

フロリダマンション崩落事故の再現解析

Numerical Investigation on the Collapse of the Champlain Towers South in Florida

○学 朱 峻楠^{*1}, 正 磯部 大吾郎^{*2}

Junnan ZHU^{*1}, Daigoro ISOBE^{*2},

^{*1} 筑波大学大学院 Graduate school, University of Tsukuba

^{*2} 筑波大学 University of Tsukuba

In this study, the building collapse of the Champlain Towers South in Florida allegedly caused by deck collapse was examined through the finite element analysis based on the existing hypotheses and investigation. For the numerical analysis, the Adaptively Shifted Integration (ASI) – Gauss code was applied. In addition, the member strength failure algorithm of RC components was modified and the flat-plate structure was introduced into the numerical model of the building. According to the numerical results, the building did not collapse when the external deck of the building connecting the columns, so called as key elements, were removed by the collapse of the external deck.

Key Words : FEM, ASI-Gauss technique, Collapse analysis, Flat-plate structure, RC building

1. 結 言

1・1 研究背景

近年、構造部材の劣化による建物の進行性崩壊が多発しており、社会的財産や人命にとって大きな脅威となっている。部材が劣化した建物の倒壊メカニズムを解明することにより、建物の補強を効果的に行うことができ、予期せぬ崩壊の防止に繋がることが予想できる。そこで本研究では、フロリダマンション崩落事故の調査資料に基づいて、その事故の再現解析を試みた。

アメリカ合衆国フロリダ州において、現地時間 2021 年 6 月 24 日の午前 1 時 25 分頃に、13 階建てのビーチフロントコンドミニアムである Champlain Towers South が部分的に崩落した。監視ビデオから、崩壊は 12 秒間に渡り続いていることが確認されており、崩壊は最初に Fig. 1 中の中央部分（箇所 1）が崩れ落ち、続いて残された東側（箇所 2 から 3 まで）が 9 秒後に崩落した。建物内の 136 ユニットのうち少なくとも半分以上が崩壊しており、いずれの箇所も崩れ始めてから一気に全体が崩壊しているのが特徴である⁽¹⁾。米国国立標準技術研究所（NIST）は、翌 6 月 25 日にこの崩落事故の調査を行っており、2021 年 7 月 22 日の時点で合計 98 人の死亡が確認されている⁽²⁾。

1・2 崩壊要因に関する調査

現在のところ、崩壊の主な要因は、水の浸透と鉄筋の腐食による住宅ユニット下にある駐車場の鉄筋コンクリートの劣化であると考えられている。フロリダ州はハリケーンの常襲地帯であり、建物が海水をかぶれば、劣化も進行しやすくなる⁽¹⁾。2018 年 10 月、Morabito ら⁽³⁾は、水の浸透によって腐食が発生したプールデッキ、隣接する車道、プランターに「重大な構造的損傷」が見つかったと住民に報告した。報告書では、地下駐車場の柱や



