震災時の電柱倒壊による避難経路への影響を考慮した無電柱化の効果に関する研究

橘川　颯斗[1]・小根山　裕之[2]・柳原　正美[3]

[1]非会員　東京都立大学院　都市環境科学研究科都市基盤環境学域
（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）
E-mail: kitsukawa-hayato@ed.tmu.ac.jp

[2]正会員　東京都立大学院教授　都市環境科学研究科都市基盤環境学域
（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）
E-mail: oneyama@tmu.ac.jp

[3]正会員　東京都立大学院助教授　都市環境科学研究科都市基盤環境学域
.（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）
E-mail: yanagihara@tmu.ac.jp

自然災害大国である日本では，今後も首都直下型地震など大規模地震の発生が高い確率で予測されている．過去の災害時には電柱の倒壊が道路閉塞，長期停電，避難活動への被害をもたらした．そのため，政府は無電柱化を推進している．本研究では，震災時に住民が利用する避難経路の観点から，無電柱化を行う効果の高い道路区間を抽出する指標値を提案した．ノードとリンクから構成される道路ネットワークにおいて，各リンクが無電柱化される効果を求める．指標値は無電柱化有無の状況での震災時の避難時間の差分と定義した．指標値を用いることで，無電柱化の効果をリンク毎に算出できた．

Key Words: *removal of utility poles, earthquake, evacuation, residential,*

1.　はじめに

世界有数の自然災害大国である日本では，地震，台風など甚大な被害を伴なう災害が多発している．2020 年 1 月 24 日時点で，南海トラフ地震，首都直下型地震などマグニチュード 7 程度の地震の発生確率は 70%程度と予測されており，今後も大規模地震などの大規模地震に襲われることが予測されている．また過去の災害時には電柱の倒壊に起因する道路閉塞による避難活動や復旧活動への支障，断線などによる長期停電や通信障害などの被害が生じている．1995 年に発生した阪神・淡路大震災では約 8100 本の電柱が倒壊し約 260 万戸が停電，解消には 1 週間を要した．また家田ら[1)]によると震災時の道路閉塞状況を空中写真により数値化し要因を分析した結果，ある地域では電柱の倒壊により道路網の 24%が通行の妨げになったことを明らかにしている．2016 年に発生した熊本地震においても電柱の倒壊により約 477 万戸が停電する被害となった．

そのため政府は国土強靭化対策の 1 つとして「無電柱化」に取り組んでいる．国土交通省[2)]によると阪神淡路大震災，東日本大震災時の被害状況は架空線と比較して地中線の被害割合は小さく，地震災害に対する信頼性が確認されている．国土交通省の無電柱化推進計画において，防災の観点からは緊急輸送道路や避難所へのアクセス道，避難路等災害の被害の拡大の防止を図るために必要な道路の無電柱化を推進している．緊急輸送道路とは，災害直後から避難，救助及び物資供給など応急活動の為に緊急車両の通行を確保すべき重要な路線にあたり，高速自動車国道，一般国道，またこれらを連絡する基幹的な道路のことである．緊急輸送道路における無電柱化着手率は 2019 年度末の 38%から 2025 年度末には 52%に増加し整備が進められている．一方，このような状況から，災害直後に市街地などにおいて住民が避難する際に使用する市街地などにおける地区内道路においては無電柱化が進んでいない現状がある．これらの道路の多くは市区町村が管理する市区町村道であり，東京都内の道路にお

ける市区町村道の割合は約 9 割[3]に及ぶ。国、都などと比較すると市区町村は対象道路が多い中で財源が限られており,時間的、費用的な制限から全ての道路において早急に無電柱化整備を進めることは難しい．市街地における電柱倒壊などによる避難活動や復旧活動への影響を可能な限り低減するには、その影響を適切に評価するとともに、優先順位を判断しつつ無電柱化の必要性の高い区間から重点的に整備を進めていく必要がある．

