

修士論文

自然災害の影響下における中国高速鉄道の経路脆弱性分析

Liu Fangjun

NO.2110202

主指導教員 林 幸雄

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(知識科学)

令和5年3月

Abstract

The transport network plays an important role in social, cultural, and economic exchanges and its stability and reliability are directly related to the normal development of society. In China, due to the economic and cultural ties between different parts of the country, the distance of inter-regional interaction is very large, and the railway transport system, as an important transport infrastructure, has the advantages of high traffic volume (more passengers transported) and high density (more railway stations compared to airports) compared to air transport, and has the advantages of large span (long transport distance) and fast speed compared to some inter-city short distance transport systems. High-speed railways also have the advantage of being more comfortable and energy efficient, and therefore play a role in China's transport that is irreplaceable by other modes of transport. Considering the development of high-speed railways in China in recent years and the increased disruption of high-speed train operations by frequent natural disasters, the study of vulnerability can provide reference solutions for high-speed railways to withstand natural disasters and the construction of new lines in different regions, etc. Therefore, the theoretical significance and application value of the study of vulnerability of high-speed railway networks is becoming increasingly evident. The main research work as well as the innovation points of this paper are as follows.

(1) Visualization of China's high-speed railway network

Based on real operational data of China's high-speed railway system, we abstract and simplify the data into a flat network structure for analysis and visualize various categories of network graphics according to different analysis needs. Examples include railway line speed distribution maps, railway running timeline maps, etc.

(2) Specific to the location of the impact of the disaster

From the impact on high-speed railway operation hindered by 3 categories of meteorological disasters (heavy rain, snowstorm, strong wind) and a class of geological disasters (earthquake) as the object, complete China's railway disaster map and other visualizations, and combined with the line design speed as the line weights China high-speed railway network map using the risk matrix model to complete a variety of disaster conditions of China's high-speed railway The hazard risk map is completed with a hazard interval specification.

This hazard interval specific method considers regional climatic conditions, frequency of exposure to hazards and the different sensitivity of lines to hazards at different design speeds to derive discrete risk levels. The method allows for the rapid specification of high-risk disaster locations considering a variety of factors.

(3) Calculation of the shortest route

The Floyd algorithm is used to calculate the shortest route between stations, using transport time as a weighting factor. The difference between the change in the shortest route of the overall network under different disaster impact conditions and under normal conditions is used as an important indicator for the vulnerability analysis in this paper. The number of disrupted lines, the size of the change in the shortest route and the number of lines affected can reflect the ease of being affected by the disaster, the extent of the disaster, and the impact of the disaster, respectively, so that the vulnerability of the high-speed railway network under each disaster condition can be considered comprehensively.

Keywords: China high-speed railroad network, visualization, hazard map, risk matrix, shortest path, hazard risk assessment, vulnerability analysis.

目次

第1章 はじめに	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 論文の構成	2
第2章 関連研究	3
2.1 ネットワークの基本用語	3
2.2 分析指標	4
2.2.1 連結信頼性	4
2.2.2 脆弱性	4
2.3 ネットワーク図における最短経路の計算	5
2.3.1 ダイクストラアルゴリズム	5
2.3.2 フロイド・ウォーシャル・アルゴリズム	6
第3章 分析手法	7
3.1 中国高速鉄道ネットワークのモデル構築手法	7
3.1.1 基本データ	8
3.1.2 ネットワークモデルの構築とその可視化	9
3.2 中国高速鉄道ネットワークの自然災害リスク評価手法	9
3.2.1 自然災害による鉄道の主なリスクタイプ	9
3.2.2 災害基礎データ	9
3.2.3 中国高速鉄道路線速度データ	10
3.2.4 中国高速鉄道運行の危険度分類基準	10
3.2.5 リスクマトリックスによる災害リスクレベルの設定	12
3.3 中国の鉄道災害リスクマップの可視化	13
第4章 実験・評価	17
4.1 中国高速鉄道ネットワークの可視化	17
4.1.1 中国高速鉄道ネットワークの可視化	17
4.1.2 中国高速鉄道の駅間最短経路の算出結果	20
4.2 降雨災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性分析	21
4.2.1 中国高速鉄道運用のための降雨リスクマップ	21
4.2.2 中国高速鉄道運用のための降雨リスク評価	21
4.3 強風災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性分析	38
4.3.1 中国高速鉄道運用のための強風リスクマップ	38