Fig. 1 Plane aerial view of Champlain Towers South ⁽²⁾



Fig. 2 Typical cracking and spalling at the parking garage columns ⁽³⁾

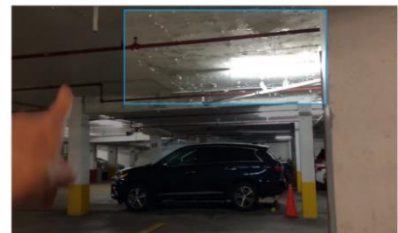


Fig. 3 Water penetration into the ceiling of the parking lot ⁽⁴⁾

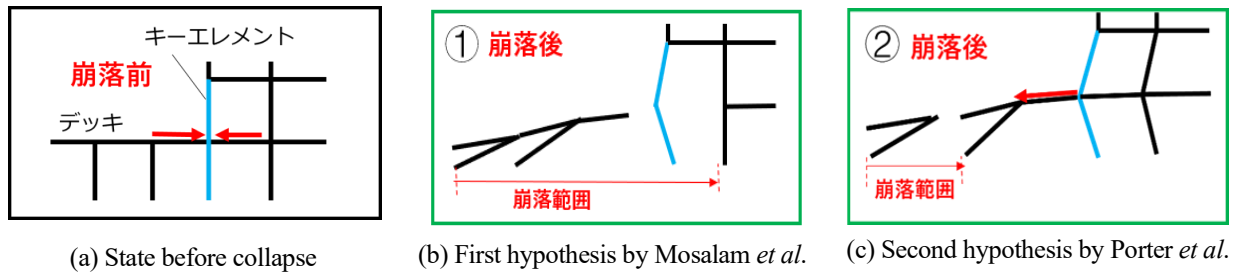


Fig. 4 Hypotheses of the building collapse

梁、壁、入り口のデッキにも様々なひび割れやコンクリートの剥離が見つかったと指摘している。劣化が一番激しいのは地下駐車場と地面のデッキであった。駐車場の柱には Fig. 2 に示すようなひび割れとコンクリートの剥離が確認され⁽³⁾、2020 年夏には、駐車場において植木鉢周辺のコンクリートに Fig. 3 に示すような腐食が確認された⁽⁴⁾。さらに Washington Post⁽⁴⁾では、プールデッキが地下駐車場に崩落したことでキーエレメントが弱体化し、より広範囲に崩壊を引き起こした可能性が示唆されており、デッキの崩落過程に関連した仮説として以下の2つが挙げられている。

1・3 崩壊要因に関する仮説

Fig. 4(a)に示す水色の部材はキーエレメント（建物を支える上で重要な柱。仮説では、建物内で最初に破壊した柱をキーエレメントとしている）であり、赤い矢印は水平方向の支持力である。キーエレメントの左側は建物に結合されたデッキを示し、右側は1階の室内を示している。

Mosalam *et al.*⁽⁴⁾による一つ目の仮説の説明図を Fig. 4(b)に示す。最初のデッキの崩壊がキーエレメントを超えて広がったためデッキ側の水平支持力が無くなり、柱に過負荷が掛かり屈曲してしまったとする説である。これを仮説(1)とする。

Porter *et al.*⁽⁴⁾による二つ目の仮説の説明図を Fig. 4(c)に示す。デッキの崩落はそれほど広範囲ではなかったが、その際にキーエレメントが周囲のデッキの梁に引っ張られることで、キーエレメントがデッキの梁と一緒に倒れたとする説である。これを仮説(2)とする。

2. 解析手法

2・1 ASI-Gauss 法

解析手法には、骨組構造の崩壊解析に有効な ASI-Gauss 法⁽⁵⁾を用いた。ASI-Gauss 法は、線形 Timoshenko はり要素を用いた FEM に基づく骨組構造解析手法で、数値積分点をシフトすることにより、はり要素内の任意の位置で塑性ヒンジや破断面の表現が可能な手法である。すなわち、少ない要素分割数で高精度な塑性崩壊荷重解が得られるため、大規模骨組構造物の崩壊解析に適している。

2・2 RC 構成則

一般に、RC 部材の力学性状に影響を与えるパラメータとして、形状、配筋、材料特性はもちろん、応力条件など様々なものがある。よって、提案式または実験値におのずと適用範囲などの制限を受けるが、本解析ではこれ

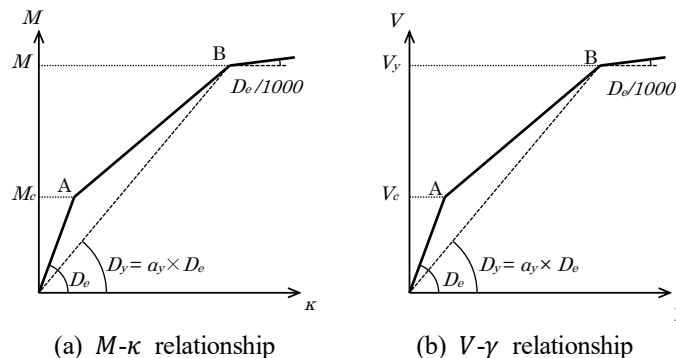


Fig.5 Tri-linear model representing properties of reinforced concrete

らの制限事項を一部除外し，さらに部材が曲げモーメントおよびせん断力別々に独立して受けるという仮定に基づき理想化し，スケルトンカーブには Fig.5 (a), (b)に示すような Tri-linear モデルを用いることとした．なお，RC 部材における曲げモーメント M と曲率 κ の相関，およびせん断力 V とせん断ひずみ γ の相関は，それぞれひび割れ点 A，降伏点 B をもつ．各ひび割れおよび降伏強度には，諸式⁶⁾を用いた．自重解析時の軸力を常に固定値として各強度を計算し，ひび割れおよび降伏を判定する．なお，RC 部材のひび割れ強度には粘性減衰効果を考慮し，降伏強度の 1/3 の値を用いた．ここでは，Fig. 5 (a), (b)に示すような Tri-linear モデルを基に部材のひび割れおよび降伏後における剛性低下の過程を表現するため，数値積分点のシフティングはひび割れ後ではなく，降伏後に行うこととした．

