

津波避難の安全性に及ぼす 避難施設数と街路閉塞の影響の評価

渡邊 祐二¹・熊谷 兼太郎²・根木 貴史³

¹正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1）
E-mail:watanabe-y82ab@ysk.nilim.go.jp

²正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所（同上）
E-mail:kumagai-k27n@ysk.nilim.go.jp

³正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所（同上）
E-mail:negi-t92y2@ysk.nilim.go.jp

2011年東日本大震災を教訓として、防波堤、防潮堤等の構造物による対策、そして津波避難対策といったハード及びソフト施策を組み合わせた対策が重要である。津波避難の研究に関してこれまで、対象とした全避難者の安全性を確保するといった視点から避難対策の効果を定量的に解析したものは少ない。本研究では、津波浸水が想定される沿岸地区の市街地の避難対策の効果を、避難施設数及び街路閉塞に着目して、定量的に比較する手法及び全避難者の安全性を考慮した対策検討手法の提案を目的とする。その結果、避難施設数が増えると平均避難距離が減少する傾向が得られ、避難施設数が3箇所から数箇所増やすと大きな効果があったが、全避難者を考慮するにはさらに避難施設が必要なこと、そして閉塞箇所の位置によって避難者への影響が異なることが分かった。

Key Words : tsunami evacuation, house wreck, evacuation site, GIS

1. はじめに

2011年東日本大震災を教訓とした津波防災まちづくりの取り組みの方向性について、早急な具体化が求められているが、その中において防波堤、防潮堤等の構造物による防災・減災対策、そして実効性のある津波避難対策といったハード及びソフト施策を組み合わせた多重防御による対策のあり方が重要な検討課題となっている¹⁾。

これまで、津波避難対策に関する研究として竹内ら²⁾はGISを用いた避難シミュレーションにより既設の避難施設あるいは想定の高台を設定することで避難距離を評価尺度として避難者の安全性の評価を行っている。また、細木ら³⁾はpメディアン問題（避難者から最も近い避難施設への避難距離の総和を最小化するように避難施設を配置する問題）を解くことにより、人口分布に対応した避難場所の配置手法を提案している。しかし、対象とした全避難者の安全性を確保するために避難施設の数及び配置をどのようにするかといった視点から津波避難対策について定量的に評価を行った研究は少ないと思われる。そこで本研究では、津波浸水が想定される沿岸地区の市街地において津波避難シミュレーションを行い、避難対

策の効果を定量的に比較する手法及び避難者の安全性を考慮した避難対策の提案を目的としている。

対象地域はある沿岸地区の市街地で東西約600m、南北約900mの面積約188,000m²の範囲を対象とした。この地域を対象とした理由として、1つ目は過去に地震・津波による被害が発生しており、今後も地震・津波による

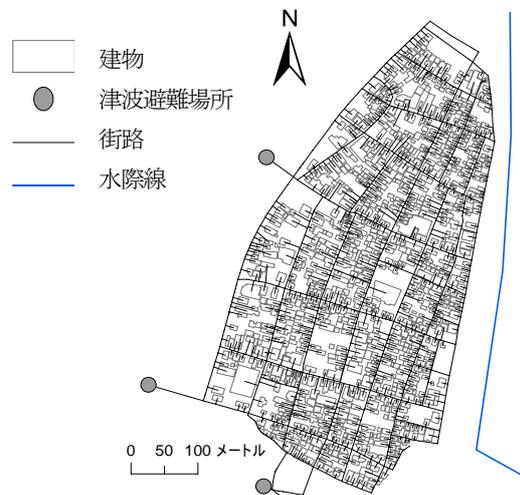


図-1 モデル化した津波避難場所、建物及び街路

被害発生のリスクがあること。2つ目に典型的な低層木造住宅を中心とした市街地であることが挙げられる。図-1にノード・リンクモデルを用いてモデル化した対象地域の津波避難場所3箇所、建物814棟及び街路を示す。また、2.(1)で述べる避難施設の追加にあたっては、814棟の建物の中から津波避難ビルとする建物を選んでいる。