4.3.2 中国高速鉄道運用のための強風リスク評価	38
4.4 豪雪災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性分析	55
4.4.1 中国高速鉄道運用のための豪雪リスクマップ	55
4.4.2 中国高速鉄道運用のための豪雪リスク評価	55
4.5 地震災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性分析	57
4.5.1 中国高速鉄道運用のための地震リスクマップ	57
4.5.2 中国高速鉄道運用のための地震リスク評価	57
4.6 結果の一覧表	62
第5章 おわりに	66
5.1 まとめ	66
5.2 今後の展望	67
付録A 災害地図情報	68
付録B 最短経路の算出結果	73
付録C 中国高速鉄道ネットワークの脆弱性評価の手法	74
C-1 非交差経路	74
C-2 経路和行列式による非交差経路の算出手法	75
C-3 中国高速鉄道網のマッピング	76
C-4 提案手法の活用事例	77
付録D 非交差経路計算結果	79

図目次

図 2.1	基本的なネットワーク構成	3
図 3.1	中国高速鉄道の運行図[10]より転載	8
図 3.2	降雨データ	13
図 3.3	中国降雨災害サムネイル	14
図 3.4	台風データ	15
図 3.5	中国台風災害サムネイル	15
図 3.6	地震データ	16
図 3.7	中国地震災害サムネイル	16
図 4.1	中国高速鉄道ネットワーク	17
図 4.2	ダミーノットを付けるネットワーク	18
図 4.3	中国高速鉄道スピード分布図	19
図 4.4	重み（時間）をつけた線路図	20
図 4.5	中国高速鉄道ネットワークの最短経路の計算表（一部）	20
図 4.6	降雨災害リスクマップ	21
図 4.7	強風災害リスクマップ	38
図 4.8	豪雪災害リスクマップ	55
図 4.9	地震災害リスクマップ	57

表目次

表 3.1 中国高速鉄道の設計速度の分類表.....	10
表 3.2 高速鉄道災害対策基準 [19][24]より転載.....	12
表 3.3 高速鉄道災害リスク評価モデル.....	12
表 3.4 高速鉄道災害リスク評価表.....	13
表 4.1 災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性評価一覧表.....	65

第1章 はじめに

1.1 研究背景

交通ネットワークは、今や社会にとって非常に重要なインフラシステムであり、都市や地域間の人や物の迅速な移動を可能にして、経済や社会の発展、人々の生活水準の向上に関わる社会発展の基盤となっている。例えば、1964年日本の新幹線開業以来40年間、新幹線は年平均1億人の乗客を運んだ。日本の新幹線開業は、欧州の高速鉄道建設に影響を与え、欧州の高速鉄道も1990年に建設・開業された。2008年に中国で初めて高速鉄道が開通して以来、国民経済や社会活動に大きな影響を与えてきた。中国では、今年までに4万キロメートル以上の高速鉄道が開通している。

高速鉄道ネットワークが拡大するにつれ、ネットワーク内のノードの直接の接続数や経路を通じた間接的な相互接続性も増加し、より複雑になっている。ネットワークが複雑になることで人や物の移動の効率は上がるが、同時に問題も発生する。すなわち、予期せぬ自然災害により、輸送網の能力が著しく低下し、大きな損失を出した。例えば、2008年に中国南部で発生した暴風雪により、道路や高速道路などの交通インフラに被害が生じ、被災した交通網が通常の輸送機能を果たせず、物資の配送や通常の救援活動に支障をきたし、大きな経済ダメージも引き起こした。このような場合、予備の輸送手段や代替の迂回輸送手段があれば、被害を大幅に減らすことができる。また、輸送ネットワークの複雑な構造により、局所的な混乱が輸送ネットワーク全体の有効な連携を阻害し、直接的または間接的に経済損失をもたらす可能性がある。もし高速鉄道が強風や降雨のために速度を落とし、運行を停止しなければならない場合でも、代替の効率的なルートを見つけることができれば、損失を減らして効率を上げることができる。高速鉄道網は社会の発展や国民生活にとって重要であるため、自然災害が高速鉄道網に与える影響を調査し、その脆弱性を分析し、それに応じた対策を提供することが重要になってきていると考える。

災害に対する交通ネットワークの脆弱性の研究については、中国の学者が、ノードを削除するさまざまな攻撃戦略をシミュレーションする[1]など、ビブリオメトリック分析[2]、アクセシビリティ指標[3]やモデルを構築して[4]研究を行っている。高速鉄道建設が続く中国の鉄道網では、自然環境による障害に対して強いネットワークとして構築されることが必要である。そのため、既存のネットワー

クにおいて補強が必要となる箇所を探り、対応していくことが現実的な手段であると考え。本研究では、継続的に発展する現実的な交通網の脆弱性の変化を分析し、それに対応した保護策を提案するために役に立つことを目指す。

