

十勝沖地震により被害をうけた八戸市立図書館の解析

Analysis of Hachinohe Library damaged by Tokachi-Oki Earthquake

田中 尚*・岡田 恒男**

Hisashi TANAKA and Tsuneo OKADA

1. ま え が き

1968年十勝沖地震によりいくつかの鉄筋コンクリート造建築に被害が生じた。その被害の状況および被害原因の考察の一部はすでに報告したが^{1),2)}、その後引き続き、八戸市立図書館の被害原因に問題を限り解析検討を行ってきた。問題の性質上被害の原因などを単純に結論づけるのは困難であるが、ここに一応の結論を得たので報告する。なお本報は前報(文献1)の後半を補足するもので、前報と同じく筆者達の他、大沢胖(東大地震研教授)、村上雅也(千葉大講師)、宇田川邦明(東大生研技官)、西川孝夫(都立大助手)らによる研究グループの研究成果である。

2. 建物と被害の概要

この建物は、概略図1に示した平面をもつ平家建で、構造形式は鉄筋コンクリートラーメン構造を主体とするが建物の東寄りに鉄筋コンクリート壁が配置されている。

十勝沖地震によりラーメン部分は、柱頭または柱脚のコンクリートが大きく圧壊すると共に鉄筋が露出し、壁部分はせん断破壊した。建物全体でみると図1に破線で記入したように壁付近を中心としてねじれ振動を生じた形跡を残した。(詳細は文献1)、2)参照)

3. 解 析

地震時の建物の挙動を推定するために、前報には振動解析の1例を示したが、この種の解析結果は骨組のモデル化、入力地震波、減衰など解析上の仮定の影響を大きくうけるのが通常である。

今回の解析結果はこれらの仮定を種々変化させて解析を行ない、建物の地震時の挙動を把握することを試みたものである。

(1) 固有振動特性

この建物の振動モデルとして、剛な屋根板が水平方向にのみ自由度をもつラーメンおよび壁により支持されているものを採用すれば、固有振動特性は骨組の剛性の評価方法により異なり、この建物のように壁が配置されている場合には特に壁の剛性評価が重要な問題となる。さらに地震により破壊に至る過程では骨組の塑性化のためにその剛性は刻々変化しているものと思われる。そこで

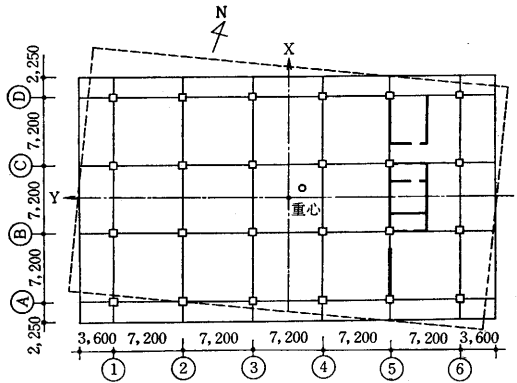


図1 八戸図書館平面

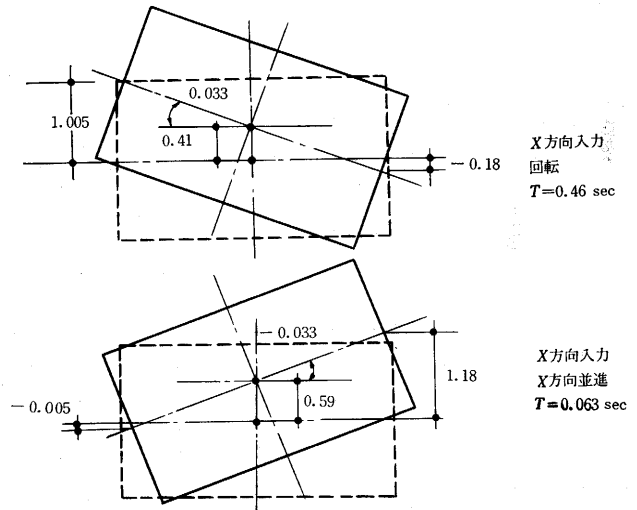


図2 固有振動形例—Case 9— (記入数字は刺激関数)

