

CTVビルの地震崩壊解析

Seismic Collapse Analysis of the CTV Building

井戸結加里¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Yukari Ido and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: ido.yukari.ry@alumni.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学 准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this study, we investigated the factor that caused the collapse of a reinforced concrete (RC) framed structure called the Canterbury Television (CTV) building by focusing on the actual structural design. The building totally collapsed with only the north-core wall remained standing, during the New Zealand earthquake which occurred on 22nd of February, 2011. To simulate the collapse phenomenon, a seismic collapse analysis code for RC framed structures developed using the ASI-Gauss technique is adopted. An analytical model of the CTV building is constructed based upon the structural drawing of the building. The numerical result showed a collapse behavior of a same feature with the investigation report, and it showed that the building had a problem with the structural design.

Key Words : ASI-Gauss technique, Seismic collapse analysis, CTV building, RC framed structure

1. 序論

2011年2月22日, ニュージーランドのクライストチャーチにおいてマグニチュード6.3の地震が発生した. この地震により, 図-1に示すクライストチャーチ近郊のカンタベリーテレビ(CTV)ビルが, 図-2のように北側のエレベーターシャフトのみを残して完全崩壊し, 日本人の留学生を含む115人が犠牲となった. 周囲の建物に目立った損傷は見られなかったにも関わらず, CTVビルのみが崩壊してしまった点に疑問が残る結果となった.

本件についてニュージーランドの建築住宅庁が行った調査[1]の結果, 図-3に示すような崩壊過程が予想されると報告された. まず, CTVビルが地震動を受けたとき, 建物全体が水平方向にねじれる振動が発生した. それに伴い東側中高層の柱が折れ, 建物全体が東側に傾いた. このとき折れた柱にかかっていた荷重を残りの柱が支え

きれず, 根元から折れてしまった. 最終的に全階層の梁・床は重なるように崩壊し, エレベーターシャフトのみが残されたとされている. なお, 揺れを感知してからCTVビルが完全に崩壊するまでにかかった時間は, 30秒にも満たなかったという.

以上のように, CTVビルの崩壊現象については詳細にわたる調査がなされているが, 崩壊原因については予測の域を出ていない. 崩壊に影響を及ぼした可能性のある要素として, 1つ目に強度設計の問題がある. 耐震壁が偏って配置されていることや, 柱部材の強度不足などによって, CTVビルが必要な耐震性能を保持していなかったと考えられている. 2つ目は欠陥の未修復である. CTVビルは, この約半年前にあたる2010年9月に発生した地震によって, 柱や耐震壁にひび割れが生じるなどのダメージを受けているにもかかわらず, 修復はされないままにな



図-1 カンタベリーテレビ (CTV) ビル
(出典: wikimedia)



図-2 崩壊後の CTV ビル
(出典: 東北新聞)

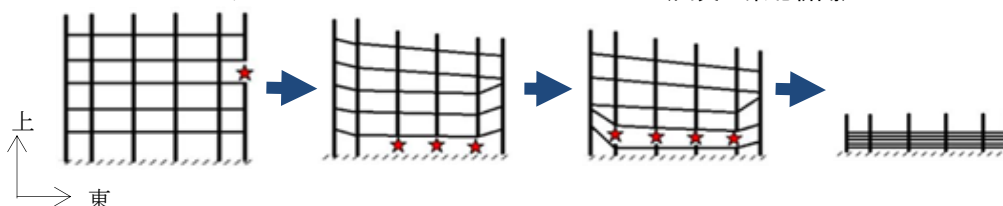


図-3 崩壊過程 (南側正面より見た図)

っていた。本研究では、CTVビルの構造設計に焦点を当て、崩壊原因を特定することを目的とする。再現性を高めるため、まずCTVビルの構造図面[1]を参考に解析モデルを作成した。解析にはASI-Gauss法[2]にRC構成則を導入した地震崩壊解析コードを用いて崩壊現象を再現した。さらに、得られた解析結果と実際の崩壊形態を比較することで、崩壊要因について検討した。

2. 解析手法

(1) RC構成則

RC構造物の解析にASI-Gauss法を適用させるため、RCの断面力・ひずみ関係として一般的によく使用される粘性減衰効果を考慮したDegrading tri-linearモデル[3][4]を採用した。また、曲げ変形およびせん断変形は独立に生じるものと仮定した。構成則として使用した諸式を以下に示し、使用した部材パラメータを表1にまとめた。

