

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	既存不適格建築物のデジタルツインによる京阪神都市圏の地震レジリエンス評価
研究者名※	金子 健作
所属組織※	大阪公立大学 大学院 工学研究科都市系専攻 講師
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（ ）は、報告書提出時所属先。

大林財団 2022 年度研究助成実施報告書

所属機関名 大阪公立大学
申請者氏名 金子健作

研究課題	既存不適格建築物のデジタルツインによる京阪神都市圏の地震レジリエンス評価
(概要)	
この研究では、大地震発生時において建物倒壊による緊急輸送道路網の閉塞を防ぐため、地域特性を考慮し、沿道の既存不適格建築物の耐震改修優先度を評価する手法を提案した。この手法は、沿道の既存不適格建築物の倒壊確率を I_s 値（構造耐震指標）から評価し、それ以外の沿道建築物群の空間密度の推定値から得る倒壊確率を統合して、道路が閉塞する確率を評価する。この確率を重み値としたグラフ理論に基づくネットワークを用い、広域防災拠点および後方支援活動拠点から県外への接続道路に向かう到達可能性の最も高い経路を探索する。この到達確率の大小を道路網の機能喪失の指標とする。大阪府を対象に耐震診断結果が公表されている建物の I_s 値を整理し、いくつかの想定地震に対して緊急輸送道路網が機能喪失する確率を評価した。さらに、建物群の一部を耐震改修した場合を想定し、道路網が機能維持する確率を高めるための改修優先度を検討した。これにより、限られたコストで災害対応の質を向上させる可能性を示した。	

1. 研究の目的
都市圏において大地震が発生すると、建物倒壊による道路閉塞が生じ得る。これにより緊急車両の通行に支障が出るほか、災害直後の避難や救助活動、その後の支援物資の輸送や復興活動にも影響が及ぶ。阪神淡路大震災で被害が大きかった地域の特徴として、道路幅が狭く沿道建築物の耐震化が不十分であったことが挙げられる。したがって、緊急輸送道路をはじめとした災害時の輸送路の確保と、その道路網としての強靱性やレジリエンスを検討し改善していくことは必要不可欠である。しかしながら、その対策や改善はまだ十分でなく、その優先度を効率的に判断することが求められる。災害時における道路網の強靱性の改善を効率的に進めるためには、道路網の機能に対する沿道建築物の耐震化効果を正確に把握することが重要である。そのため、様々な災害時シナリオに応じた道路網の強靱性の評価指標を明確にし、これに対して沿道建築物の耐震改修がどのように寄与するかを定量的に求める必要がある。本研究では確率論に基づいて建物倒壊確率を用いた道路閉塞確率の厳密解を導出し、個々の建築物の立地的固有性に応じた耐震改修優先度評価を総合的に行う新しい方法を開発する。緊急輸送道路網の強靱性および耐震改修効果の評価を行い、本手法の有効性を示す。 実際の災害時における道路閉塞には、道路路面の損傷や浸水など建物倒壊以外に起因するものも考えられるが、本研究においては沿道建築物の倒壊に起因する道路閉塞のみを対象とする。また、道路が閉塞した際の経路選択において、本研究では地震時シナリオとして、各広域防災拠点

および後方支援活動拠点から大阪府域外への県外接続道路に向かういずれかの経路のうち最も閉塞確率の低い経路を選択することを想定するが、実際に応用する際は経路の距離、移動時間の影響や、他の目的地として病院施設等も必要検討事項である。さらに、耐震改修効果を検討する際にも、耐震改修によって変化する Is 値のほかに、耐震改修にかかる費用や時間も重要となる。これらのパラメータを評価に取り入れることができる、汎用性の高い評価方法を開発することを目的とする。