(以下、津波避難場所及び津波避難ビルをまとめて避難施設という)。

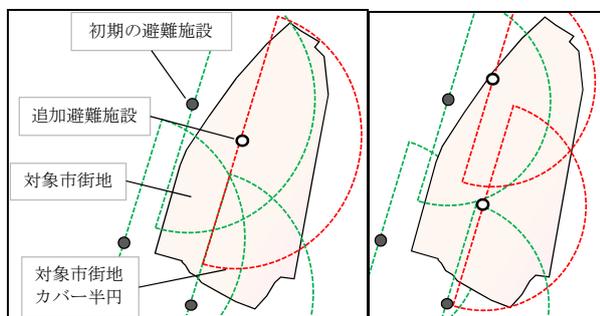
2. ケーススタディの手法

(1) 津波避難対策の検討項目と検討の概要

津波避難対策の効果の評価検討は次の2項目を行う。

- ①避難施設の追加
- ②建物耐震化による街路の閉塞箇所の減少

①及び②の効果を定量的に評価するため、避難施設及び閉塞箇所はそれぞれ(2)、(3)のように設定した。ケーススタディは(2)及び(3)を組み合わせると計24ケースを行った。表-1にその一覧を示す。なお、閉塞箇所の発生位置の違いによる避難距離の差を求めるため、避難施設6



(1) 避難施設1箇所追加 (2) 避難施設2箇所追加
図-2 初期の避難施設(3箇所)からの追加配置例

箇所の場合については、閉塞No.1に加えて閉塞No.2及び閉塞No.3のパターンについてもケーススタディを行った(ケース8~10)。

避難行動ルールを(4)として解析を行った。安全性評価は(5)の指標を用いて行う。

(2) 避難施設の配置

避難施設は最初の状態を3箇所とし(図-1)そこから1箇所ずつ追加し、10箇所まで追加(避難施設は13箇所となる)した11通りを行った。新たに追加した避難施設の配置方法は、元々あった3箇所は固定して避難施設を中心とした円弧が水際線側に張り出す半円を、少しずつ半径を変化させて描き、この半円により対象市街地全体をカバーし、かつ円弧の半径が最小となる位置に配置する方法をとった。ここで、対象地域全体をカバーするために半円を用いた理由は、避難者は原則的に水際線側から離れる方向へ避難するため、避難施設よりも水際線側にいる避難者のみを対象とするためである。

内閣府のガイドライン⁴⁾ではこれと同様に半円を用いてカバーエリアを決定する方法を示しているが、津波避難ビル位置の選定は地域の意見・意向を取り入れつつ行うとあるのに対し、本研究では面的に最適な配置となるよう位置を決定している点異なる。また、同ガイドラインでは避難可能な範囲(距離)と収容可能な範囲(人数)の両方を考慮して決めている。本研究では、それに対し収容可能性(収容人数)については考慮していない。

図-2に上述の配置方法により行った、ケース3、4(避難施設をケース1、2より1箇所追加し、合計4箇所とした場合)とケース5、6(同2箇所追加し、合計5箇所とした場合)の避難施設の配置例を示す。