ラーメン剛性および壁剛性を表1に示したようにそれぞれ3種の方法により求め、それらを表2のように組合せた9種について固有振動特性を検討した。すなわち図3は鉄筋コンクリート構造物の復元力・変位曲線をモデル化したものであり解析に用いる剛性はOCで表わされる剛性(弾性剛性と呼ぶ)およびOYで表わされる剛性(降伏点剛性と呼ぶ)とを用いた。降伏点剛性は建物にある程度キレツが生じた後の骨組を想定したものである。

表2に示したように弾性剛性を用いた場合には純ラーメンの周期は0.29~0.37secで、壁を考慮すると並進形の2次、3次周期は短くなるが回転形の1次周期は、0.26~0.32secで純ラーメンの周期と大差ない。また、剛

* 東京大学生産技術研究所 第5部, ** 同 第1部

研究速報

心はいずれも重心より11~12m東側すなわち壁付近である。このように弾性的にみるとラーメンおよび壁の剛性評価の方法を変化させても骨組の固有振動性状はあまり変化しない。回転形の1次振動形をみるといずれの場合も前報で述べたと同様西端ラーメンの刺戟関数³⁾はほぼ1であり、この建物のラーメン部分は弾性的には0.3sec前後の周期特性をもつ地震波の影響を受けやすいといえよう。

今回の地震の際、この建物付近の地動の大きさは200gal~300gal程度と予想されているが、過去の地震加速度記録より梅村魁が導びいた標準変位応答に関する式

$$S_d = 90 \cdot k \cdot T^2 \quad (T < 0.5 \text{ sec})$$

ここで S_d : 応答変位 (cm), k : 地動加速度/重力加速度, T : 固有周期 (sec)

によれば、200~300galの地動に対し0.3secの周期特性をもつ構造物の応答変位は1.6~2.4cmとなり、この建物の西端ラーメンの変位が弾性降伏点変位(図3の Y_E)

表2 仮定骨組とその特性

Case	ラーメンと壁の剛性の組合せ ^{*1}		剛心位置(m) ^{*2}		固有周期(sec)		
	ラーメン剛性	壁剛性	南北	東西	1次	2次	3次
1	弾性・剛域無視 (No. 1)	—	0	0	0.37 (南北並進)	0.37 (東西並進)	—
2	弾性・剛域考慮 (No. 2)	—	0	0	0.29 (南北並進)	0.29 (東西並進)	—
3	降伏点剛性 (No. 3)	—	0	0	0.52 (南北並進)	0.52 (東西並進)	—
4	弾性・剛域無視 (No. 1)	弾性・曲げせん断変形 (No. 4)	0	-11.41	0.32 (回転)	0.14 (東西並進)	0.053 (南北並進)
5	弾性・剛域考慮 (No. 2)	同上	0	-11.20	0.27 (回転)	0.13 (東西並進)	0.053 (南北並進)
6	弾性・剛域無視 (No. 1)	弾性・せん断変形・開口 (No. 5)	0.63	-11.90	0.31 (回転)	0.14 (東西並進)	0.062 (南北並進)
7	弾性・剛域考慮 (No. 2)	同上	0.60	-11.57	0.26 (回転)	0.11 (東西並進)	0.062 (南北並進)
8	降伏点剛性 (No. 3)	降伏点剛性 (No. 6)	0.57	-12.18	0.44 (回転)	0.23 (東西並進)	0.063 (南北並進)
9	同上	東西方向0, 南北方向No. 6	0	-12.10	0.52 (東西並進)	0.46 (回転)	0.063 (南北並進)