2・3 RC 部材の耐力消失アルゴリズム

本研究で扱う RC の部材では，せん断終局強度により部材降伏が生じたと判定された要素について，次の条件を満たした場合に耐力が消失したものと判定する．

$$\left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xzo}} \right| \geq 1 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yzo}} \right| \geq 1 \quad \text{or} \quad \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{zo}} \geq 1 \quad (1)$$

ここで， γ_{xz} は x 軸方向のせん断ひずみ， γ_{yz} は y 軸方向のせん断ひずみ， ε_z は軸ひずみである．添え字“0”が付いているものはその臨界値である．引張軸ひずみの耐力消失臨界値 ε_{zo} は，引張鉄筋 (SN490B) の物性値から $\varepsilon_{zo} = 0.17$ とした．柱と梁部材の x 軸と y 軸方向せん断ひずみの耐力消失臨界値 γ_{xzo} と γ_{yzo} は 0.20 ⁷⁾とした．床部材の x 軸と y 軸方向せん断ひずみの耐力消失臨界値 γ_{xzo} と γ_{yzo} は 0.03 ⁸⁾とした．耐力を消失した要素については，数値積分点および応力評価点を中央に配置することとした．

3. 崩壊解析

3・1 解析モデル

Champlain Towers South の建物群のうち，Fig. 1 の 1 および 2 に該当する建物は，地下 1 階，地上 13 階（地面スラブとデッキを含む）のフラットプレート構造の RC 造建物である．本研究では，1979 年の構造設計図⁹⁾に基づいて解析モデルを作成した．建物の全高は 33.778 [m]，地下 1 階の階高は 3.404 [m]，地上 1 階の階高は 4.166 [m]，2 階から 12 階までの各階高は 2.692 [m]である．11 年後に 13 階のペントハウスが増設されており，建物の高さは 38.506 [m]になった．解析モデルを Fig. 6 に示す．モデルには固定荷重と積載荷重を合わせて 672 [kgf/m²]の床荷重が作用するものとした．また，部材には米国基準のコンクリートと鉄筋を使用した．地下 1 階から 3 階までは 6,000 psi，4 階から 7 階までは 5,000 psi，8 階から 13 階までは 4,000 psi のコンクリートを使用し，鉄筋には Gr60¹⁰⁾，せん断補強筋には Gr40¹⁰⁾を使用している．梁と柱要素は弾塑性要素，床と耐震壁要素は弾性要素とした．図中では，梁と柱部材を青色，床と耐震壁部材を灰色で表している．

3・2 仮説(1)に基づく解析結果

キーエレメントを超えてデッキの崩落範囲が広がったとする仮説(1)に基づき，Fig. 7 に示すように，東，西，および北側に接続している部材，キーエレメントの間の部材，デッキの柱および建物内の床部材を強制破断することによりデッキの崩落を再現した．解析開始から 0.05 [s]後にデッキに接続している部材を強制破断させ，デッキを落下させた．キーエレメントの支持力が無くなったため座屈長さは長くなったが，Fig. 9 に示すように，キーエレメントの塑性化および座屈は確認されなかった．

