

ねじれ応答のスペクトルモーダル法に関する基礎的研究 Fundamental Research of Spectrum modal method of Twist response

○5086 河村諒², 古橋剛¹, 幅上慎吾³

*Ryo Kawamura², Takeshi Furuhashi¹, Shingo Habaue³

Abstract: Present, eccentric structures are evaluate by time history response analysis. And they are designed by eccentricity of in each direction of x-axis and y-axis direction. Eccentricity is evaluated separately about x-axis and y-axis direction in Building Standards Law. In former research, different displacements occur even with same eccentricity between uniaxial eccentricity and biaxial eccentricity. Therefore, in this research, Absolute Value Sum Method and SRSS Method are examined by compared with time history response analysis.

1.はじめに

現在、偏心する構造物は、x 軸方向 y 軸方向それぞれの方向の偏心率による設計や時刻歴応答解析によって評価がなされている。

現行の基準法において偏心率は x 軸方向、y 軸方向それぞれの方向を個別に評価しており、互いの偏心の影響は考慮されていない。しかし、過去の研究により一軸偏心と二軸偏心では同じ偏心率でも異なる変位が生じ、一方向だけでは正しい評価が行えない可能性があるということが示された。だが、その際にスペクトルモーダル法の中で絶対値和を用いて計算をしていたが、SRSS 法を用いての検証がされていなかった。

そこで、本報ではスペクトルモーダル法を使用する際の算出方法で絶対値和法と SRSS 法を様々な条件下で比較検討し、どちらが時刻歴応答解析と比較した際により正確な値が検出できているのかを検討する。

2.研究方法

本研究では Figure2-1 に示す立体モデルを用いて建物の振動モードを 3 つの基本形に縮約し、スペクトルモーダル法による 2 通りの変位算出によって検討したものと時刻歴応答解析とを比較する。また、モデルの各要素は Figure2-1 と Table2-1 に示す。

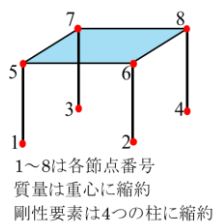


Table2-1. Structure

構造要素	記号	節点番号	設定
節点	1~8	-	
柱	C1	1-5	-
	C2	2-6	
	C3	3-7	
	C4	4-8	
床	S1	5-6,8-7	剛床
梁	B1	5-6	剛性∞
	B2	7-8	
	B3	5-7	
	B4	6-8	

Figure2-1. Three dimensional model

1 層 3 自由度の重心の応答変位 $\mathbf{d}^T = \{d_x, d_y, d_z\}$ は地震動の入力方向と x 軸とのなす角を ϕ とおいて絶対値和法を用いて表された式が(2-1)、SRSS 法を用いて表

された式が式(2-2)である。

$$\begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{Bmatrix} = \left| \beta_{1\phi} \begin{Bmatrix} r_{1x} \\ r_{1y} \\ r_{1z} \end{Bmatrix} q_1 + \beta_{2\phi} \begin{Bmatrix} r_{2x} \\ r_{2y} \\ r_{2z} \end{Bmatrix} q_2 + \beta_{3\phi} \begin{Bmatrix} r_{3x} \\ r_{3y} \\ r_{3z} \end{Bmatrix} q_3 \right| \quad (2-1)$$

$$\begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{Bmatrix} = \sqrt{(\beta_{1\phi} \begin{Bmatrix} r_{1x} \\ r_{1y} \\ r_{1z} \end{Bmatrix} q_1)^2 + (\beta_{2\phi} \begin{Bmatrix} r_{2x} \\ r_{2y} \\ r_{2z} \end{Bmatrix} q_2)^2 + (\beta_{3\phi} \begin{Bmatrix} r_{3x} \\ r_{3y} \\ r_{3z} \end{Bmatrix} q_3)^2} \quad (2-2)$$

ここで使われている $\beta_{i\phi}$, $\mathbf{r}_i^T = \{r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}\}$, q_i はそれぞれ各モード i の ϕ 方向に地震動を入力した場合における刺激係数、固有ベクトル、基準座標応答である。また、固有ベクトルの各成分は上部が x 方向、中部が y 方向の並進成分、下部がねじれ成分である。