*1 No. は表1による。

*2 重心よりの距離で、北方および西方が正。

点の変位) 約1cmを超える可能性があることがわかる。

降伏点剛性を用いた場合は、純ラーメンの周期は0.52secで、壁を考慮すると回転形の周期は0.44~0.46secとなった。図2にCase9の振動形の1例を示したが、振動形は弾性剛性を用いた場合と大差ない。Case9はCase8で東西方向の壁が完全に破壊し剛性を失なった場合を想定したものであるが、この両者の特性と、この建物の破壊後の屋上における微動測定により周期0.55secの回転形と周期0.42secの東西並進形の振動形が卓越して観測されたことをあわせ考えると塑性範囲におけるこの建物の特性はCase8あるいはCase9程度であったことが予想される。

(2) 応答解析

前項の検討によりこの建物は200~300galていどの地

表1 剛性計算法

No.	対象	計算方法
1	ラーメン	弾性剛性 ^{*1} 剛域を無視した撓角法。
2	"	" 剛域を考慮した撓角法。剛域としては梁柱接合部全域をとった。
3	"	降伏点剛性 (No. 1の弾性剛性) × (柱断面の降伏点における塑性係数) ^{*2}
4	壁	弾性剛性 ^{*1} 曲げ、せん断変形を考慮した線材理論。付帯ラーメンは壁断面に算入し、開口無視。
5	"	" せん断変形のみ考慮した線材理論。付帯ラーメンは別に取扱い、開口の影響考慮 ^{*3}
6	"	降伏点剛性 (No. 5の弾性剛性) × (塑性係数) ^{*4}

*1 コンクリートヤング率=2.1×10⁸ kg/cm², せん断弾性係数=0.9×10⁸ kg/cm²。

*2 ラーメンの降伏形は柱降伏形であるから、柱の降伏点をラーメンの降伏点とした。塑性係数=(断面の降伏点曲げ剛性)/(断面の弾性曲げ剛性)。降伏点曲げ剛性は梅村魁のe関数法によった。

*3 (開口による剛性低下率)=(1-開口周比)を弾性剛性に乗じた。

*4 東西方向0.2, 南北方向1.0とした。

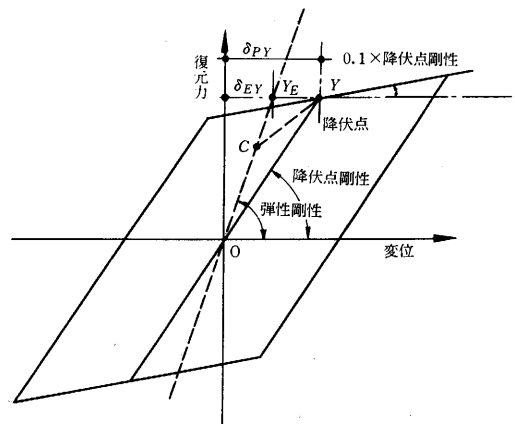


図3 復元力特性

(δ_{EY} を弾性降伏点変位, δ_{PY} を塑性降伏点変位と呼ぶ)

NO	骨組		固有周期(sec)			地震波			応答最大変位 (cm)											
	Case	東西方向	南北方向	T ₁	T ₂	T ₃	名称	地震波の方向		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
								建物NS	建物EW											
1	1	ラーメン (弾性剛性)	ラーメン (弾性剛性)	0.37	0.37	-	八戸	NS 1.0*	-											
2	2	〃	〃	0.29	0.29	-	〃	〃	-											
3	3	ラーメン (降伏点剛性)	ラーメン (降伏点剛性)	0.52	0.52	-	〃	〃	-											
4	〃	〃	〃	〃	〃	-	〃	NS 1.5	-											
5	〃	〃	〃	〃	〃	-	〃	EW 1.5	-											
6	〃	〃	〃	〃	〃	-	〃	NS 1.0	EW 1.0											
7	〃	〃	〃	〃	〃	-	〃	NS 1.5	〃											
8	〃	〃	〃	〃	〃	-	〃	〃	EW 1.5											
9	〃	〃	〃	〃	〃	-	EL CENTRO	NS 1.0	EW 1.0											
10	〃	〃	〃	〃	〃	-	TAFT	〃	〃											
11	9	〃	壁付ラーメン (降伏点剛性)	0.52	0.46	0.063	八戸	NS 1.0	-											
12	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	NS 1.5	-											
13	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	NS 1.0	EW 1.0											
14	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	NS 1.5	〃											
15	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	EW 1.5											
16	8	壁付ラーメン (降伏点剛性)	〃	0.46	0.23	0.063	〃	NS 1.0	-											
17	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	NS 1.5	-											
18	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	-	EW 1.0											
19	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	-	EW 1.5											
20	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	NS 1.0	EW 1.0											
21	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	NS-1.0	〃											
22	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	EW 1.0	NS 1.0											
23	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	EW-1.0	〃											
24	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	NS 1.5	EW 1.0											
25	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	EW 1.5											
26	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	NS-1.5	〃											
27	〃	〃	〃	〃	〃	〃	EL CENTRO	NS 1.0	EW 1.0											
28	〃	〃	〃	〃	〃	〃	TAFT	〃	〃											