1.2 研究目的

本研究の目的は、中国の高速鉄道のネットワークが自然災害による障害に対して、最低限必要な鉄道路線、交通機能を維持できるように貢献することである。そのために、その高速鉄道のネットワークを対象として、ネットワークの脆弱性を分析する手法を検討する。脆弱性の指標としては非交差経路の数が考えられていて[5]、自然環境下での高速鉄道ネットワーク全体の非交通経路数の変化を計算することで、ネットワーク全体の災害に対する脆弱性を定性的に評価できる。この脆弱性指標の評価は、今後の高速鉄道の運行対応や新線建設に役立つものと考えられる。

一方、様々な自然災害の影響における高速鉄道の脆弱性を評価するためには、地域の気候環境だけでなく、高速鉄道の走行速度の違いによる危険環境に対する感度の違いも考慮する必要があると考えられる。そこで、リスクマトリックス評価モデル[6]を利用し、ハザードの強度と鉄道の指定速度を考慮して、特別な適応や予防措置が必要なホットスポットを明らかにする。災害前後のネットワーク全体の運用効率（最短経路）の変化から、緊急時の混乱に備えた不測の事態に対する対策案を提供できるようにしたい。

1.3 論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

第 2 章では、本論文で使用する基本的なネットワークの用語と分析指標、最短経路の計算について説明する。第 3 章では、高速鉄道ネットワークの構成、自然災害リスクの特定方法について述べる。第 4 章では、関連ネットワーク図の作成、計算結果と自然災害鉄道リスク評価の結果を示す。第 5 章 本文のまとめと研究の展望を扱う。付録では、経路和行列式による非交差経路の計算手法、中国高速鉄道非交差経路表、最短経路表、転載した災害図を示す。

第2章 関連研究

以下、2.1 節に本研究で使用するネットワークの基本用語、2.2 節に分析指標、2.3 節に最短経路計算方法を説明する。

2.1 ネットワークの基本用語

本研究で議論するネットワークは、グラフ $G = (V, E)$ における、ノード（頂点）の集合 $V(G) = \{1, 2, 3 \dots, i \dots, j \dots, N - 1, N\}$ と ノード を 繋ぐ リンクの 集合 $E(G) = \{e_{ij}\}$ から構成される (i, j はリンクの両端のノード)[7]。例えば基本的なネットワーク構成は以下の図 2.1 に示す。

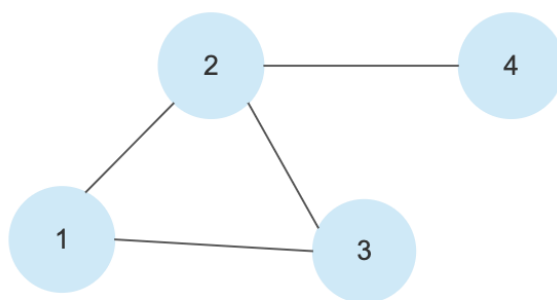


図 2.1 基本的なネットワーク構成

ただし、本研究では現実的な高速鉄道を使用しているため、本研究で現れるネットワークグラフは、両端が同じノードで接続されたリンク（自己ループ）を持たず、直接接続された2つのノード間に1つだけのリンクを持つことになる。ネットワーク内のノード間のリンクの向きを考慮したものを有向グラフ、リンクの向きを考慮しないものを無向グラフと呼ぶ。本論文の対象は高速列車であり、往復運転が基本的な運転であるため、高速鉄道ネットワークは無向グラフとして扱われる。また、高速鉄道ネットワークなど、ネットワークの接続性を表す隣接行列式の各要素は、ノード i とノード j の間にリンクがある場合は $A_{ij} = 1$ 、ない場合は0となる[7]。 $i = j$ の場合は $A_{ij} = 0$ 、重み付きグラフを考えた場合はリンクの重みを掛け、 $L_{ij} = k$ なら $A_{ij} = k$ とする。

2.2 分析指標

2.2.1 連結信頼性

連結信頼性[8]は、出発地（起点）と目的地（終点）とが走行可能な道路（リンク）でつながっていることを対象にしている。ネットワークレベルで連結信頼性を考える際には、ネットワークの OD（始点と終点）ペア集合がわかっている場合は、全 OD ペア間を移動可能な確率が最もよく用いられる連結信頼性指標であるが、その他にも連結信頼性指標はある[8]。現実的には、連結の度合いは OD 間を移動できるかどうかだけでなく、いくつ通りの経路で移動できるのかということも重要である。そこで高速鉄道路線は重複リンクが含まれないので、経路間重複を考慮する必要がない。