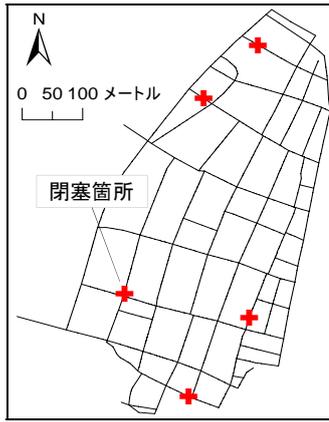
(3) 建物倒壊により発生する街路の閉塞箇所の設定

閉塞箇所は熊谷ら⁵⁾の手法を用いて震度6弱の地震で建築年によらない構造別全壊率をもとに算定し、閉塞箇

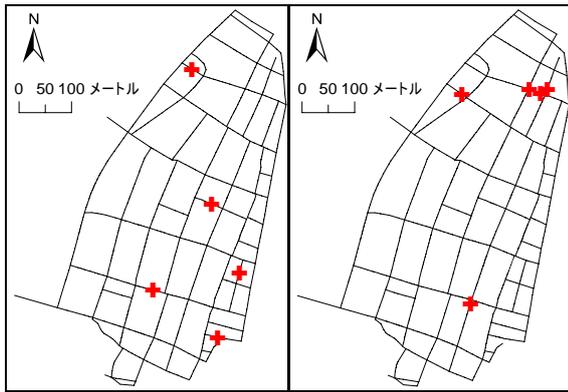
表-1 ケーススタディ条件一覧

ケース	避難施設数(箇所)	閉塞箇所
1	3	0
2	3	5(閉塞No.1)
3	4	0
4	4	5(閉塞No.1)
5	5	0
6	5	5(閉塞No.1)
7	6	0
8	6	5(閉塞No.1)
9	6	5(閉塞No.2)
10	6	5(閉塞No.3)
11	7	0
12	7	5(閉塞No.1)

ケース	避難施設数(箇所)	閉塞箇所
13	8	0
14	8	5(閉塞No.1)
15	9	0
16	9	5(閉塞No.1)
17	10	0
18	10	5(閉塞No.1)
19	11	0
20	11	5(閉塞No.1)
21	12	0
22	12	5(閉塞No.1)
23	13	0
24	13	5(閉塞No.1)