●曲げ降伏強度 M_y

・柱

$$N_{min} = -a_g s\sigma_y \quad (1a)$$

$$N_{max} = bDF_c + a_g s\sigma_y \quad (1b)$$

$$N_b = 0.22(1 + g_1)bDF_c \quad (1c)$$

として、

$N_{min} \leq N < 0$ のとき、

$$M_y = 0.5(a_g s\sigma_y + N)g_1D \quad (2a)$$

$0 \leq N \leq N_b$ のとき、

$$M_y = 0.5D\{a_g s\sigma_y g_1 + N(1 - N/bDF_c)\} \quad (2b)$$

$N_b \leq N < N_{max}$ のとき、

$$M_y = \frac{D(N_{max} - N)}{(N_{max} - N_b)} \{0.5a_g s\sigma_y g_1 + 0.24(1 + g_1)(3.6 - g_1)bDF_c\} \quad (2c)$$

・はり

$$M_y = 0.9a_t s\sigma_y d \quad (3)$$

●曲げひび割れ強度 M_c

$$M_c = \frac{1}{3}M_y \quad (4)$$

●せん断終局強度 Q_y

$$Q_y = \left\{ \frac{0.115k_w k_p (180 + F_c)}{M/Qd + 0.115} + 2.7 \sqrt{p_w s \sigma_{wy} + 0.1 \frac{N}{bD}} \right\} bj \quad (5)$$

●せん断ひび割れ強度 Q_c

$$Q_c = \frac{1}{3}Q_y \quad (6)$$

●降伏時の剛性低下率 α_y

$$\alpha_y = \left(0.043 + 1.65np_t + 0.043 \frac{M}{Qd} + 0.33\eta_0 \right) \left(\frac{b}{D} \right)^2 \quad (7)$$

表 1 : RC 構成則で使用する部材パラメータ

b	柱幅
D	柱せい
h_0	柱の内法長さ
d	有効せい
g_1	主筋重心間距離
F_c	コンクリートの圧縮強度
$s\sigma_y$	鉄筋の降伏強度
$s\sigma_{wy}$	せん断補強筋の引張降伏応力度
n	コンクリートと鉄筋のヤング率比
p_w	せん断補強筋比 = a_w/bx
p_t	引張鉄筋比 = a_t/bD
N	軸方向力
M/Qd	せん断スパン比
η_0	軸力比 = N/bDF_c
j	応力中心間距離 = $7d/8$
k_u	部材寸法の係数 = 0.7
k_p	引張鉄筋比の補正係数 = $0.82p_t^{0.25}$
a_t	引張鉄筋断面積
a_g	全主筋断面積
a_w	せん断補強筋 1 組の断面積
x	せん断補強筋の間隔

(2) 部材耐力の消失判定

部材耐力の消失判定は、要素の断面力が曲げ降伏強度もしくはせん断終局強度に達した要素に対して、曲率、せん断ひずみ、引張軸ひずみを評価することで行われる。以下に示す条件式を満たした場合、その要素は耐力を失ったとみなされる。

$$\left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}} \right| \geq 1, \text{ or } \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}} \right| \geq 1,$$

$$\text{or } \left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}} \right| \geq 1, \text{ or } \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yz0}} \right| \geq 1, \text{ or } \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z0}} \geq 1 \quad (8)$$

κ_x , κ_y , γ_{xz} , γ_{yz} , ε_z はそれぞれ要素における x , y 軸回りの曲率, x , y 軸方向のせん断ひずみ, 引張軸ひずみであり、添字0は部材耐力の消失臨界値を示す。

3. 解析モデル

CTVビルは6層のRC造建築物であり、北側に耐震壁で構成されたエレベーターシャフトがある。南北方向の梁は外壁を除いて1本も存在せず、床として鋼材とコンクリートで構成された剛性の高いデッキスラブが使用されている。モデルの俯瞰図を図-4に示す。柱・梁の断面と配筋は、CTVビルの構造図面[1]を参考にモデル化した。なお、本解析では、円断面を部材の断面積と主筋の断面積がともに等しくなる正方形の等価断面に置換して使用している[5]。このとき、要素における x , y 軸方向のせん断終局強度、曲げ降伏強度は置換前後で等しい値をとる。また、解析を安定化させるため、1階柱部材の拘束点に接続している要素は塑性化しないこととした。北側エレベーターシャフトや南側の耐震壁は、仮定の柱・梁部材と、軸剛

性を高めたブレースで構成することで再現した。ブレースは解析上で耐力消失を起こさない剛体とみなしており、トラス構造とした。床も同様に断面剛を仮定したトラス構造のブレースを用い、平面形状を保つことで各階層における柱間隔を維持させることとした。解析を進める過程において、床ブレースとエレベーターシャフトが同一の節点を共有している場合、剛体のブレースがエレベーターシャフトを引き倒してしまい、解析上で実際の崩壊形態を再現できないことが確認された。そこで、エレベーターシャフトと建物の間に1部材2要素で構成された接合要素を設けた。部材断面を表-2に示す。使用されているコンクリートの圧縮強度を表-3に、鉄筋の降伏強度を表-4に示す。2(2)節で述べた部材耐力の消失臨界値は、全ての部材で共通の値を使用しており、 x 軸回りの曲率 κ_{x0} 、 y 軸回りの曲率 κ_{y0} を0.3333、 x 軸方向のせん断ひずみ γ_{xz0} 、 y 軸方向のせん断ひずみ γ_{yz0} を0.20、引張軸ひずみ ε_{z0} を0.17とした。

