 w_2 : 壁下端波圧(kN/m²)
 M_u : 終局曲げモーメント(kN・m/m)

W_E : 外部仕事

$$W_E = L \left(\int_0^{H/2} \left(\frac{w_1 - w_2}{H} x_1 + w_1 \right) \delta_{x_1} dx + \int_0^{H/2} \left(\frac{w_1 - w_2}{H} x_2 + w_2 \right) \delta_{x_2} dx \right) = \frac{1}{8} (w_1 + w_2) LH^2 \theta \quad (1)$$

W_I : 内部仕事

W_{I1} : 横辺縁の仕事 $W_{I1} = 2L \cdot m_x \cdot \theta$
 W_{I2} : 中央崩壊線の仕事 $W_{I2} = 2(L - H) \cdot m_x \cdot \theta$
 W_{I3} : 縦辺縁の仕事 $W_{I3} = 2H \cdot m_y \cdot \theta$
 W_{I4} : 斜め亀甲線の仕事 $W_{I4} = 4H \cdot m_{xy} \cdot \theta$

$$\Sigma W_I = W_{I1} + W_{I2} + W_{I3} + W_{I4} = 4(L + H) \cdot M_u \cdot \theta \quad (2)$$

※ $M_u = m_x = m_y = m_{xy}$

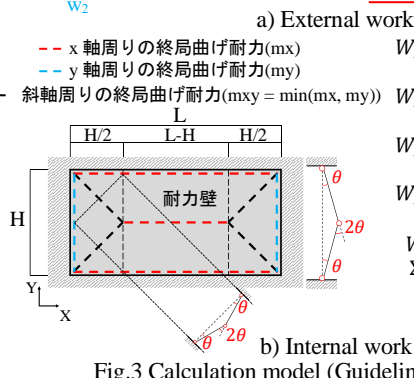


Fig.3 Calculation model (Guidelines for evaluation)

1 : 日大理工・院(前)・海建 2 : 日大理工・教員・海建

2.2 限界波圧高さの算定方法(診断マニュアル)

診断マニュアルでは、崩壊波圧算定式(式(3))を変形することで、RC耐力壁の限界波圧高さ ah を求めている。Fig.3a)に示す壁上端の作用波圧 w_1 、下端の作用波圧 w_2 を、新ガイドラインの津波波圧算定式(式(4))により式(5)、式(6)で表し、これらを崩壊波圧算定式(式(3))に代入・変形することで、限界波圧高さ算定式(式(7))が得られる。

$$q_z = \rho g(ah_H - z) \quad (4) \quad w_1 = \rho g(ah_H - H) \quad (5)$$

$$w_2 = \rho g \cdot ah_H \quad (6)$$

$$ah_H = \frac{16M_u \left(1 + \frac{H}{L}\right)}{\gamma \cdot H^2} + \frac{H}{2} \quad (7)$$

q_z : 作用波圧(kN/m²) g : 重力加速度(m/s²) L : 壁の幅(m)
 z : 波圧作用高さ(m) w_1 : 壁上端波圧(kN/m²) H : 壁の高さ
 ρ : 水の密度(=1t/m³) w_2 : 壁下端波圧(kN/m²)
 M_u : 終局曲げモーメント(kN・m/m) ah_H : 限界波圧高さ(m)
 a : 水深係数(=1.5, 2.0, 3.0) h : 浸水深(m)
 γ : 水の単位体積重量(kN/m³) ($\gamma = \rho g = 10 \text{ kN/m}^3$)

3. 算定方法の簡便化に関する検討

本章では、診断マニュアルに記載されている崩壊波圧および限界波圧高さの算定方法の簡便化に関して検討する。

3.1 単位幅あたりの崩壊波圧の算定方法(簡便化)

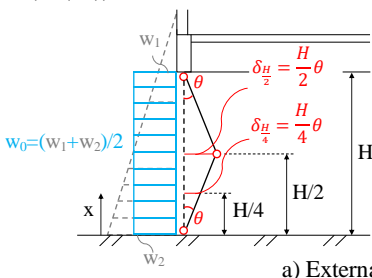
簡便化にあたり、用いる作用波圧および算定モデルをFig.4)に示す。本検討では、台形分布で作用した津波波圧を等分布 w_0 (w_1 と w_2 の平均値)として置き換え、RC耐力壁を四辺固定と仮定する。診断マニュアルの算定方法との主な相違は、亀甲形の降伏線を仮定するのではなく、幅方向および高さ方向にそれぞれ3ヒンジ崩壊機構を形成すると仮定する点である。また、算定には単位幅モデルを用いる。Fig.4a)に基づき、等分布荷重作用時の外部仕事(式(8)、式(9))を算定する。さらにFig.4b)に基づき、3ヒンジ崩壊機構を仮定した場合の内部仕事(式(10)、式(11))を算定する。これらを用い、仮想仕事の原理により崩壊波圧算定式(式(12))が得られる。

$$w_0 = 16M_u \frac{(L^3 + H^3)}{L^3 \cdot H^2} \quad (12) \quad w: \text{波圧(kN/m}^2\text{)} \quad L: \text{壁の幅(m)} \quad H: \text{壁の高さ(m)}$$

$$M_u: \text{終局曲げモーメント(kN} \cdot \text{m/m)}$$

3.2 限界波圧高さの算定方法(簡便化)