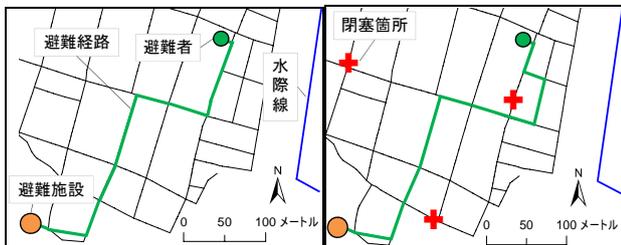
(1) 閉塞 No.1



(2) 閉塞 No.2

(3) 閉塞 No.3

図-3 街路の閉塞箇所



(1) 閉塞箇所へ遭遇しない場合 (2) 閉塞箇所へ遭遇する場合

図-4 避難行動の違いの例

所の位置が異なる3パターンとした。ただし、閉塞箇所数はいずれも5箇所である。各ケースの閉塞箇所を閉塞No.1、No.2及びNo.3として図-3に示す。

(4) 避難者の避難行動ルール

各建物に1人避難者を配置し、避難者は各建物から避難施設に向かい避難する。そのため、避難者数は814人である。

GISの経路解析機能(ESRI社製 ArcGIS ArcView Ver.10.0, NetworkAnalyst機能)を用いて避難距離の解析

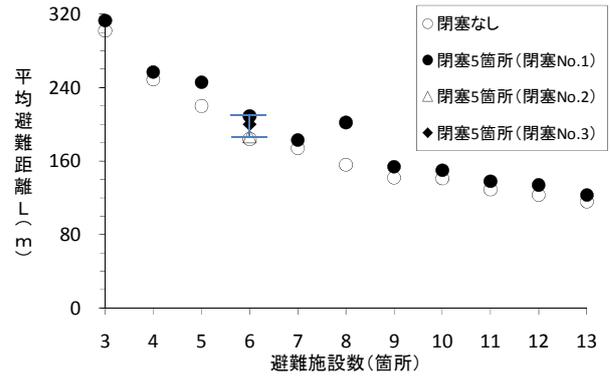


図-5 避難施設数と平均避難距離Lの関係

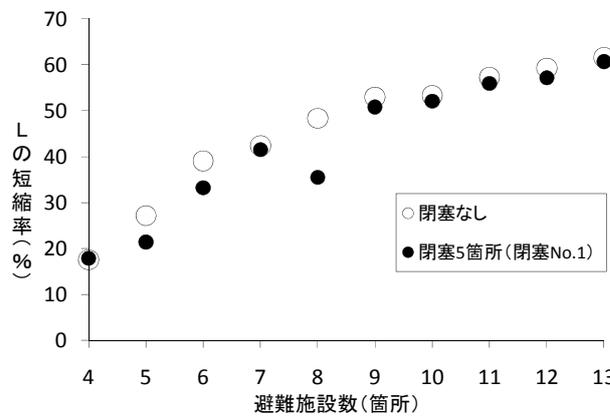


図-6 避難施設3箇所のケースに対する各ケースのLの短縮率

を行った。避難ルールは次の3点とした。

- ①避難者は水際線から離れる方向へ避難する。
- ②最短距離となる避難施設へ避難する。
- ③街路の閉塞箇所に遭遇した際は、その直前の交差点から迂回する。ただし、ゴールとする避難施設は変更しない。また、迂回する場合に限り、水際線へ向かう方向への避難も行えるものとする。

ここで、閉塞箇所へ遭遇しない場合と遭遇する場合の避難行動の違いの例を図-4に示す。

(5) 安全性評価の指標

津波避難の安全性評価の指標は著者ら⁶⁾と同様に避難者の平均避難距離Lを指標とする。また、最大避難距離 L_{max} にも着目した分析を行った。

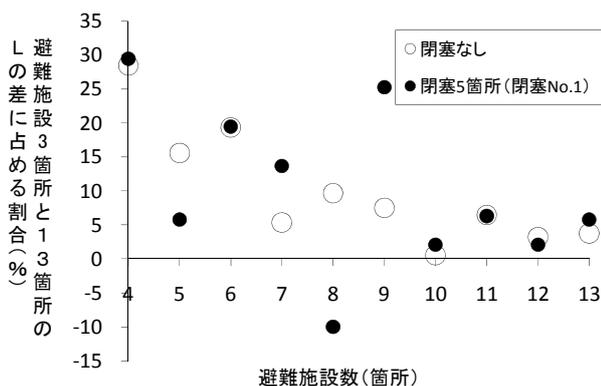


図-7 避難施設1箇所追加当たりの効果

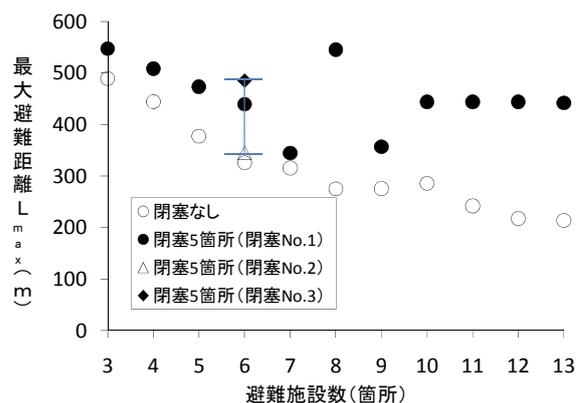


図-8 避難施設数と最大避難距離 L_{max} の関係

3. 結果

(1) 避難施設の追加による効果

図-5に白丸印で、街路に閉塞がない場合の、避難施設数と平均避難距離Lの関係を示した。ケース1（避難施設3箇所）のLは302mとなった。ケース23（同13箇所）では116mとなった。全体的な傾向として避難施設数が多いほどLは減少している。図-6は、ケース1のL（302m）に対する各ケースのLの短縮率を示している。ケース1と23を比較した場合（避難施設を10箇所追加した場合）Lの短縮率は60%程度となった。ケース1（避難施設3箇所）とケース23（同13箇所）のLの差は186mとなる。避難施設を3箇所から順に追加するごとにLの差を求め、その値の、先に述べた186mに対する割合を図-7に示す。避難施設を3箇所から6箇所まで増やしたときは全体186mのうち63.4%、9箇所まで増やしたときはさらに22.6%、12箇所まで増やしたときはさらに10.2%占める割合は増えているが、避難施設を追加するにつれて1箇所追加当たりのLの短縮に及ぼす効果は小さくなっていく。