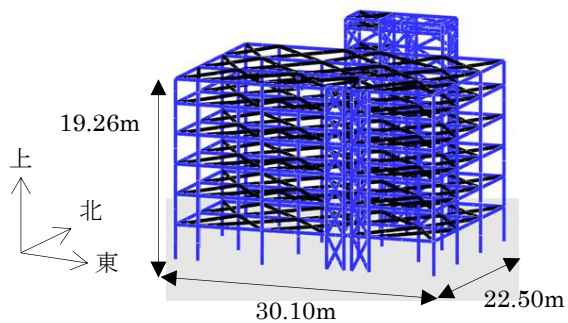


図-4 解析モデルの俯瞰図

表-2 接合要素の部材断面

階	断面寸法[mm]	配筋
2-6	400×550	8-H24 R12@200

表-3 コンクリートの圧縮強度

	柱			※その他
	1階	2階	3階以上	
圧縮強度[MPa]	35	30	25	25

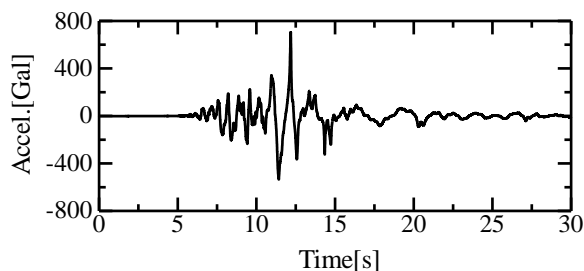
※梁、床、壁など、柱以外の部材

表-4 鉄筋の降伏強度

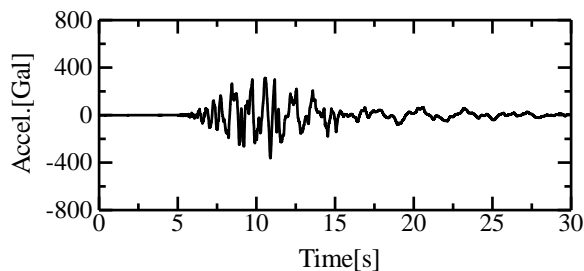
用途	主筋	せん断補強筋
降伏強度[MPa]	380	275

4. 入力地震波

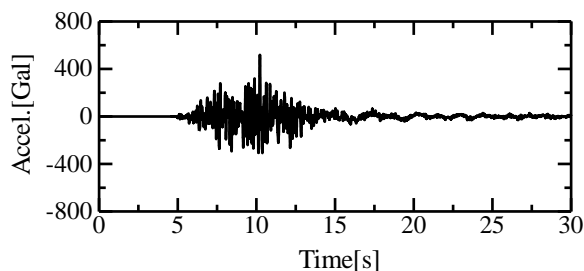
入力地震波として、CTVビルから北におよそ1.3km離れた地点で観測されたREHS波を使用した。東西、南北、上下方向すべて、10~13秒の間に加速度のピークを迎える地震波である。この地震波を30秒間入力し解析を行う。REHS波の加速度波形を図-5に示し、それぞれの方向における加速度のピーク値と、その値をとるときの時間を表-5にまとめる。



(a) 東西方向



(b) 南北方向



(c) 上下方向

図-5 入力地震波 (REHS 波)