国土交通省は無電柱化推進の目的として景観・観光，安全・快適，防災の３点を掲げており，それらに関連する研究が行われている．土木工学，都市計画の分野における研究では石田ら[4]が電柱・電線が無くなることによる良好な景観形成への影響の検討，厲ら[5]が路上の電柱が歩行者の安全性への影響の検討，朴ら[6]が無電柱化整備による地価への影響の検討などが行われている，防災に関する無電柱化の研究はほとんど見られない．一方，震災発生時の被害を予測した研究は多く行われている．耐震対策を優先して整備すべき重要道路区間の検討に関する研究では日比ら[7]が斜面崩壊による道路閉塞を予測し孤立するノードの発生状況からの検討を行っている．また小川ら[8]は文化遺産の防災に着目し文化遺産へのアクセス性の観点から検討を行っている．このように独自の指標を用いた耐震対策整備区間の検討が行われているが，電柱の倒壊に起因する被害の指標を用いた検討は行われていない．防災対策に関する研究では長谷川ら[9]が救援物資輸送の視点から，建物崩壊，電柱倒壊，液状化による道路閉塞状況を予測し，整備に掛かる費用面での制約の中で建築物の耐震化，無電柱化，液状化対策による最適な道路閉塞対策を検討している．しかし無電柱化に関しては発災直後の住民の避難行動，無電柱化は点ではなく道路リンクごとに行われる整備事業であることを考慮しなければならない．

本研究では，市街地における地区内道路ネットワークを対象として，住民が大規模地震発生時に使用する避難経路の確保の観点から電柱倒壊の影響を評価できる指標を提案するとともに，実際の東京都内の市街地を模した道路ネットワークを対象とした仮想条件を対象として指標を適用し，無電柱化することによって得られる効果評価や優先順位判断への適応可能性について検討することを目的とする．

2. 評価手法

(1) 無電柱化整備効果評価指標

本研究では，無電柱化の有無の状況での避難時間の差分を評価指標として用いる．具体的には大澤ら[10]が提案した各道路区間が迂回へ与える影響の度合いを現した迂回影響量DIQを援用して無電柱化の評価に適用したものである．道路リンクdのPIQ_d(Pole Infuluence Quantity)は式(1)のように定義される．

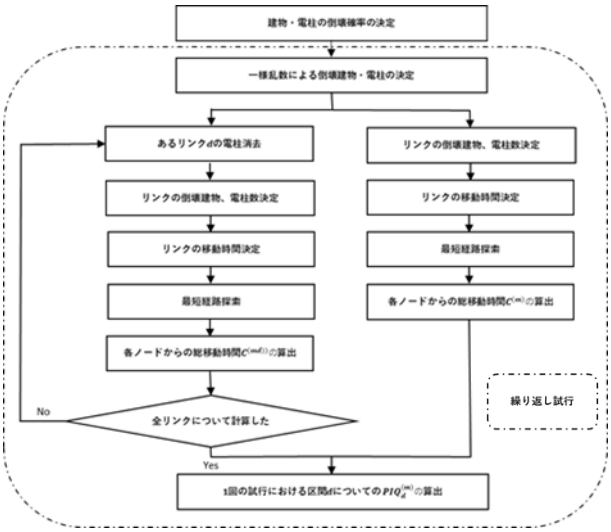


図 2.1　指標値PIQ_d算出手順フローチャート

$$PIQ_d = \sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{I}\left(C_i^{(m)} - C_i^{(md)}\right) * P_i / M \cdots\cdots (1)$$