(2) 閉塞箇所に関する効果

図-5より、避難施設同数のとき閉塞なし（白丸印）と閉塞5箇所（閉塞No.1）（黒丸印）の場合を比較すると、閉塞なしのケースが常に閉塞5箇所のケースよりもLが小さくなっている。例えば、ケース1（閉塞なし）のLは302mに対し、ケース2（同5箇所）のLは313mである。また、避難施設3箇所から8箇所まではLの差が8~46mであるが、9箇所から13箇所までのLの差は7~12mであり、前者よりも差が小さくなっている。図-7をみると、ケース2（避難施設3箇所）とケース24（同13箇所）のLの差190mに対し、避難施設を3箇所から6箇所まで増やしたときは54.7%、9箇所まで増やしたときはさらに28.9%、

12箇所まで増やしたときはさらに10.5%占める割合は増えているので、概ね閉塞なしの場合と同様の傾向がみられる。しかし図-5で、ケース12（避難施設7箇所）は、Lが183mであるのに対して、ケース14（同8箇所）は、Lは202mであった。このように、建物倒壊による避難経路の閉塞があったとした条件下では、避難施設を追加してもLが増加するケースがみられた。

(3) 避難施設数と最大避難距離の関係

最大避難距離 L_{max} に着目すると図-8より、ケース1（避難施設3箇所、閉塞なし）の L_{max} は489m、ケース2（同、閉塞5箇所）の場合で547mとなった。同様にケース23（避難施設13箇所、閉塞なし）で214m、ケース24（同、閉塞5箇所）で442mとなった。閉塞なしの場合では減少と横ばいを繰り返しながら概ね減少する傾向がみられる。一方、閉塞5箇所の場合は、ケース14（避難施設8箇所）において全ケースの中で最大の545mとなるなど、閉塞なしとは異なる傾向となった。

(4) 街路の閉塞箇所の位置の変化が及ぼす影響

避難施設6箇所の場合については、閉塞箇所の位置を変化させた閉塞No.1、No.2及びNo.3の3パターンを行った（ケース8~10）。その結果を図-5のなかの避難施設6箇所のところに示す。3パターンのうちLが最大となるのは閉塞No.1の209m、最小は閉塞No.2の187mとなり、22mの差が生じた。

次に L_{max} について図-8より、閉塞No.3において最大の485m、閉塞No.2において最小の345mとなり、その差は140mとなった。すなわち、街路閉塞箇所の位置を変化させた条件下では、Lが最も大きくなるパターンと L_{max} が最も大きくなるパターンは異なった。

表-2 閉塞箇所遭遇率及び迂回距離について

避難施設数 (箇所)	閉塞箇所 遭遇者数 (人)	閉塞箇所 遭遇率 (%)	閉塞箇所遭遇者の 迂回距離の平均値 (m)
3	102	12.5	84
4	77	9.5	92
5	211	25.9	102
6(閉塞No.1)	212	26.0	96
6(閉塞No.2)	96	11.8	35
6(閉塞No.3)	125	15.4	110
7	109	13.4	65
8	189	23.2	197
9	81	10.0	124
10	57	7.0	135
11	70	8.6	96
12	63	7.7	134
13	59	7.2	100

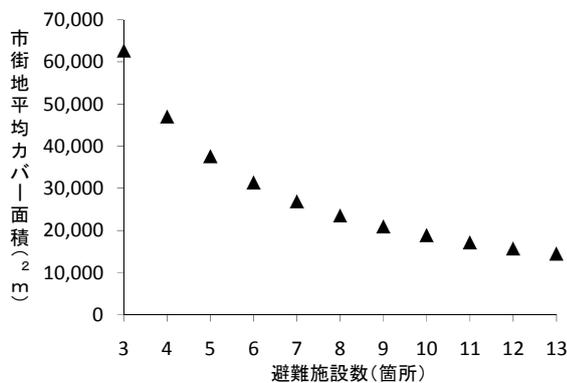
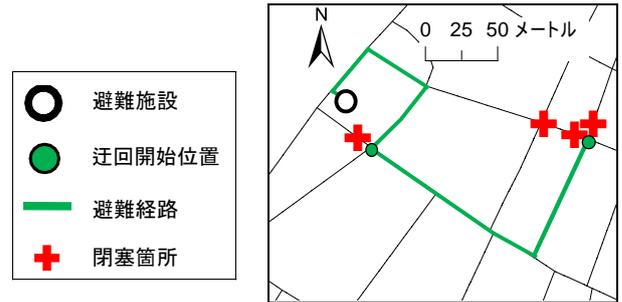