地動 \ddot{g}_0 の ϕ 方向入力に対する 1 層 3 自由度の運動方程式を式(2-3)に示す。

$$\begin{bmatrix} m & & \\ & m & \\ & & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x & 0 & K_x e_y \\ 0 & K_y & -K_y e_x \\ K_x e_y & -K_y e_x & K_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m \\ m \\ I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \phi \\ -\sin \phi \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{g}_0 \quad (2-3)$$

m : 層質量 I : 床の回転半径 ϕ : x 軸と地震動の入力方向のなす角

K_x, K_y : 各方向の層剛性 K_θ : 重心まわりのねじれ剛性 e_x, e_y : 偏心距離 g_0 : 地動

式(2-2)を $i = \sqrt{I/M}$, $\bar{e}_x = e_x / i$, $\bar{e}_y = e_y / i$, $z = i\theta$ と置いて変形すると式(2-4)が得られ、固有値問題の方程式は式(2-5)となる。

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x^2 & 0 & \omega_x^2 \bar{e}_y \\ 0 & \omega_y^2 & -\omega_y^2 \bar{e}_x \\ \omega_x^2 \bar{e}_y & -\omega_y^2 \bar{e}_x & \omega_\theta^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \cos \phi \\ -\sin \phi \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{g}_0 \quad (2-4)$$

$$\lambda^2 \begin{Bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x^2 & 0 & \omega_x^2 \bar{e}_y \\ 0 & \omega_y^2 & -\omega_y^2 \bar{e}_x \\ \omega_x^2 \bar{e}_y & -\omega_y^2 \bar{e}_x & \omega_\theta^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{Bmatrix} \quad (2-5)$$

ここで λ^2 は固有値である。

$$\beta_\phi = \frac{r_x \cos \phi - r_y \sin \phi}{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \quad (2-6)$$

なお、固有値計算を行った際に求められる固有値は固有ベクトルにおいて、固有値はモード 1 が $r_x = 1$ モード 2 は $r_y = 1$ モード 3 は $r_z = 1$ とする。

この刺激係数と各モードの固有値を掛け合わせたものが刺激関数となる。

基準座標応答については、各モードの固有値から固有周期を求め、応答変位スペクトルを用いて各モードの応答値を算出する。この値を S_d と置き、各モードの基準座標応答は式(2-7)と示す。

$$q_1 = S_{1d} \cos \phi \quad q_2 = S_{2d} (\sin \phi) \quad q_3 = S_{3d} \times 0 = 0 \quad (2-7)$$

3.研究内容

Figure2-1 に示したモデルにおいて Table3-1 で示したような諸元を与え、Table3-2 にある二軸偏心モデルの諸元にある値を使って検討を行う。Figure3-2 のように重心の位置を動かして偏心率ごとの検討を行う。

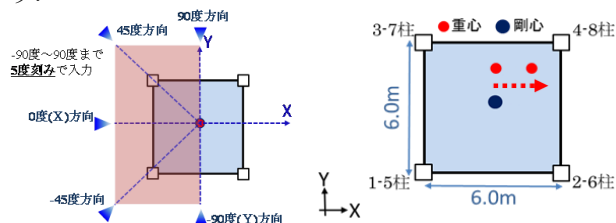


Figure3-1.Ground motion direction Figure3-2.Model plane

Table3-1.Model

	方向	単位	値
質量	—	[ton]	100
剛性	X方向	[kN/m]	2000
	Y方向	[kN/m]	2400

Table3-2.Biaxial eccentricity model

偏心率	偏心率	偏心距離	偏心距離	固有周期(s)		
				モード1	モード2	モード3
0.15	0.10	0.41	0.67	1.43	1.29	0.76
0.15	0.15	0.61	0.67	1.43	1.30	0.75
0.15	0.20	0.81	0.67	1.43	1.31	0.74
0.15	0.25	1.02	0.67	1.44	1.33	0.73
0.15	0.30	1.22	0.67	1.45	1.34	0.72