図4 八戸図書館応答最大変位 (* 地震記録の方向および倍率を示す)

動により塑性範囲に入ることが予想された。本項では塑性範囲での振動性状を更に詳しく調べる目的で Case 1, 2, 3 および Case 8, 9 について線形および非線形応答解析を行なった結果について述べる。

1) 基本式および計算法

2方向入力を考慮した重心に関する強制振動方程式は床板を剛と仮定すると図1の座標軸に従がう

$$[M]\{\ddot{u}\} + \frac{h}{\omega_1}[K]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_0\} \quad (1)$$

ここで

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} \Sigma C_{X_i} & 0 & e_y \Sigma C_{X_i} \\ 0 & \Sigma C_{Y_i} & e_x \Sigma C_{Y_i} \\ e_y \Sigma C_{X_i} & e_x \Sigma C_{Y_i} & J + e_x^2 \Sigma C_{Y_i} + e_y^2 \Sigma C_{X_i} \end{bmatrix}$$

$$\{\ddot{u}\} = \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} \quad \{\dot{u}\} = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad \{u\} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix} \quad \{\ddot{u}_0\} = \begin{bmatrix} \ddot{X}_0 \\ \ddot{Y}_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

m: 質量, I: 重心軸まわりの回転慣性
 X, Y: それぞれ X 軸, Y 軸方向の基礎よりの相対変位
 θ: 重心軸に関する回転角
 C_{Xi}, C_{Yi}: それぞれ X 軸, Y 軸方向の水平剛性

e_x, e_y: それぞれ X 軸, Y 軸方向の偏心距離
 J: 剛心まわりのねじれ剛性
 Ẍ₀, Ÿ₀: それぞれ X 軸, Y 軸方向の地動加速度
 h: 減衰定数
 ω₁: 1次円振動数

数値計算は時間きざみ 1/200 sec で線形加速度法により行ない、非線形応答の場合には各柱の剛性を各時刻の変位に従って求めた。この際の柱の復元力特性は図3のように bi-linear に仮定した。

2) 地震波

建物周辺における地震動に関する確実なデータが得られていないので、通常計算に多く用いられている1940年 EL CENTRO 地震波 (最大加速度 325 gal), 1952年 TAFT 地震波 (最大加速度を 325 gal に拡大) および十勝沖地震における八戸港湾の記録 (最大加速度 225 gal) のそれぞれ NS, EW 2方向成分を用いた。なお2方向入力の場合は記録の方向を建物の方向と一致させるのを原則としたが、八戸地震波の場合には方向を逆にした場合、符号を逆にした場合および1.5倍に拡大した場合などについても検討した。

3) 解析結果

前記の仮定により計算した応答解析結果のうち応答最

研究速報

ュールが求まる. 表 1, 2 に計算に先だち与えるべき条件と得られる解を示す. また計算の流れを図 1 に示す.

ただし (7) の P は Sims の式⁴⁾ により, 材料の温度降下は Wenzel⁵⁾ によった.

4. 計算結果

表 3 に示す 6 スタンドホットタンデムミルの諸定数を用いた 3 種類の圧延条件を対象として, ①製品板厚の長手方向変動最小, ②製品形状の長手方向変動最小, にする最適パススケジュールを求めた結果を図 2, 3 に示す.