図-9 避難施設1箇所当たりの市街地平均カバー面積

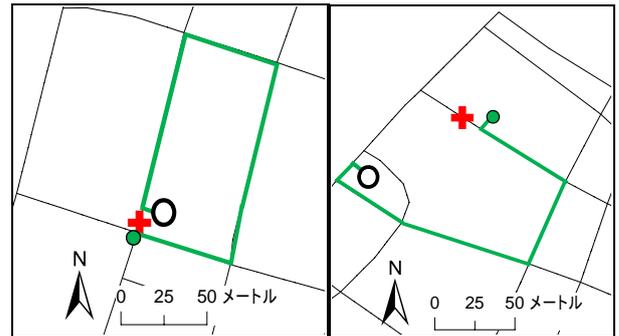
4. 考察

(1) 避難施設1箇所追加当たりの効果の減少

3.(1)より、避難施設数が多くなるほど1箇所追加当たりの効果は小さくなっている。このことは次のように考えられる。対象市街地の面積は約188,000m²であり、初期の避難施設は3箇所なので1箇所当たり平均カバー面積は約62,700m²となる。4箇所の場合は約47,000m²となり、その差は15,700m²である。それに対して12箇所の場合の1箇所当たり平均カバー面積は約15,700m²、13箇所の場合は約14,500m²となり、その差は1,200m²である。3箇所から4箇所に追加した際の施設当たりカバー面積減少量は、12箇所から13箇所に追加した際のカバー面積減少量の約13倍になる。平均カバー面積と避難施設数との関係を示したものが図-9になる。避難施設を追加するほど1箇所追加あたりの効果が小さくなるのは、このように避難施設1箇所当たりのカバー面積が小さくなっていくため、避難者の最寄りの避難施設が避難施設を追加することで



(1) 閉塞箇所遭遇による2度の迂回



(2) 避難施設近傍での閉塞箇所遭遇 (3) 避難開始直後の進行方向側の閉塞箇所遭遇

図-10 迂回距離が長くなる要因例

より近くなったとしても避難距離を減少させる効果がより小さくなっていくことが考えられる。

(2) 閉塞箇所遭遇率と迂回距離

3.(2)について、避難施設数と閉塞箇所遭遇率（最初に選択した避難経路上に閉塞箇所が存在した人の割合）の関係（表-2）を示した。避難施設が9～13箇所では遭遇率は10%以下となっている。このことは、避難施設が多くなると避難者の避難経路が分散化し、閉塞箇所に遭遇するリスクが減少することを示していると考えられる。

ここで、避難施設6箇所の場合において、閉塞箇所の異なる3パターンを行ったが、閉塞No.3は市街地の北側に閉塞箇所が集中しており（図-3）、避難が不可能となった避難者及び2つの閉塞箇所に遭遇する避難者がいた。L_{max}は3パターン中、最も大きくなった。Lが最も大きくなった閉塞No.1では、避難開始直後に進行方向側の街路が閉塞し、反対側へ比較的大きく迂回する避難者や、避難者が集中しやすい避難施設の直前で閉塞箇所に遭遇し、迂回しなければならない避難者がみられ、L（3.(4)参照）及び閉塞箇所遭遇率（表-2）が大きくなったと考えられる。

また、避難施設 8 箇所の場合は遭遇率が 23.2%であり、避難施設 5 箇所のケースよりも小さいが、図-5 より閉塞なしとのLの差は46mであり、その差は避難施設 5 箇所のケースの約2倍となっている。このような差が生じる要因として閉塞箇所に遭遇した避難者が迂回に要した距離（以下、迂回距離という）が大きいためと考えられる。表-2 で、避難施設 8 箇所の場合の迂回距離は避難施設 5 箇所の場合の約2倍となっている。迂回距離がこのように大きくなった要因は、避難施設の近傍で閉塞が発生し、閉塞箇所遭遇者の約5割（189人中102人）がこの閉塞箇所に遭遇し、避難者それぞれが約320mの迂回をしなければならなかったためである。