2. 研究の経過

沿道建築物の倒壊による道路網の強靱性および耐震改修の優先度を求める際のフローチャートを図 1 に示す。これらを検討するために前提となる解析条件について記述する。今回対象とする路線は緊急輸送道路であり、大阪府を例として示す。大阪府は広域緊急交通路と、そのうち優先して耐震化に取り組む路線として耐震診断義務付け対象路線を指定している。緊急輸送道路は国が GIS データを公開しているが、広域緊急交通路は電子データが公開されていないため、緊急輸送道路に含まれるとみなした。検討対象とする建築物は、耐震診断義務付け対象路線沿道の要安全確認計画記載建築物と、それ以外の緊急輸送道路沿道に定義した通行障害建築物の 2 種類である。前者は耐震診断結果が公表されているが、検討データとしては数が不十分であるため、このデータを用いて後者の諸量を推定することにより道路網沿道の建築物データを補完した。大阪府が指定した要安全確認計画記載建築物 243 棟について、府および所管行政庁が公表している耐震診断結果を用いた。これらの建築物は、以下の条件を満たすものと定義されている。

- 1) 耐震診断義務付け対象路線に敷地が接する
- 2) 1981 年以前に旧耐震基準による建築
- 3) 一定以上の高さ (図 2)

通行障害建築物は、このうち 2) と 3) を満たすものと定義する。想定地震動として、「内閣府 南海トラフの巨大地震モデル