4.研究結果

重心変位を算出する際の計算方式で SRSS 法と絶対値和法を比較検討する。今実験で用いる地震動は BCJ L2(以後 BCJ)と EL Centro 1940 NS(以後 EL Centro)である。また減衰はレイリー減衰を用い、モード 1, 2 に $h=5\%$ とする。

初めに、EL Centro, BCJ とともに x 軸方向変位と y 軸方向変位を別で算出したのだが、絶対値和と SRSS のどちらも変位が応答解析と大きくずれてしまう結果となった。

そこで、x 方向変位と y 方向変位のベクトル和を用いて結果を求めたものが以下のグラフである。グラフからも分かるように偏心率が小さい時ほど、時刻歴応答解析とスペクトルモーダルの解析結果の変位は近い値となっている。この研究において、BCJ と EL Centro を用いた理由は模擬波と観測波の違いを見るためである。予想では、模擬波(BCJ)の方がスペクトルモーダルの解析結果により近い値になると考えていたが、実際は今回の解析結果では観

測波 (EL Centro) の方がより近い値を取り、スペクトルモーダルも有用であった。

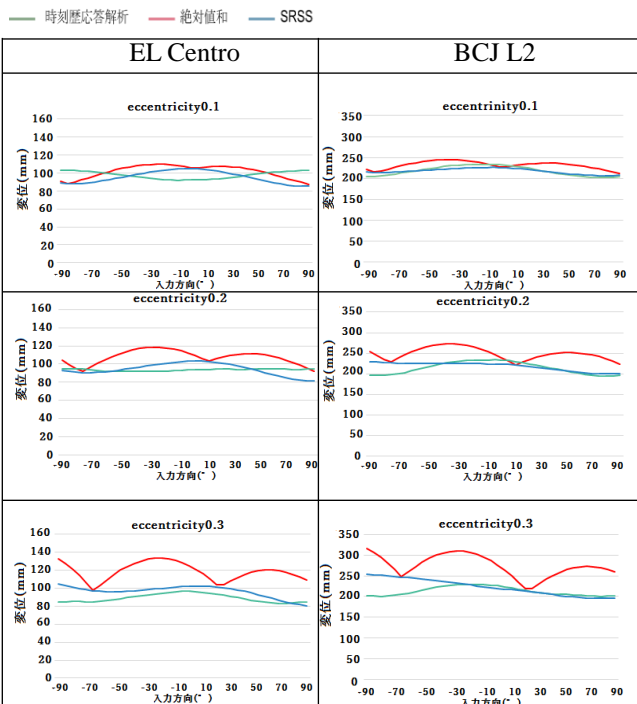


Figure4 Gravity's center displacement

しかし偏心率 0.1, 0.2 の EL Centro のとき -90° から -60° , 60° から 90° の辺りで時刻歴応答解析の値がスペクトルモーダルを上まわった結果になっている。これは応答解析がねじれによる変位を考慮しているためだと推測できる。またさらに、偏心率が 0.2, 0.3 と大きくなった場合、絶対値和より SRSS の方が時刻歴応答解析の解析結果に近い値をとる傾向にある。これによりスペクトルモーダル法において SRSS 法は絶対値和法よりも近い値を取ることができ、それが有用であることが分かる。

5.まとめ

今回の研究で、スペクトルモーダル法による解析では SRSS 法が有用である可能性を示した。また、注意すべき点は、x 軸方向変位と y 軸方向変位を別々で算出すると結果に大きな差異が生まれることや応答解析は偏心率によっては、時刻歴応答解析の変位がスペクトルモーダルを上まわってしまうことがあることである。

しかし、今回の 2 つの地震動に関しては偏心率が大きい方が時刻歴応答解析よりもスペクトルモーダルが安全側にあり、さらに SRSS に関しては絶対値和と比較すると、その解析結果の数値が時刻歴応答解析の解析結果の値に近くなった。

6.参考文献

- [1] 増澤拓也「並進とねじれの連成振動モードに関する基礎的研究」
- [2] 染谷勝太 加瀬友貴「偏心による構造物崩壊の基礎的研究」
- [3] 柴田明德「最新耐震構造解析第 2 版」森山出版