以上について、迂回距離が大きくなる事例をまとめると、以下のとおりである。また、図-10 に事例を示す。

- ①2つの閉塞箇所に遭遇し、2度の迂回が生じる
- ②避難施設近傍での閉塞箇所遭遇
- ③避難開始直後の閉塞箇所遭遇

(3) 避難施設配置に用いる半円半径と最大避難距離の関係

2.(2)で避難施設配置に用いた半円半径から、閉塞なしの場合の避難者の最大避難距離を推定できると考えた。ただし、街路は碁盤目状に張り巡らされた形状をしているものと仮定する。図-11に示すように避難施設配置決定時の半径はその半円のカバーする建物のうち、最も遠い建物との直線距離を表す。この直線距離は三角形の斜辺にあたり、街路は碁盤目状に張り巡らされていることから避難距離は直角三角形の直角をはさむ2辺ということになる。直角をはさむ2辺の和が最大となるのは直角二等辺三角形のときで、その和は斜辺の $\sqrt{2}$ 倍である。表-3に、こうして得た想定最大避難距離と、比較のために3.のケーススタディの解析結果をまとめて示す。想定最大避難距離に比べ実際の解析結果は0~53mの範囲で大きくなった。想定よりも解析結果が大きくなる要因は次のものが考えられる。

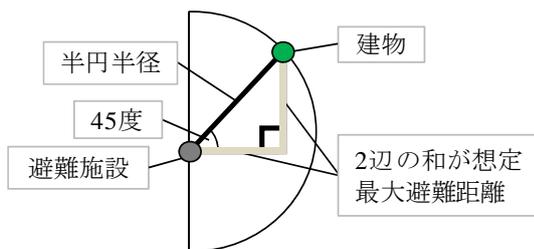


図-11 想定最大避難距離について

- ①避難施設が交差点から離れた位置に配置されている
- ②建物から街路に出るまでの距離及び街路から建物に入るまでの距離が大きい
- ③街路はきれいな碁盤目状ではないため、余計な距離がかかる

(4) 全避難者を安全に避難させる対策

3.のケーススタディ対象地域の沿岸への津波到達予想時間は、津波シミュレーションより地震発生から19分20秒後である⁹⁾。また、避難開始時間について永川ら⁷⁾の手法を参考に、近年の情報伝達技術の改良や津波への関心の高まりを考慮して、避難開始時間を地震発生から15分後とした。そうすると、避難開始時間と津波到達予想時間の間には4分20秒（260秒）の時間差がある。ここで、内閣府のガイドライン⁴⁾によると避難の際の移動速度は1m/sである。浸水が始まった後でも避難可能な地域はあるが、避難のリスクを低くするために、浸水が始まる前に避難を完了することを考える。これによれば、避難開始位置から260mの移動距離内に避難施設が必要となる。

表-3 想定最大避難距離と最大避難距離

避難施設数 (箇所)	避難施設配置決定に用いた半径 (m)	想定最大避難距離 (m) (A)	最大避難距離 (m) (B)	(B) - (A)
4	310	438	444	6
5	260	368	377	9
6	230	325	325	0
7	205	290	315	25
8	190	269	275	6
9	170	240	275	35
10	165	233	286	53
11	150	212	242	30
12	140	198	217	19
13	135	191	214	23

表-4 避難距離が260m以上の避難者数 (人)

閉塞箇所 避難施設数 (箇所)	閉塞なし	閉塞5箇所 (閉塞No.1)
3	550	563
4	381	394
5	256	356
6	95	224
7	44	101
8	9	130
9	7	53
10	6	43
11	0	26
12	0	30
13	0	21

閉塞箇所なしの場合、全避難者がこの条件を満たしているのは避難施設が11箇所以上の場合である(表-4)。閉塞5箇所(閉塞No.1)の場合には、全避難者がこの条件を満たしているケースはなかった。しかし、避難距離が260m以上の避難者数は減少傾向にある(表-4)。