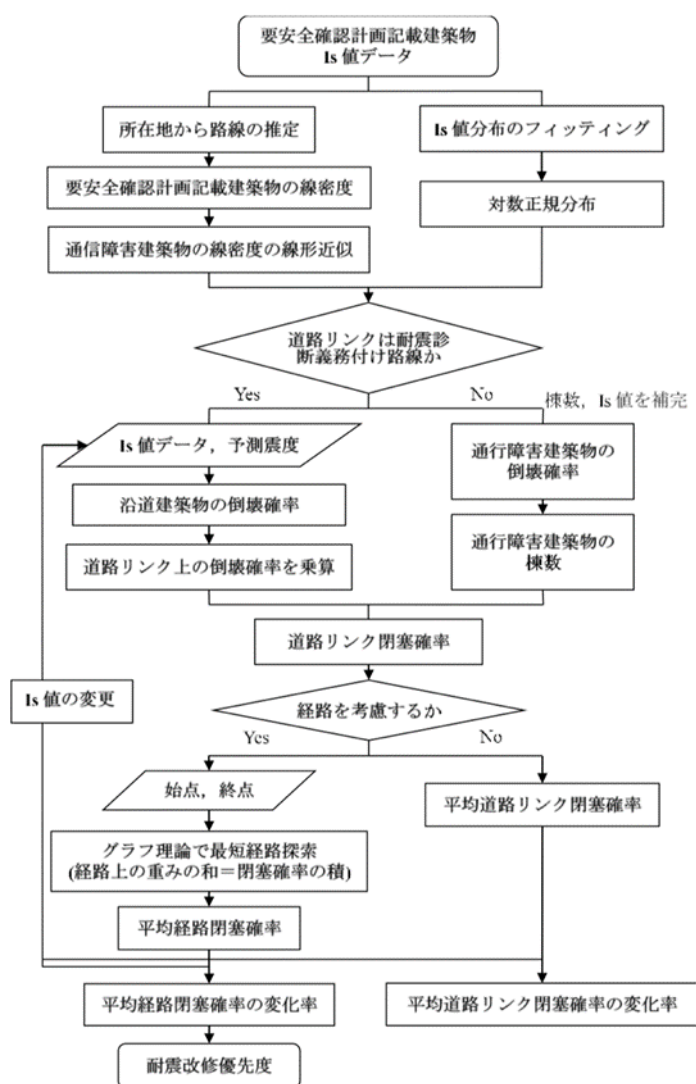


図 1 耐震改修優先度評価フローチャート

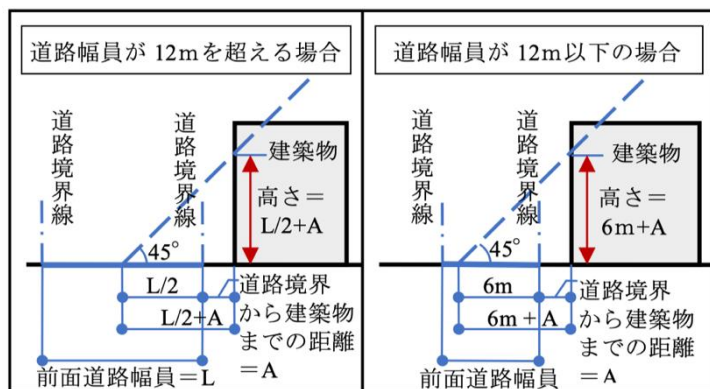


図2 耐震診断義務付け対象の建築物の高さ

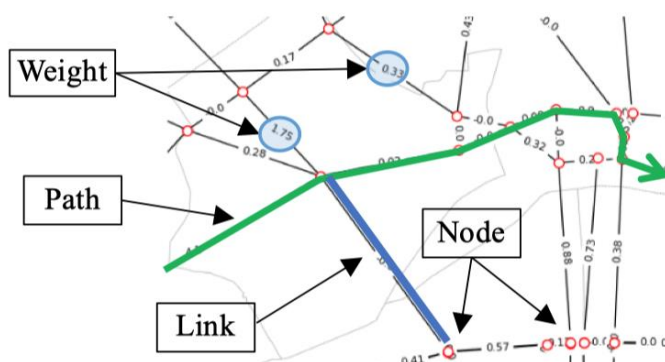


図3 グラフ理論による緊急輸送道路網のモデル化
(大阪市中之島付近)

- ・広域防災拠点（桃色）
- 1. 北部（万博公園東地区）
- 2. 中部（八尾空港隣接地）
- 3. 南部（りんくうタウン南地区）
- ・後方支援活動拠点（橙）
- 1. 万博記念公園
- 2. 服部緑地
- 3. 寝屋川公園
- 4. 久宝寺緑地
- 5. 山田池公園
- 6. 大泉緑地
- 7. 錦織公園
- 8. 蜻蛉池公園
- 9. 大阪城公園
- 10. 鶴見緑地
- 11. 長居公園
- ・要安全確認計画記載建築物（緑）

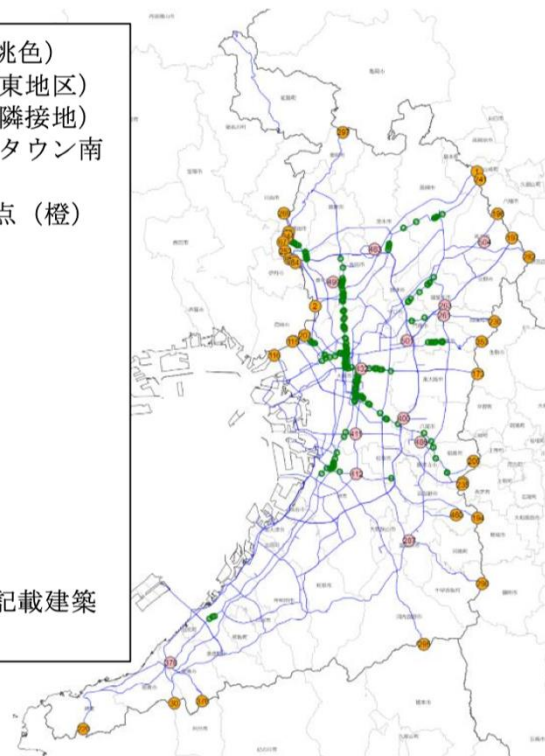


図4 緊急輸送道路網と検討点

（大阪府防災会議：大阪府地域防災計画 基本対策編，国土交通省国土数値情報ダウンロードサイト：緊急輸送道路データ，国土地理院：地理院タイル，大阪府 他：要安全確認計画記載建築物耐震診断結果，Leaflet により作成）