ただし、あるノード間が連結していても、その連結している経路が非現実的なほどに迂回する非常に長い経路のみの場合は、それは実質的には連結しているとはいえないとも考えられる。そこで、高速鉄道路線が単に連結しているのか否かだけでなく、ある一定のサービスレベル範囲内、状況により連結しているのか否かを取り扱うこともある。

2.2.2 脆弱性

連結信頼性と類似した脆弱性は、明確な定義は確立されていないもの、現状の既存研究を踏まえると、脆弱性は発生する確率が非常に小さい事象で、ただし発生した場合は大きな被害や損失が生じることがあるカテゴリー性をも対象としているといえる[8]。例えば日本では、阪神大震災や東日本大地震のような予期せぬ自然災害により、道路や高速道路などの交通インフラに被害が生じ、交通ネットワークが構造的な被害を被って、被災した交通網が通常輸送機能を果たせず、輸送網の能力が著しく低下し、物資の配送や通常救援活動に支障をきたした。

したがって、そのような小さな事象の発生確率を分析し、その被害を考えることは意味がなく、災害時に交通ネットワークの機能がニーズを満たせるかどうか、つまりネットワークの弱い部分の脆弱性を分析することが重要である。本研究では、広く利活用されている効率的な最短経路に着目するため、最短経路以外も考えた非交差経路数を用いた脆弱性分析の方法については、一部試してみたが計算量が膨大なこともあり、付録に回す。

2.3 ネットワーク図における最短経路の計算

前節のリンク信頼性に関する概念から、高速鉄道ネットワークの構造に変化があった場合(本文では、ネットワークに影響を与える自然災害によって反映される)、災害の影響を反映する何らかの数值指標が必要である。本文では、最短経路長の変化の大きさが、接続性の変化を反映すると考える。以下、一般的な最短経路のアルゴリズム[9][23]を2つ紹介する。

2.3.1 ダイクストラアルゴリズム

ダイクストラのアルゴリズムは、グラフを通る経路を一つ一つ生成し、全体のコストが最も低くなる経路を選択する経路探索アルゴリズム[9]である。

これは、グラフの各ノードに対して、開始ノードから始まり、終了ノードに到達するまで、繰り返し距離を計算することで動作する。反復ごとに「現在のノード」が存在し、そこから到達可能なすべてのノードに対して新しいベストスコアを計算する。

Dijkstra のアルゴリズムの擬似コード。

```
void Dijkstra(G, d[], s)
```

```
{
```

初期化。

```
for(loop n回)
```

```
{
```

$u = d[u]$ を最小化する頂点のうち、まだ訪問していない頂点のラベル。

u を訪問済みとしてマークする。

```
for( $u$  から到達可能な全ての頂点)
```

```
{
```

if(v が訪問されていない && s が v に到達するために u

を中間地点として使用すると $d[v]$ が良くなる)

$d[v]$ を最適化する;}}

2.3.2 フロイド・ウォーシャル・アルゴリズム

フロイドのアルゴリズムは、シングルソースの最短経路アルゴリズムであるダイクストラアルゴリズムとは異なり、グラフ内の任意の 2 点への最短経路を求めることができ、グラフ内に負の重みを持つエッジが存在しても構わないというものである[23]。

フロイドアルゴリズムは、与えられた重み付きグラフ（有向グラフと無向グラフの両方が可能）において、複数のソースポイント間の最短経路を動的計画法の考え方をを用いて求めるアルゴリズムである。考え方は簡単で、2 点間の最短距離は、現在の 2 点間の距離と中間ノード導入後の距離の最短となるので、フロイドアルゴリズムの状態遷移方程式[23]は次のように表すことができる。

$$d[i][j] = \min(d[i][j], d[i][k] + d[k][j])$$

したがって、グラフの頂点間の距離の行列を保持するだけでよく、初期状態における直接接続された各頂点のペアの距離は、それらの間のエッジの重みとなる。グラフ内の他の点を順次中間頂点として導入することで、状態遷移式に従って距離行列が連続的に更新される。フロイドのアルゴリズムの擬似コード[18]は以下の通りある。

Floyd のアルゴリズムの擬似コード。

```
public static void main(String[] args) {  
  
    // グラフの頂点の数  
  
    int V = n;  
  
    // グラフの隣接行列を初期化結果として直接コピーすることができる。  
  
    int[][] d = new int[V][V];  
    for (int v = 0; v < V; v++) {  
        for (int i = 0; i < V; i++) {  
            for (int j = 0; j < V; j++) {  
  
                // 状態遷移の式  
  
                d[i][j] = Math.min(d[i][j], d[i][v] + d[v][j]);  
            }  
        }  
    }  
}
```