また製品板厚および形状の長手方向変動を最小にする最適パススケジュールと, 実際操業データとの比較を図 4, 5 に示す.

5. むすび

従来, 最適性の概念の取り入れられていなかったホットタンデムミルのパススケジュール計算法に, 製品品質(寸法精度)を最良にする. 最適の考えを入れてあらたな計算法を開発し, その計算例を示した.

(1969年 3月17日受理)

文 献

- 1) 鈴木弘・鎌田正誠: タンデム圧延機のパススケジュールの新しい計算法 (第 1 報) 塑性と加工 8-80 (1967) 460
- 2) 鈴木弘・鎌田正誠: 同期 (第 2 報) 塑性と加工 9-85 (1968) 86
- 3) Bellman, R. E. Dynamic Programming, Princeton, 1957

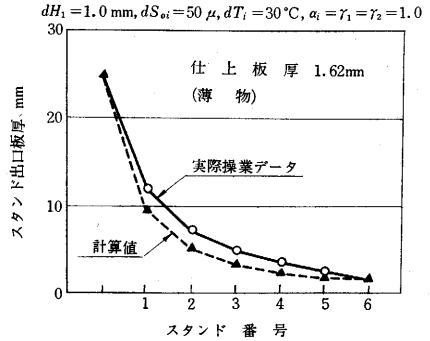


図 4

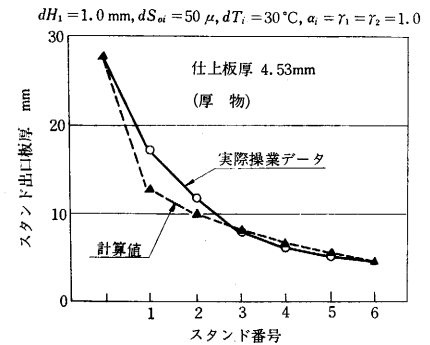


図 5

- 4) Sims, R. B., The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills, J. of Instn. Mech. Engr., 1954 (168)
- 5) Wenzel, H., Praktische Energiekunde Jg. 1965 (13)

(p. 29 よりつづく)

大変位(変位ベクトルの絶対値の最大)を図 4 に示した. なお変位の最大値は, いずれも西端ラーメンに生じている.

純ラーメン 1 方向入力の場合には 2~6cm の応答変位であるが 2 方向入力の場合 20cm 近い応答を示す例がみられ, 入力のおおきさおよび形式により応答変位が非常に異なることがわかる. 南北方向のみ壁を考慮した場合には 1 方向入力力で 4 cm 前後, 2 方向入力力で 5~9 cm となった. 東西, 南北 2 方向の壁を考慮した場合には前 2 者と比較して地震波の相異による応答最大変位の差異が少なく, 八戸地震波に対して 3 cm 前後, 八戸地震波を 1.5 倍に拡大した場合および EL CENTRO, TAFT 地震波に対して 4~7 cm の応答を示した.

4. ま と め

以上の検討の結果と被害状況から判断すると, この建物は 200~300 gal 程度の地震動により塑性範囲に入る

可能性があり, 塑性域において骨組の層間変位が降伏点変位(図 3 の Y 点の変位でこの建物の場合は約 2 cm)の数倍(弾性降伏点変位を基準とするとさらにその 2 倍)に達する振動をうけて破壊に至ったものと推定される. これらの検討は多くの仮定に基づいたものであり, なお検討の余地があるがこの種の解析法によりこの建物の地震時の挙動を一応把握することができたと考え報告する次第である.

(1969年 3月25日受理)

文 献

- 1) 田中・岡田「十勝沖地震における建築物の被害」生産研究第20巻第12号昭和43年 pp. 44/55
- 2) 日本建築学会「1968 年十勝沖地震災害調査」昭和 43 年 pp. 432/459
- 3) 武藤清「耐震設計シリーズ 4-構造物の動的解析」丸善昭和41年 pp. 67/69