ル検討会」による 250m メッシュ計測震度データを用いた。倒壊確率を求める際に最大地動速度 (PGV) が必要となるため，翠川ら (1999) の式により，計測震度を PGV に変換した。

つぎに，道路の閉塞について，確率論を用いて，統計的に閉塞確率を算出した。2つの隣り合う交差点を結ぶ道路を「道路リンク」と定義する。道路リンク沿いの建築物が1つでも倒壊した場合，その道路リンクは閉塞したとみなされる。Is 値が既知である建築物の倒壊確率について，これが道路リンク上に複数存在する場合，このリンクの閉塞確率は，閉形式解で表せる。この式により，要安全確認計画記載建築の倒壊による影響を評価できる。一方，Is 値の公表されていない通行障害建築物には，いくつかの仮定を設ける。その棟数を道路上の要安全確認計画記載建築物の線密度

（道路リンク単位長さあたりの棟数）から推定すると，ある行政地域における線密度 (1/km) は，その建築物の面積密度 (1/km²) に比例する。ある経路が複数の道路リンクからなるとき，その経路の閉塞確率は，グラフ理論に基づく最短経路探索アルゴリズムから評価できる。

つぎに，道路リンクが構成する道路網について検討した。図3に示すように，緊急輸送道路の道路同士が接続する点をノードとし，これらのノードを道路リンクで結ぶ道路網のモデル化をし，始点として広域防災拠点と後方支援基地を設定した（図4）。道路網の脆弱性指標を得るために，これら支援活動拠点から県

外へ続く道路までの複数の経路それぞれについて、建物倒壊により寸断される可能性を踏まえて経路の閉塞確率を評価する。このとき、閉塞確率が最小となる経路（最良経路）を探索するためにグラフ理論の最短経路探索を用いる。最短経路探索では、複数点のノードとそれらを結ぶリンク上に重みを設定し、ある2点のノード間を結ぶ経路上の重みの和を最小化する経路を探索する。これらのアルゴリズムをプログラム言語 Python で実装した。

3. 研究の成果

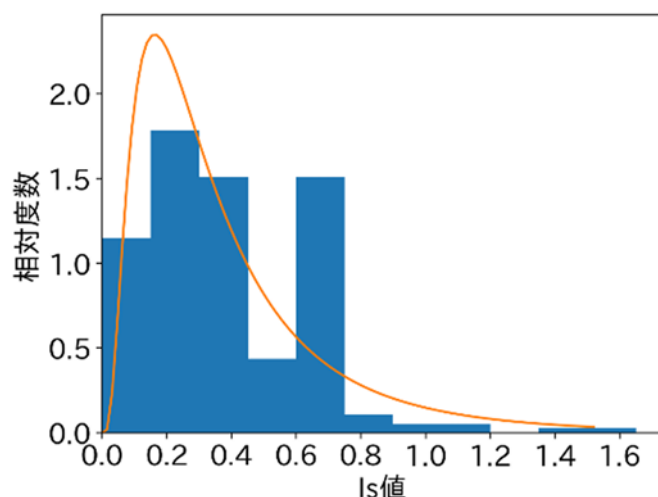


図5 要安全確認計画記載建築物の I_s 値の分布
(大阪府 他：要安全確認計画記載建築物耐震診断)