$C_i^{(m)}$：m回目の試行における各出発点ノードiから避難所までの移動時間

$C_i^{(md)}$：m回目の試行における道路リンクdが無電柱化されていた場合の各出発点ノードiから避難所までの移動時間

P_i：各出発点ノードiからの避難人数

M：繰り返し試行回数，I：道路ノード数

図 2.1 に無電柱化整備効果評価指標PIQ_dを求めるフローチャートを示す．道路リンクd毎に電柱の倒壊確率，建物の倒壊確率が設定されており，試行ごとに乱数を発生させることにより，各リンクに含まれる電柱及び建物の倒壊が決定される．なお無電柱化とは道路リンクdに面する電柱の倒壊確率を０とすることに相当する．この状況下において震災時の各出発点ノードから目的地までの移動時間と，震災時に道路リンクdが無電柱化されていた際の各出発点ノードから目的地までの移動時間の差分に各出発点ノードからの避難人数を掛けることで，その道路リンクdが無電柱化されたことで短縮される 移動時間の総和を求める．これらの試行を繰り返し行い，式(1)に示すように試行回数で除すことで基準化したものがPIQ_dとなる．電柱が倒壊する確率以外の要素は変更せずに移動時間を比較することで無電柱化整備の効果を算出する．この指標値は，ある道路リンクdを無電柱化すると震災時の避難に関して対象地域全体でPIQ_d［人・時間］の移動時間削減効果が発生することを表す．

(2) 避難経路の算出方法

表 2.1　道路幅員,倒壊構造物別通行増加時間

	幅員5m以上	幅員5m未満
建物倒壊	+60s	+600s
電柱倒壊	+30s	+600s

避難経路の算出は最短経路探索により行う．避難所を目的地ノードとし，他全てのノードを出発点ノードとする．震災時の避難経路を探索する各道路リンクのコストは移動時間を用いる．震災時の移動を考慮した既往研究の多くは道路の閉塞により目的地に到達できるケースと迂回が必要になるケースに分けて評価を行っている．本研究は住民の避難を対象としており，多くの住民は歩行により避難することを想定しているため，現実では瓦礫の乗り越えや瓦礫によって狭くなった空間でさえ時間を掛けて通行することが考えられる．本研究では道路リンクの完全な閉塞は発生せず，被害状況に応じて平常時より通行に要する時間が増加すると仮定する．このように設定することにより,閉塞するケースを分ける必要がなく,ハンドリングしやすい指標となる．

なお，次章の適用計算例においては，通行増加時間は表 2-1 のように設定した．その設定の根拠は以下のとおりである．

a)幅員 5m 以上の道路リンク

建物，電柱の倒壊により道路リンクが完全に閉塞されることは無く，瓦礫の乗り越え，通り抜けにより通行できることを想定する．小沼ら [11]の障害物回避における歩行速度の変化に関する研究において，障害物の手前から歩行速度が低下することが示されている．また別の避難速計測実験結果 [12]によると，建物倒壊時の通行可能な道路における避難速度の低減率が 0.5 であった．これらを考慮した上で道路リンクの通行増加時間を設定した．

b)幅員 5m 未満の道路リンク

建物，電柱の倒壊が発生すると通行することが難しく，代替経路が存在する場合には通行せず経路を変更し避難することを想定する．通行増加時間を設定するにあたり，分析対象とする道路ネットワークにおいて，建物，電柱の倒壊が発生した道路リンクは通行不可となる条件で目的地を避難所とする最短経路探索を行った．その結果，最大 10 分平常時より避難所に到達するのに時間を必要とする出発点ノードが発生した．この結果より代替経路を利用することで移動時間が 10 分以上増加する場合，建物，電柱の倒壊が発生した道路リンクを通行するが，最短経路として迂回を選択するように通行増加時間を設定した．

また,平常時の通行に要する時間は，歩行者の移動速度を 1m/s として算出した．これは，歩行者の交差点横断時間の算出に標準的に用いられている歩行速度 1m/s[13]を適用したものである.