第3章 分析手法

本章では、リスクマトリックスと最短経路を用いて各災害前後の列車運行状況の変化や他駅への最短時間の変化から、中国高速鉄道ネットワークの脆弱性を分析するための手法について述べる。3.1項では、中国高速鉄道ネットワークのモデルの構築について述べる。3.2項では中国高速鉄道ネットワークの自然災害リスク評価について説明する。3.3項では中国高速鉄道の災害図の可視化について述べる。

3.1 中国高速鉄道ネットワークのモデル構築手法

現実の世界には数多くの複雑なシステムが存在し、ネットワークを用いて記述することができる。具体的なネットワークは、多数のノードと2つのノード間を結ぶリンクとして抽象化することができる。例えば、各ノードは実生活における個人を表し、ノード間のリンクは個人間のつながりを表す。他にも、インターネット上の人と人との関係（ソーシャルネットワーク）、コンピュータのページ間のハイパーリンク（WWW）、神経回路（ニューラルネットワーク）、都市の交通など（トランスポートネットワーク）を表現するのに用いることができる。鉄道網の場合、移動するさまざまな駅をノードとして表現する。2つの駅を結ぶ線路はリンクとして表現される。このように、高速鉄道ネットワークは、移動する駅と駅間の路線の複雑なネットワークと見なすことができる。中国高速鉄道の運行図[10]を以下に示す。



図 3.1：中国高速鉄道の運行図 [10]より転載

3.1.1 基本データ

中国高速鉄道ネットワーク図の作成に使用した鉄道データは、列車情報、駅位置（緯度・経度）、列車運行ルートなどが記載された商販の全国鉄道駅表[12]と列車ダイヤ[12]から取得した。需要データの抽出は次のような流れで行った。

- (1) 列車コード：列車コードが異なれば列車の種類も異なり、列車の種類によって速度も異なり、走行ルートも異なる。高速鉄道路線を走る高速列車の駅位置情報として、C（インターシティ列車）、D（ダイナミック列車）、G（高速列車）で始まるコード [12] を選択する。
- (2) 運行ルート情報：高速鉄道の駅間の接続は、列車の時刻表から得ることができる[12]。
- (3) (1)で得られた局の緯度経度情報を（0、1）範囲の平面座標に正規化し、ネットワークマップを作成する。

3.1.2 ネットワークモデルの構築とその可視化

中国における高速鉄道網の建設には、以下のような前提がある。

- (1) 高速鉄道網を無向ネットワークとして抽象化する。
- (2) 同一都市内の異なる鉄道駅を1つのノードに集約する。例えば、上海には上海駅、虹橋駅、上海南駅の3つの主要鉄道駅があるが、これを1つの駅に置き換える。
- (3) ネットワーク図中のノード次数が1のノードは、このノードと他のノードとの間に互いの影響を妨げない代替パス、すなわち非交差経路が存在しないため、すべて削除する。
- (4) 上記と同じ理由により2つのノードの間の次数2のノードを省略する

3.2 中国高速鉄道ネットワークの自然災害リスク評価手法

自然界にさらされる交通機関である鉄道構造物は、自然災害の脅威に対して非常に脆弱である。鉄道運行に主に影響を与える様々な自然災害のリスクレベルは、自然災害リスクネットワーク下のリンクの信頼性のレベルを決定し、その結果、さらなる自然災害の脆弱性分析を実施するために使用される

3.2.1 自然災害による鉄道の主なリスクタイプ

過去の鉄道事故や高速鉄道施設の自然災害への曝露状況を把握することで、鉄道が脆弱な自然災害の種類を特定することができる。鉄道事故災害データセット[13]の解析から、鉄道事故を引き起こす主な災害は、強風、豪雨、雪などの気象災害と地震による地質災害であることが知られている。事故は降雨によるものが最も多いが、その影響は高速鉄道の速度を低下させるものがほとんどある。地震や台風による事故は少ないが、これらの災害による被害はより広範囲で、大きなものとなっている[13]。

3.2.2 災害基礎データ

研究対象の曝露危険箇所が選定されると、リスク評価と分析、ネットワーク図の構築と可視化のためのデータが取得される。

本モジュールで使用する気候・災害データは、全国降水量（2000-2010）、中国におけるマグニチュード5以上の地震カタログ、過去の台風観測（1945-2020）、マグニチュード5以上の地震カタログ（1949-2019）、吹雪の年表（1949-2005）です。気象観測データセットは、中国気象局国家気象情報センターが提供しており、以下のサイトでオンライン公開されている：<http://data.cma.cn/> および中国科学院資源環境科学データセンター (<https://www.resdc.cn/>) で入手可能