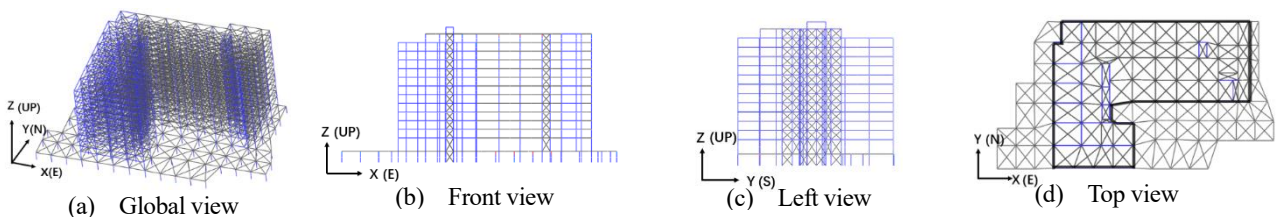


Fig. 6 Champlain Towers South model with external deck

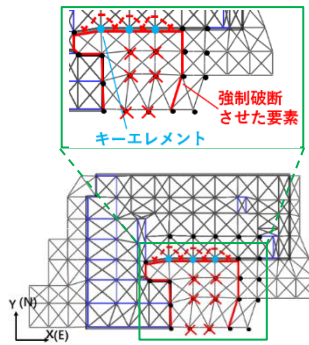


Fig. 7 Top view of fractured part based on first hypothesis

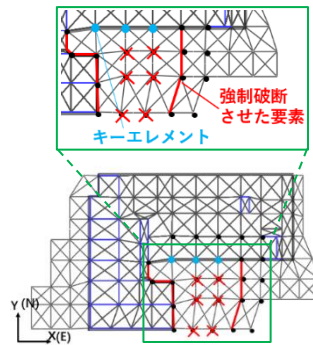


Fig. 8 Top view of fractured part based on second hypothesis

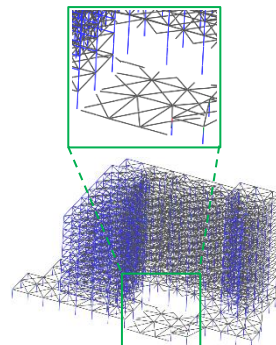


Fig. 9 Numerical result based on first hypothesis

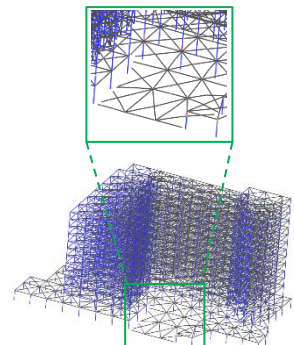


Fig. 10 Numerical result based on second hypothesis

3・3 仮説(2)に基づく解析結果

デッキの崩落がそれほど広範囲ではなかったとする仮説(2)に基づき、Fig. 8 に示すように、東西側に接続している部材とデッキの柱を強制破断することによりデッキの崩落を再現した。解析開始から 0.05 [s] 後にデッキに接続している部材を強制破断させ、デッキを落下させた。地下 1 階と地上 1 階のキーエレメントが崩落したデッキに引っ張られることにより、次第に塑性化が起こる様子が確認された。そして Fig.10 に示すように、解析開始から 0.7 [s]後、デッキが接地した瞬間にキーエレメントの降伏関数が最大となったが、建物全体が崩落することは無かった。

4. 結言

本研究では、デッキの崩壊に起因して建物が崩落したという仮説に基づき、2021 年 6 月に起きたフロリダマンションの再現解析を試みた。キーエレメントを超えてデッキの崩落範囲が広がったとする仮説、およびデッキの崩落がそれほど広範囲ではなかったとする仮説の両方で解析を実施したが、いずれの場合でも建物が崩落することは無かった。デッキの崩落に加え、他の要因が引き金となって建物の崩落を引き起こした可能性が考えられる。今後は、RC 柱の劣化と耐震壁-フラットプレート床間の接合部の弱体化を考慮に入れ、検証を進める予定である。

参 考 文 献

- (1) 日経：米集合住宅崩落「下部が起点の進行性崩壊か」、防水の欠陥でコンクリート劣化。
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00154/01257/>.
- (2) Wikipedia Surfside condominium collapse, https://en.wikipedia.org/wiki/Surfside_condominium_collapse.
- (3) Morabito Consultants, Champlain Towers South Condominium Structural Field Survey Report. October 8, 2018.
- (4) The Washington Post, How a collapsed pool deck could have caused a Florida condo building to fall.
<https://www.washingtonpost.com/investigations/interactive/2021/pool-deck-condo-collapse/>.
- (5) 磯部大吾郎, はり要素で解く構造動力学：建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで Fortran90・C++ソースコード付, 丸善出版, ISBN:978-4-621-30544-7, 2020.
- (6) 日本建築防災協会, 構造設計・部材断面事例集, 2007.
- (7) 北村岳伸, 吉川 卓, 玉越隆史, 高強度鉄筋を用いた道路橋橋脚の耐震性能評価に関する研究. 国土交通省 国土技術研究会, 2012.
- (8) 日本建築学会. (1997). 鉄筋コンクリート造物の靱性保証型耐震設計指針 (案) 同解説. 日本建築学会.
- (9) CHAMPLAIN TOWERS SOUTH'S STRUCTURAL PLAN, A Development of Toronto Enterprises, 1979.
<https://townofsurfsidefl.gov/departments-services/town-clerk/champlain-towers-public-records-documents>.
- (10) ASTM, Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement : A615/ A615M-15[S], 2015.