(3)道路リンクの被害想定方法

本研究では建物，電柱の倒壊を確率的事象と捉え乱数を用いたシミュレーションにより各道路リンクの被害状況を想定する．次章の適用計算例においては，過去の震災時の被害状況のデータを基に作成された既往研究のモデルを用いて，建物，電柱の倒壊確率を以下の通りに設定した.

a)建物倒壊

建物倒壊により道路リンクに被害をもたらす確率は「建物の層破壊率」と「倒壊建物のうち道路内に倒壊する建物の割合」を乗じたものとする．「建物の層破壊率」は堀江らにより構築された方法を用いて東京消防庁が「第 21 期火災予防審議会地震対策部会答申書　地震火災による人的被害の軽減方策」[14]で算出した震度 6 強における木造建物の層破壊率にあたる 12.5%を用いた．「倒壊建物のうち道路内に倒壊する建物の割合」は土木学会による阪神・淡路大震災調査報告 [15] による木造建物の倒壊に占める道路倒壊内の割合にあたる 0.482 を用いた.

b)電柱倒壊

本研究では揺れによるもの，建物倒壊による電柱倒壊を想定対象とする．電柱が倒壊する確率は東京都による地震被害想定 [16]において使用されている，阪神・淡路大震災の被災実態に基づいて設定された震度 6 以上の揺れによる停電につながる電柱折損率 0.056%，建物全壊による停電につながる電柱折損率を使用する．建物全壊を建物の層破壊と同じという仮定の下，電柱の倒壊確率を以下のように算出し設定した.

「建物全壊による停電に繋がる電柱折損率」＝0.17155×「建物全壊率」

「電柱の倒壊確率」＝「建物の層破壊率」×0.17155＋0.056(%)

なお本研究においては，建物の倒壊と電柱の倒壊は独立して起きるものとし，道路リンク内の詳細な建物位置，電柱位置 は考慮していない.

３．適用計算例

本研究で提案した無電柱化の評価指標の適用可能性を検証するため，実際の市街地を模した道路ネットワークを対象とした仮想条件による適用計算を行う．具体的な条件は以下のとおりである.

(1)分析対象ネットワーク

本研究では，東京都世田谷区若林 1,2 丁目，太子堂 4,5 丁目をケーススタディ地域とする．図 3.1 に道路ネ

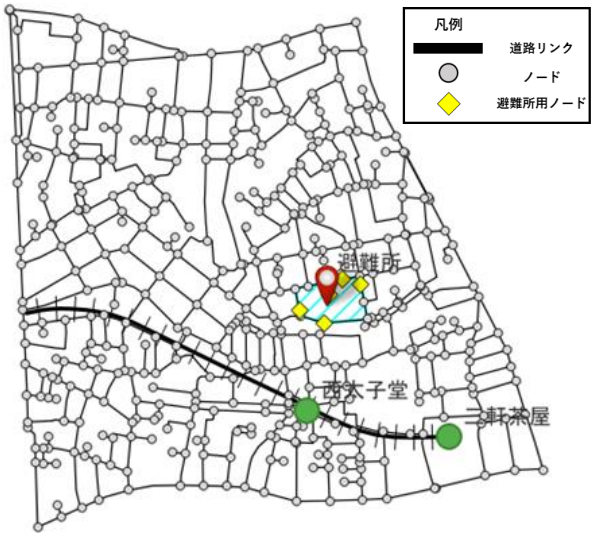


図 3.1　ケーススタディ地域

ットワークを示す．道路ネットワークは株式会社昭文社が提供している MAPPLE デジタル地図データより対象地域の道路中心線のデータを用いて作成し，ノード数 440 個，道路リンク数 614 本で構成されている．対象地域の避難所である太子堂小学校には入口が 4 カ所設置されていることから，避難所入口用ノードを 4 カ所，入口用ノードと目的地ノードを結ぶリンクを 4 本作成した上で分析を行った．

(2) 各出発点ノードからの避難人数

「令和 2 年国勢調査―世界測地系(250m メッシュ)人口及び世帯」[17]のデータに基づき設定した．各メッシュの人口を，メッシュ内に存在する道路ノード数に均等配分し，各ノードからの避難人数とした．