表-5 加速度のピーク値と時間

	東西方向	南北方向	上下方向
時間[s]	12.18	10.88	10.22
加速度[Gal]	704.8	-361.9	517.5

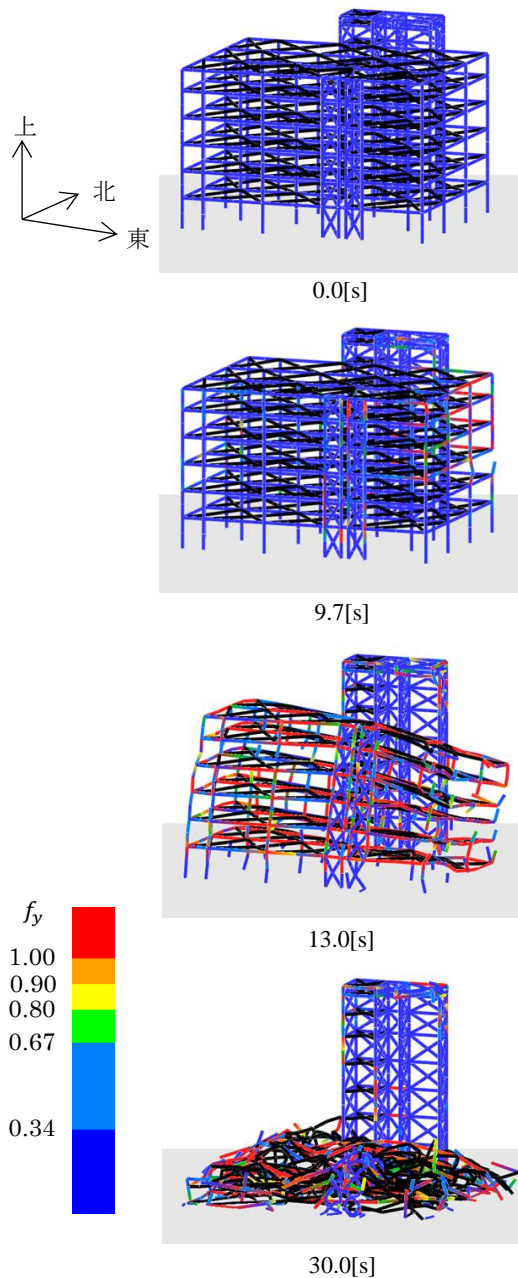


図-6 解析モデルの崩壊挙動

5. 解析結果

解析内での時間増分は1[ms]、解析ステップ数は30000[step]とした。図-6に解析モデルの崩壊挙動を示す。要素の色は次式に示す関数 f_y によって変化し、赤色に近づくほど降伏が進んでいることを表している。

$$f_y = \left(\frac{M_x}{M_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 + \left(\frac{V_x}{V_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{V_y}{V_{y0}}\right)^2 \quad (9)$$

ここで、 M_x 、 M_y は要素における $x \cdot y$ 軸回りのモーメント、 N は軸力、 V_x 、 V_y は $x \cdot y$ 軸方向のせん断力である。

また、 M_{x0} 、 M_{y0} は x 、 y 軸方向の曲げ降伏強度、 N_0 は主筋の引張降伏軸力、 V_{x0} 、 V_{y0} は x 、 y 軸方向のせん断終局強度を意味する。また、耐力消失した要素はグラフィック表示をしていない。

0.0[s]は自重のみが作用する初期状態である。解析開始から9.7[s]において、東側3階の柱が破断したことを契機として建物全体が東側に傾いた。続いて地震波の加速度がピークを迎えると、接合要素が破断しはじめ、13.0[s]には、ほぼ全ての柱が耐力を失った。30.0[s]の解析終了時点において、エレベーターシャフトには永久変形が生じているものの、倒壊には至っていなかった。

報告書[1]に記載されている崩壊過程と解析結果を比較すると、東側中高層の柱が破断し、建物全体が東側に傾く挙動が共通していた。また、支持能力を失った梁と床ブレースが折り重なるように崩壊する様子や、最終的にエレベーターシャフトのみが残ること、30秒間で完全に崩壊してしまうことといった、報告書の調査結果や目撃証言と類似する点を多く観察することができた。また本解析結果において、全ての柱部材はせん断ひずみによって耐力消失が判定されており、柱部材の脆弱性を明らかにすることができた。CTVビルがわずかな時間で崩壊してしまった要因は、この点にあると考えられる。

6. 結論

本研究では、公表された構造図面をもとにCTVビルの解析モデルを作成した。続いて、CTVビル近傍で観測された地震波を入力し、解析結果と報告書の崩壊形態を比較した。解析結果では、東側中高層の柱が破断し、建物全体が東側に傾く様子、ねじれるような崩壊挙動、エレベーターシャフトのみを残す崩壊など、数々の類似点を観察することができた。今後は、床のモデル化精度を向上させ、さらに現実の建物に近いモデルで解析を行う。また、ねじり振動の発生要因の検証や、2010年9月に同じくニュージーランドで発生した地震がCTVビルに与えた影響についても調査していく予定である。

参考文献

- [1] C. Hyland, A. Smith : CTV Building Collapse Investigation, Department of Building and Housing, New Zealand, 2012.
- [2] 磯部大吾郎, チョウミョウリン : 飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集第579号, pp. 39-46, 2004.
- [3] 河村壮一 : 耐震設計の基礎, オーム社, 1984.
- [4] 梅村魁 : 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法: 中層編, 技報堂出版, 1982.
- [5] 国土交通省住宅局建築指導課 : 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説, 財団法人日本建築防災協会, 2001.