(3)の手法で、最大避難距離を260m以内としたい場合には、避難施設数を9箇所設置すれば達成できる。しかし、実際の解析結果では、閉塞なしとした場合であっても7名の避難者の避難距離が260mを越えていた。上で述べたとおり、全避難者の避難距離が260m以内であったのは、避難施設をそれよりも2箇所多い11箇所以上の場合であった。そのため、(3)の手法はあくまで目安であり、それ以上に余裕をみる必要があることが分かった。

ケース20、22及び24(それぞれ避難施設が11、12、13、閉塞はいずれも5箇所)に対し、(2)の考察から有効と考えられる対策、すなわち迂回距離への影響の大きい閉塞箇所2箇所について建物の耐震化等の方法により、閉塞しないと仮定する。その結果、避難距離が260m以上となる避難者数は、避難施設11箇所の場合で26人から4人に減少し、12箇所の場合で30人から2人に減少し、13箇所の場合で21人から0人に減少にした。すなわち、避難安全性への影響が大きいと考えられる街路の閉塞箇所を建物の耐震化等により抑えることで、津波到達時間を考慮したときの対象地域の避難安全性を改善できる結果となった。

5. 結論

津波浸水が想定される沿岸地区の市街地において津波避難シミュレーションを行った。その結果は以下の通りである。

○避難施設を3～13箇所に変化させたケーススタディを行い、避難施設数が増えると平均避難距離が減少する傾向が得られた。その中でも、避難施設数を初期の3箇所に対して数箇所増やすと大きな減少効果があった。また、避難施設を追加するにつれて、1箇所追加当たりの平均避難距離の短縮に及ぼす効果は小さくなっていった。

○街路の閉塞箇所が5箇所ある場合とない場合とを比較すると、ある場合は平均避難距離がない場合に比べて7～46m大きくなった。

○街路の閉塞箇所の発生位置を変えたケーススタディにより、同じ閉塞箇所数でも平均避難距離及び最大避難距離にばらつきが生じ、閉塞箇所の発生位置により、避難者に与える影響の大きさが異なることがわかった。このことは、閉塞箇所の平面的な発生位置によって影響を受けたものである。したがって、避難対策にあたって地震動での建物倒壊による街路の閉塞箇所の平均的な発生位置を考慮し、影響が大きい箇所については周辺建物の耐震化を行う、あるいは、閉塞をする可能性の高い街路付近に避難施設を設けない等の対策が必要である。

今後の課題として、建物1棟に対して避難者1人の配置としたが、建物の属性によって避難者数を変更する必要がある。また、避難施設の収容人数を考慮に入れた検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省 社会資本整備審議会・交通政策審議会 交通体系分科会 計画部会：社会資本整備審議会・交通政策審議会交通体系分科会 計画部会 緊急提言「津波防災まちづくりの考え方」, 2011.
- 2) 竹内光生, 大田盟, 政岡知実, 町田奈々：南海地震を想定した高台方向の緊急一次避難場所の選択行動分析-四万十市-, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, pp.193-194, 2009.
- 3) 細木智広, 山崎直, 小堀晃子, 竹内光生：Gurobi3.0.1 を用いた比較的大規模な p メディアン問題に関する研究-安芸市-, 土木学会四国支部第 17 回技術研究発表会講演概要集, pp.229-230, 2010.
- 4) 内閣府政策統括官(防災担当), 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会：津波避難ビル等に係るガイドライン, pp.11, pp.19-25, 2005.
- 5) 熊谷兼太郎, 鈴木武：市街地特性及び浸水予測結果を考慮した津波避難安全性評価の基礎的研究, 国土技術政策総合研究所資料 第 537 号, 2009.
- 6) 渡邊祐二, 熊谷兼太郎, 根木貴史：津波避難の定量的安全性評価に関する基礎的研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, pp.433-434, 2011.
- 7) 永川賢治, 今村文彦：情報伝達・避難開始時間に着目した防災力評価法の提案, 津波工学研究報告 第 17 号, pp.79-94, 2000.

(2011.8.5 受付)