(3) 沿道条件

沿道の建物に関する情報は基盤地図情報の建築物の外周線のデータを使用し，各建物がどの道路リンクに面しているかの情報を与えた．沿道の電柱に関する情報については道路幅員別に一定間隔で電柱が設置されていると仮定し，各道路リンクに何本の電柱が面しているかの情報を与えた．分析対象地域において電柱の位置を実測した結果から 2 車線道路においては両側に 25m 毎，1 車線道路においては 20m 毎に設置されていると設定した．

(4) 分析条件

本研究を進めていくにあたって以下の条件を設定した．

- 道路ネットワークの中で無電柱化の効果の高い区間を相対的に評価を行うために特定の地震は想定しない．地震の強さとしては阪神・淡路大震災クラスの地震が起きたことを想定し，対象地域内で一様に震度 6 強の地震動に襲われたと仮定する．



図 4.1　分析結果

- 対象地域の被災者は災害時に自宅から避難所まで避難するとし，常に避難所までの最短経路を把握しているものとする．被災者は全て一様であるとし，行動特性の違いは考慮しないこと．
- 震災発生日時により，対象地域内の滞在人口，道路需要が異なるがそれらを考慮していない．

4．指標値PIQ_d算出結果

2章で示した指標値PIQ_dについて,3章で示した地域を対象として,設定された条件の下,試算を行った．

図4.1は算出された指標値PIQ_dを地図上に表したものである．避難所に近い道路リンク，踏切を含む道路リンク，距離の長い道路リンクの指標値PIQ_dが大きいという結果を得た．これは避難所に近い道路リンクには地域内の多くの避難者が集中するため，踏切を含む道路リンクは他の道路リンクと比較して代替となる道路リンクが少ないためと考えられる．また本研究では道路リンク長を基に電柱の設置数を仮定しており距離の長い道路リンクは地震によってリンク上の電柱が 1 本以上倒壊する確率が高いためと考えられる．一方，避難所に近いが指標値PIQ_dが小さい道路リンクが存在する．これは分析対象の街路網には細街路が多く，代替経路を使用することが可能であったと考えられる．

5．指標地PIQ_dに基づく整備区間の設定とその結果

(1) 検討方法

指標値PIQ_dは道路リンクごとに評価を行っているが，無電柱化整備は複数の道路リンクをまとめ区間単位で行われる．そこで幾つかの無電柱化整備候補区間からより整備効果の高い区間を選択する際の指標値PIQ_dの活用法について検討する．具体的には以下の整備計画の効果



図 5.1　各整備計画区間

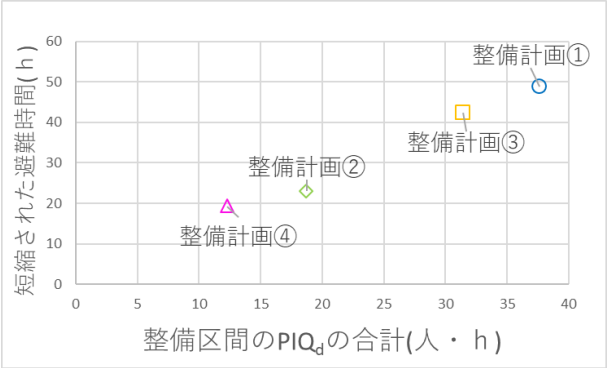


図 5.2　各整備計画の効果とPIQ_dの関係

を比較する．図 5.1 に各整備計画区間を示す．

① 上部域から避難することを想定した区間
② 下部域から避難することを想定した区間１
③ 左部域から避難することを想定した区間
④ 下部域から避難することを想定した区間２