である。

3.2.3 中国高速鉄道路線速度データ

標準速度が異なり、自然災害に対する感度が運転速度の違いによって異なることが明らかである[14]。したがって、高速鉄道路線一覧[15]から路線速度情報を取得することは、災害リスク評価の一助となる。高速鉄道の設計速度の一般的な速度区分は表 3.1 に示す。

設計速度	ライン例
200km/h	宝溪鉄道
250km/h	南京鉄道、銀蘭急行鉄道
300km/h	成貴線
350km/h	北京-上海回廊（但し、杭州との支線は除く）、北京張家口インティ

表 3.1 中国高速鉄道の設計速度の分類表

3.2.4 中国高速鉄道運行の危険度分類基準

中国の高速鉄道の運行における気象災害（強風、豪雪、豪雨）の分類は、（高速鉄道の運行に影響を与える気象条件の分類）及び（高速鉄道技術規則）[24]に基づいている。地質災害については、「高速鉄道の地震後の応急処置に関する暫定規定」[19]を参照した。高速鉄道の運行に関わる災害対策基準引用を下表に示す。

ハザードの種類	指標	基準	高速鉄道の運行に与える影響
地震	マグニチュード (M)	$4.0 > M > 3.0$	震源地から 20km 以内の鉄道が被災区間となります。速度制限のある区間。
		$5.0 > M > 4.0$	震源地から 50km 以内の鉄道を被災区間とする。震源地から 25km 以内の鉄道は遮断区間（検査列車が通行可能）、それ以外の区間は速度制限区間。
		$6.0 > M > 5.0$	震源地から 100km 以内の鉄道が被災区間となる。震源地から 50km 以内の鉄道は閉鎖（検査列車の進入は可能）、それ以外の区間は速度制限を行う。
		$7.0 > M > 6.0$	震源地から 100km 以内の鉄道が被災区間となります。震源地から 50km 以内の鉄道は閉鎖（検査

列車の進入は可能)、それ以外の区間は速度制限を行う。

$M > 7.0$ 震源地から 600km 以内の鉄道を被災区間とします。この区間はブロック化されています(検査列車は震源地から 100km 離れたブロック化された区間に入ることができます)。

強 瞬時風 風速(V) $V < 20 \text{ m/s}$ 平常運転

$20 \leq V < 25 \text{ m/s}$ 軽度な影響、制限速度時速 300km

$25 \leq V < 30 \text{ m/s}$ 中程度の影響、制限速度時速 200km

$30 \leq V < 35 \text{ m/s}$ 厳しい衝撃、制限速度時速 120 km

$V \geq 35 \text{ m/s}$ 危険な状況、サービス停止

暴 1 時間 雨 あたり
の降水
量 (R) $R < 20 \text{ mm}$ 平常運転

$20 \leq R < 45 \text{ mm}$ 中程度の衝撃、制限速度は時速 200km

$45 \leq R < 60 \text{ mm}$ 重大なレベルの影響、制限速度は時速 160km

$60 \text{ mm} < R < 80 \text{ mm}$ 重大な衝撃、制限速度時速 80 km

$R \geq 80 \text{ mm}$ 危険な状況、サービス停止

大 雪の深 雪 さ (H) $H < 3 \text{ cm}$ 平常運転
北緯 35
度以南
に適用

$3 \leq H < 10 \text{ cm}$ 中程度の軽度レベルの衝撃、制限速度は時速 250 km 衝撃、制限速度は時速 200km

$10 \leq H < 10 \text{ cm}$ 中程度の衝撃、制限速度は時速 200km

20 cm

$20 \leq H <$ シビアレベルの衝撃、制限速度時速 160 km

30 cm

$H \geq 30$ 臨界レベルの衝撃、サービス停止

cm

雪の深 $H < 3$ cm 平常運転

さ (H)

北緯 35

度以北

に適用

$3 \leq H < 5$ 軽度レベルの衝撃、制限速度は時速 200km

cm

$5 \leq H <$ 中程度の影響、制限速度は時速 160km

20 cm

$20 \leq H <$ シビアレベルの衝撃、制限速度時速 120 km

30 cm

$H \geq 30$ 臨界レベルの衝撃、サービス停止

cm

表 3.2 高速鉄道災害対策基準 [19][24]より転載

3.2.5 リスクマトリックスによる災害リスクレベルの設定

リスクは通常、ある事象の結果とそれに関連する発生の可能性の組み合わせとして表現される[16]。前節から、自然災害のデータを使って自然災害の発生にハザードクラスを割り当てることができ、高速鉄道の運転速度から事故の可能性を離散的に分類できる。そこで、本論文では、リスクマトリクス・モデリング手法を用い、下表 3.3 のような中国高速鉄道網のリスク評価モデルを構築した。