診断マニュアルの算定方法と同様に、崩壊波圧算定式(式(12))を変形することで、RC耐力壁の限界波圧高さ ah を求める。新ガイドラインの津波波圧算定式(式(4))により作用波圧 w_0 を式(13)で表し、これを崩壊波圧算定式(式(12))に代入・変形することで式(14)が得られる。なお、



W_{EL} : 幅方向の外部仕事

$$W_{EL} = 2 \int_0^L w_0 \delta_x dx = \frac{1}{4} w_0 L^2 \theta \quad (8)$$

W_{EH} : 高さ方向の外部仕事

$$W_{EH} = 2 \int_0^H w_0 \delta_x dx = \frac{1}{4} w_0 H^2 \theta \quad (9)$$

a) External work

波圧作用高さ z は、 w_1 と w_2 の平均値である等分布 w_0 を用いるため、 $H/2$ とする。

$$w_0 = \rho g \left(ah_U - \frac{H}{2} \right) \quad (13)$$

$$ah_U = \frac{16M_u \left(1 + \frac{H^3}{L^3}\right)}{\gamma \cdot H^2} + \frac{H}{2} \quad (14)$$

ρ : 水の密度(=1t/m³) L : 壁の幅(m) H : 壁の高さ(m)
 g : 重力加速度(m/s²) M_u : 終局曲げモーメント(kN・m/m)
 w : 波圧(kN/m²) ah_U : 限界波圧高さ(m)
 a : 水深係数(=1.5, 2.0, 3.0) h : 浸水深(m)
 γ : 水の単位体積重量(kN/m³) ($\gamma = \rho g = 10 \text{ kN/m}^3$)

4. 崩壊波圧および限界波圧高さの算定結果比較

本章では、診断マニュアルの算定方法と簡便化した算定方法の算定結果を比較する。崩壊波圧は式(3)および式(12)、限界波圧高さは式(7)および式(14)を用いる。

算定条件をTable 1)に示す。算定は4ケースとし、崩壊波圧および限界波圧高さの算定は、いずれも耐力壁の寸法をパラメータとする。なお、終局曲げモーメント M_u は、Table 2)の耐力壁の算定値を用いた。算定結果をTable 3)に示す。Table 3)より、算定方法を簡便化した算定結果は、崩壊波圧が0.75~0.78倍程度、限界波圧高さは0.79~0.87倍程度となることを確認した。また、Case1,2は適用外であった。

5. まとめ

本報では、診断マニュアルに示される算定方法の簡便化について検討した。算定の結果、簡便化し算定した崩壊波圧は診断マニュアルの0.75~0.78倍、限界波圧高さは0.79~0.87倍となり、算定値に大きな差は認められなかった。以上より、診断マニュアルに示される算定方法は、算定値に大きな差もなく簡便化が可能であるといえる。

6. 参考文献

- 日本建築学会:2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2011.7
- 国住指第2570号, 津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について(東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビルの構造上の要件に係る暫定指針, 2011.11.17)
- 一般社団法人 静岡県建築士事務所協会:静岡県既存建築物(RC造, S造)の対津波診断マニュアル, 2015.8

Table 2 Details of RC shear walls

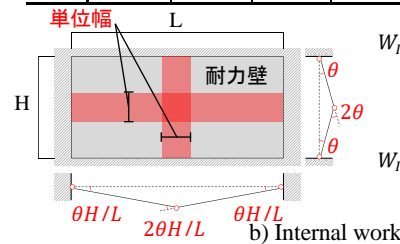
ケース	Case. 1, 2	Case. 3, 4		
壁厚	150	150		
断面				
縦筋			R9-150@S	D13-100@S
横筋			R9-150@S	D13-100@S
材種			SR235	SD295
終局曲げモーメント M_u [kN・m/m]	6.73	25.23		

Table 1 Analytical conditions

ケース	耐力壁寸法	
	幅 L [m]	高さ H [m]
Case. 1, 3	6.0	3.0
Case. 2, 4	9.0	3.0

Table 3 Analytical results

ケース	診断マニュアル		簡便化		比(簡便化/診断マニュアル)	
	崩壊波圧 (w_1+w_2)/2 [kN/m ²]	限界波圧 高さ ah_H [m]	崩壊波圧 w_0 [kN/m ²]	限界波圧 高さ ah_U [m]	崩壊波圧	限界波圧高さ
Case. 1	17.9	3.3	13.5	2.8	0.75	0.85
Case. 2	15.9	3.1	12.4	2.7	0.78	0.87
Case. 3	67.3	8.2	50.5	6.5	0.75	0.79
Case. 4	59.8	7.5	46.5	6.1	0.78	0.81



W_{IL} : 幅方向の内部仕事

$$W_{IL} = \frac{4H}{L} \cdot M_u \cdot \theta \quad (10)$$

W_{IH} : 高さ方向の内部仕事

$$W_{IH} = 4 \cdot M_u \cdot \theta \quad (11)$$

Fig.4 Calculation model (Simplified method)