(2) 検討結果と考察

整備計画の効果として対象地域の総避難時間の期待値を用いる．総避難時間が小さい整備計画区間はより整備効果が高いと考えることができる．具体的には整備区間に含まれる道路リンクの電柱の倒壊確率を０とし，目的地を避難所とした最短経路探索を行い各ノードからの避難時間を算出する．各ノードからの避難時間に各ノードからの避難人数を掛け，足し合わせることで期待される総避難時間を求める．

図 5.2 は算出された整備前と各整備計画試行後の総避難時間を比較したものである．図に示すように整備区間に含まれるPIQ_dの合計値が大きいほど地区内の避難時間の短縮に寄与できることがわかる．本研究で提案した指標値PIQ_dを用いて整備計画の優先順位判断を行うことは有効となることを示している．

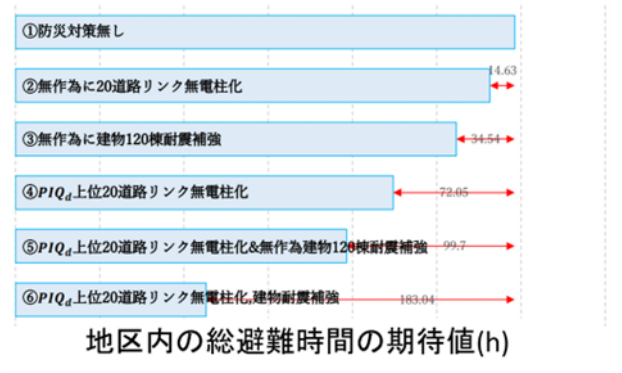


図 5.3　各整備シナリオの整備効果比較

(3) 無電柱化の防災対策としての有効性の検討

無電柱化の有効性について検討を行うため以下の整備シナリオについて，(2) と同様に地区内の避難時間の期待値の比較を行った．

① 防災対策なし
② 無作為に 20 道路リンク無電柱化
③ 無作為に建物 120 棟耐震補強
④ PIQ_d上位 20 道路リンク無電柱化
⑤ PIQ_d上位 20 道路リンク無電柱化&無作為に建物 120 棟無電柱化
⑥ PIQ_d上位 20 道路リンク無電柱化，建物耐震補強

なお電力会社が公表している [18]2023 年から 2027 年までの無電化延長，整備費用と木耐協調査 [19]による耐震補強工事の平均施工金額から地区内のPIQ_d上位 20 リンクを補強するのに掛かる費用は建物耐震補強 120 棟分に相当すると設定した．図 5.3 に算出された整備前と各整備シナリオ試行後の総避難時間を比較したものを示す．整備シナリオ③と④の比較により建物の耐震補強よりも指標値PIQ_dを用いて無電柱化を行ったほうが効果は大きくなっていることがわかる．このことから所有者の判断にゆだねられる建物の耐震補強と比較して行政が計画的に行う無電柱化整備は防災対策として有効であると考えられる．また整備シナリオ②と④の比較から無電柱整備は優先順位判断を行うべき事業であることが言える．

6. 結論

本研究では，震災時の電柱倒壊が住民の避難経路に与える影響の観点から無電柱化の効果について検討を行った．無電柱化の効果を計る指標値PIQ_dを，ある道路リンクが無電柱化されていた場合に短縮される避難所までの移動時間と定義し，東京都世田谷区若林 1,2 丁目，太子堂 4,5 丁目をケーススタディ地域とし分析を行った指標値PIQ_dによると無電柱化の効果が高い道路リンクは避難所に近く，距離の長い道路リンクとなった．そして指標値PIQ_dに基づいて整備計画の優先順位判断を行う有効性について示した．また無電柱化は防災対策とし