Risk level	鉄道のスピードクラス			
	200km/h	250km/h	300km/h	350km/h
Hazard level				

表 3.3 高速鉄道災害リスク評価モデル

表 3.3 の離散的な結果から、瞬間風速 (V)、1 時間あたりの降水量 (R)、マグニ

チュード (M) など、異なるリスク属性をハザードクラス分類の各ペアに割り当てることができる。高速鉄道の設計速度は4種類あり、リスク分類がN種類あれば、 $N \times 4$ 種類の個別の危険度分類を区別することが可能である。個別のリスクカテゴリーを様々な組み合わせることで、下表 3.4 のように3つの結果を定義する。

ラインリスク評価	離散リスクマトリクスを組み合わせた結果
災害のリスクが低い	自然災害は、地域の運営や移動速度に影響を与えない
破損の可能性あり、強い衝撃の可能性は低い	列車の速度に影響を与える地域ごとの運行規制があります
破損の危険性が非常に高い、強い衝撃が発生する可能性がある	列車の停止、線路区域への立ち入りの禁止

表 3.4 高速鉄道災害リスク評価表

3.3 中国の鉄道災害リスクマップの可視化

前節の中国の自然災害データを基ついで、Baidu Maps API[27]を利用して、Pythonで鉄道災害リスクマップを作成した。以下は降雨ハザードリスクの可視化プロセスを例に、リスクマップの作成プロセスを紹介する。

まず、下図 3.2 のような気象観測所の位置情報（地理的名称と緯度経度）と雨量データといった雨量関連データ[25]を読み込む必要がある。

	経度	緯度	深度	震級MS	新しい震源地参照地名
地震発生時のモーメント					
1949-01-04 02:11:22	82.50	42.50	0.0	5.25	新疆阿克苏地区拜城县
1949-01-05 11:14:00	121.00	33.20	0.0	5.00	南黄海
1949-01-14 10:17:45	121.00	33.20	0.0	5.75	南黄海
1949-01-19 21:38:20	121.80	23.80	0.0	5.75	台湾花莲东南海域
1949-01-19 23:00:00	121.80	23.80	-999.0	6.50	台湾花莲东南海域
...
2019-10-12 22:55:26	110.52	22.16	10.0	5.10	广西玉林市北流市
2019-10-17 19:44:32	122.58	24.02	16.0	5.10	台湾花莲东海域
2019-10-27 13:29:46	78.82	41.21	11.0	5.00	新疆阿克苏地区乌什县
2019-10-28 01:56:49	102.69	35.10	10.0	5.70	甘肃甘南州夏河县
2019-11-25 09:18:19	106.65	22.89	10.0	5.20	广西百色市靖西市

図 3.2 降雨データ

データを読み込んだら、緯度・経度を基準にして位置情報を地図上にマッピング

する必要がある。ここでは、POI を含む中国の地理データの高速更新、位置情報検索、交通経路情報などの理由から、地図可視化情報プラットフォームとして Baidu Maps を選択した。可視化結果を下図 3.3 に示す。図中の波形の点は気象データ観測地点を表し、クリックすることでデータの詳細を見ることができる。そして被害の程度については、黄色から青色のグラデーションで区別している（色が濃いほど状況が深刻で、大雨による災害の危険性が高いことを示す）。