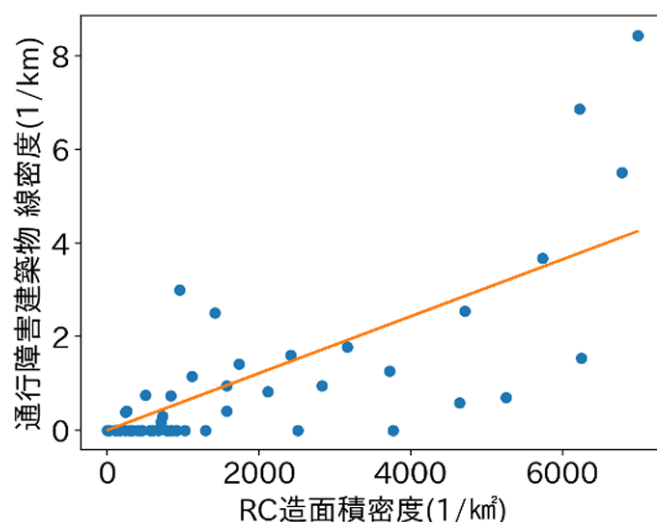


図6 RC造建物密度と対象建築物の線密度
(総務省統計局：平成30年住宅・土地統計調査の調査結果，国土地理院：全国都道府県市区町村別面積調から作成)

大阪府を対象にして、緊急輸送道路網をグラフネットワークでモデル化した（図4）。さらに図5に示すように、耐震診断結果から算出した I_s 値の分布を対数正規分布によって近似し、最尤推定法で回帰パラメータを得た。また、建物密度と要安全確認計画記載建築物の線密度の関係を近似した（図6）。これらの関係に基づき、南海トラフ地震に対して、道路リンクの閉塞確率を評価した結果を図7に示す。全体的に閉塞確率の低い道路リンクが多く、大阪市北部に閉塞確率の高い道路リンクが集中している。

つぎに、南海トラフの被害推定において、大阪府推定による道路閉塞率と本研究における平均道路リンク閉塞確率の閉塞確率を比較した。大阪府全体の道路リンク閉塞確率の平均値では、大阪府による推定は5%であるのに対し、本研究では7.5%である。本研究の方が高い値である理由の一つとして、従来の被害想定では、沿道建物の被害率を震度に応じて一律に乗じており、耐震強度のばらつきの影響が含まれていることである。

図の掲載は割愛するが、従来の被害想定に用いられている、道路網を考慮しない平均道路リンク閉塞確率変化率は、周囲の耐震化状況による影響が少ないことから耐震改修する建築物自身の I_s 値に依存し、 I_s 値の上昇とともに耐震改修効果は減少した。一方、経路を考慮した平均経路閉塞確率の



図7 大阪府の緊急輸送道路の閉塞確率（確率の対数値を正規化）

変化率は、周囲の耐震化状況の影響を受けるため、必ずしも耐震改修する建築物の I_s 値の低さと直結しているものではなく、ある経路について耐震改修効果が特に高い建築物が存在した。このことから、経路としての閉塞確率には沿道建築物の耐震強度だけでなく、道路網形状と建築物および目的地の相互関係が寄与していることが明らかになった。

道路網の強靱性に対する耐震改修優先度の算定に用いる指標は、従来の

平均道路リンク閉塞確率では不十分であり、経路を考慮した平均経路閉塞確率変化率の方が適している。また、 I_s 値の昇順に連続して建築物の I_s 値変更を行う場合、平均経路閉塞確率は階段状に減少する。これは上記の通り、道路網に与える影響が大きい建築物が存在するためであるが、一方で一建築物が道路網としての機能を低下させるというネットワークの脆弱性が露呈した結果である。

4. 今後の課題

本研究で得られた結果は、対象建物の I_s 値や道路網に関するオープンデータなど、算定評価に必要な基礎データは必ずしも十分でないため、計算結果の信頼性に対する課題は残されている。しかし、今回対象とした大阪府の緊急輸送道路の場合、道路網の機能損失に大きな影響を与えている既存不適格建築物が存在していることが明らかになったため、このような改修が与える影響度の高い建物から優先して耐震化を進めるべきである。

当初は、京阪神域内での検討を計画していたが、研究助成期間内では大阪府に限定した検討に留まった。今後は、検討対象をより広域に広げるとともに、道路網の閉塞確率などの結果を WebGIS や 3D 都市モデルを利用して 3 次元的に可視化し、民間建築物の耐震改修率を向上するための啓蒙に貢献したい。