て計画的に行うことで有効であることを示した．

今後の課題として，避難経路への影響想定の精密化，考慮する被害の対象をライフライン等にも拡充することが挙げられる．本研究では分析対象地域の建物の耐震性を全て等しい条件で行ったが，構造別，建築年代別に耐震性を設定することでより精確に被害状況を想定することが出来る．また建物倒壊に巻き込まれることにより発生する電柱倒壊を考慮できておらず，建物倒壊と電柱倒壊を独立したものとして扱ったため，電柱による被害状況を大きく評価してしまっている可能性がある．過去の震災時には，電柱倒壊に起因する長期停電等，ライフラインへの被害が確認されている．本研究で算出した無電柱化の効果についての妥当性の検討，より総合的に無電柱化の効果を評価する必要がある．

参考文献

1) 家田仁, 上西周子, 猪股隆行, & 鈴木忠徳. (1997). 阪神・淡路大震災における 「街路閉塞現象」 に着目した街路網の機能的障害とその影響. 土木学会論文集, (576), 69-82.

2)国土交通省 HP，無電柱化の推進, https://www.mlit.go.jp/road/road/traffic/chicyuka/index.html , (2023.8.29 閲覧)

3)東京都：東京都無電柱化計画（改定）

4) 石田眞二, 亀山修一, 奈良照一, & 宮坂純平. (2011). 無電柱化整備による道路のシークエンス景観の効果計測に関する研究. 土木学会論文集 D1 (景観・デザイン), 67(1), 1-10.

5) 厲国権, 角智憲, & 寺町賢一. (1998). 歩車混合細街路の交通容量と歩行者の交通安 全に与える電柱の影響. 都市計画論文集, 33, 589-594.

6) 朴 鏞元，張 喜淳，横田隆司：無電柱化が地価に及ぼす影響の要因分析―韓国の江原道 春川市孝子洞大成路一帯を対象として―，都市計画論文集，Vol. 52, No.3, pp. 1212-1 217, 2017.

7) 日比慧慎, & 小野祐輔. (2020). 中山間地の地震時孤立リスク低減のための重要道路 区間の抽出法. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 76(4), I_454-I_460.

8) 小川圭一, 塚口博司, 中村真幸, & 本郷伸和. (2006). 歴史都市における文化遺産防 災のための重要道路区間の抽出に関する研究. 土木計画学研究・論文集, 23, 253-264.

9) 長谷川究, 小早川悟, & 後岡寿成. (2019). 大規模地震時における道路閉塞要因を考慮した避難所への救援物資配送に関する研究. 交通工学論文集, 5(4), A_64-A_72.

10) 大澤脩司, 藤生慎, 中山晶一朗, & 高山純一. (2017). 地震に対する道路網の脆弱区間評価手法の構築と緊急輸送道路網への適用. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 73(4), I_467-I_478.

11) 小沼佳代，田口孝行，& 相馬正之．(2008)．障害物回避における歩幅と歩行速度の変化．理学療法-臨床・研究・教育，15(1)，21-25.

12)高知県海洋漁港課：漁村における津波対策基本方針

13)（一社）交通工学研究会：平面交差の計画と設計_基礎編－計画・設計・交通信号制御の手引,発売：丸善出版株式会社,2018

14) 東京消防庁：第 21 期第 21 期火災予防審議会地震対策部会答申書地震火災による人的被害の軽減方策，https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/kk/21k_jisin_tousin.html (2023. 1. 28 閲覧)

15) 村西正実：沿道建物の倒壊を考慮した道路の横断面構成, 交通施設と 農業施設の被害と復旧, 阪神・淡路大震災調査報告、pp.189-198, 1998.

16) 東京都防災会議，首都直下型地震などによる東京の被害想定報告書

17)総務省統計局，令和 2 年国勢調査, https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2020/index.html (2023. 1. 28 閲覧)

18) 経済産業省資源エネルギー庁：電力における無電柱化の取組 https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/chicyuka/pdf15/04.pdf (2023. 1. 31 閲覧)

19) 木耐協調査データ 2021 年 3 月 4 日発表 https://www.mokutaikyo.com/useful/data202103 (2023. 1. 31 閲覧)