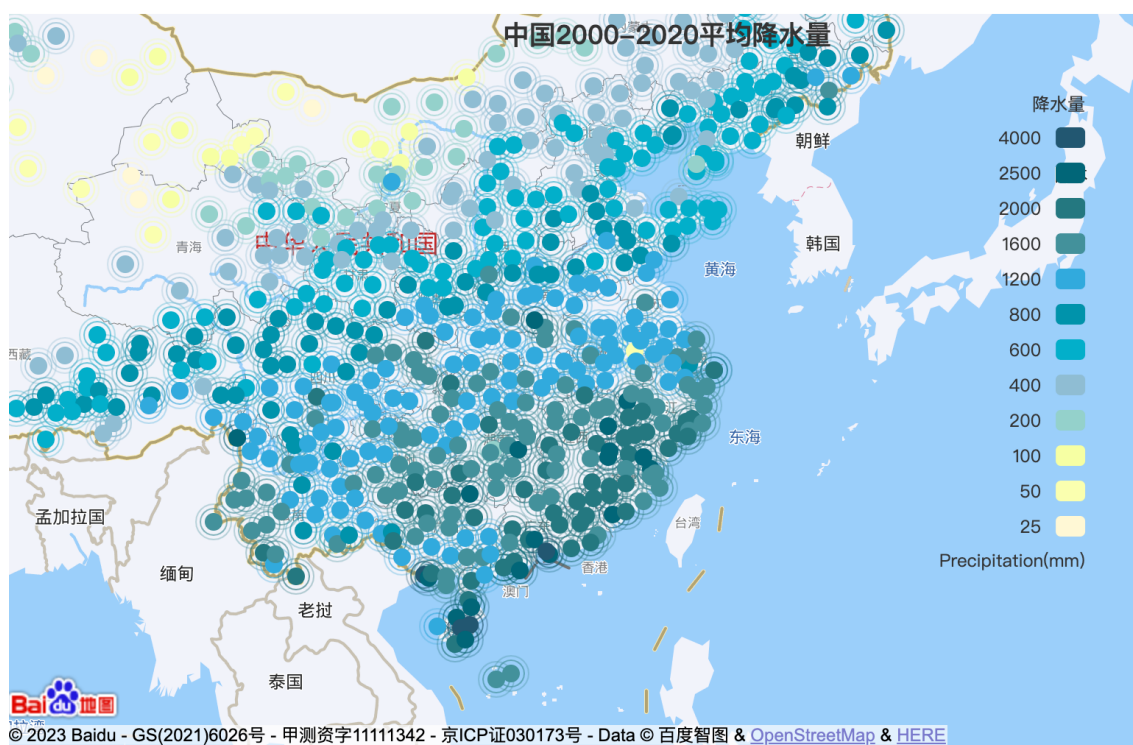


図 3.3：中国降雨災害サムネイル

同じ手法で、他のハザードのリスクマップも作成することができる。図 3.4 は台風データ[25]（一部）、図 3.5 は中国における台風危険度のサムネイルマップで、緑、黄、赤は低から高までの台風レベルの違いを示している。図 3.6 は地震ハザードデータ[26]（一部）、図 3.7 は中国における地震ハザードのサムネイルマップで、緑、黄、赤は低から高までの各レベルの地震を表している。

台風の中国語名	台風の英語名	台風発生時刻	台風終了時刻					
台風番号								
2000011	达维 DAMREY1	2000-05-05T08:00:00	2000-05-12T20:00:00					
2000012	达维 DAMREY2	2000-05-05T08:00:00	2000-05-12T20:00:00					
2000013	达维 DAMREY3	2000-05-05T08:00:00	2000-05-12T20:00:00					
2000014	达维 DAMREY4	2000-05-05T08:00:00	2000-05-12T20:00:00					
2000015	达维 DAMREY5	2000-05-05T08:00:00	2000-05-12T20:00:00					
...					
2024013	科罗旺 Krovanh32	2020-12-20T14:00:00	2020-12-21T14:00:00					
2024014	科罗旺 Krovanh33	2020-12-20T14:00:00	2020-12-21T14:00:00					
2024015	科罗旺 Krovanh34	2020-12-20T14:00:00	2020-12-21T14:00:00					
2024016	科罗旺 Krovanh35	2020-12-20T14:00:00	2020-12-21T14:00:00					
2024017	科罗旺 Krovanh36	2020-12-20T14:00:00	2020-12-21T14:00:00					
台風番号	現在の台風時刻	経度	緯度	台風の強さ	台風レベル	風速	空気圧	移動の方向
2000011	2000-05-05T08:00:00	136.0	9.6	热带低压TD)	7.0 15.0	1004.0	NaN	
2000012	2000-05-05T14:00:00	135.0	9.9	热带低压TD)	7.0 15.0	1004.0	NaN	
2000013	2000-05-05T20:00:00	134.4	10.2	热带低压TD)	7.0 15.0	1004.0	NaN	
2000014	2000-05-06T02:00:00	133.7	10.7	热带低压TD)	7.0 15.0	1002.0	NaN	
2000015	2000-05-06T08:00:00	133.0	11.1	热带低压TD)	7.0 15.0	1002.0	NaN	
...
2024013	2020-12-21T10:00:00	113.2	9.2	热带风暴TS)	8.0 18.0	1000.0	西西北	
2024014	2020-12-21T11:00:00	113.2	9.2	热带风暴TS)	8.0 18.0	1000.0	西西南	
2024015	2020-12-21T12:00:00	113.2	9.2	热带风暴TS)	8.0 18.0	1000.0	西西南	
...								

図 3.4 台風データ

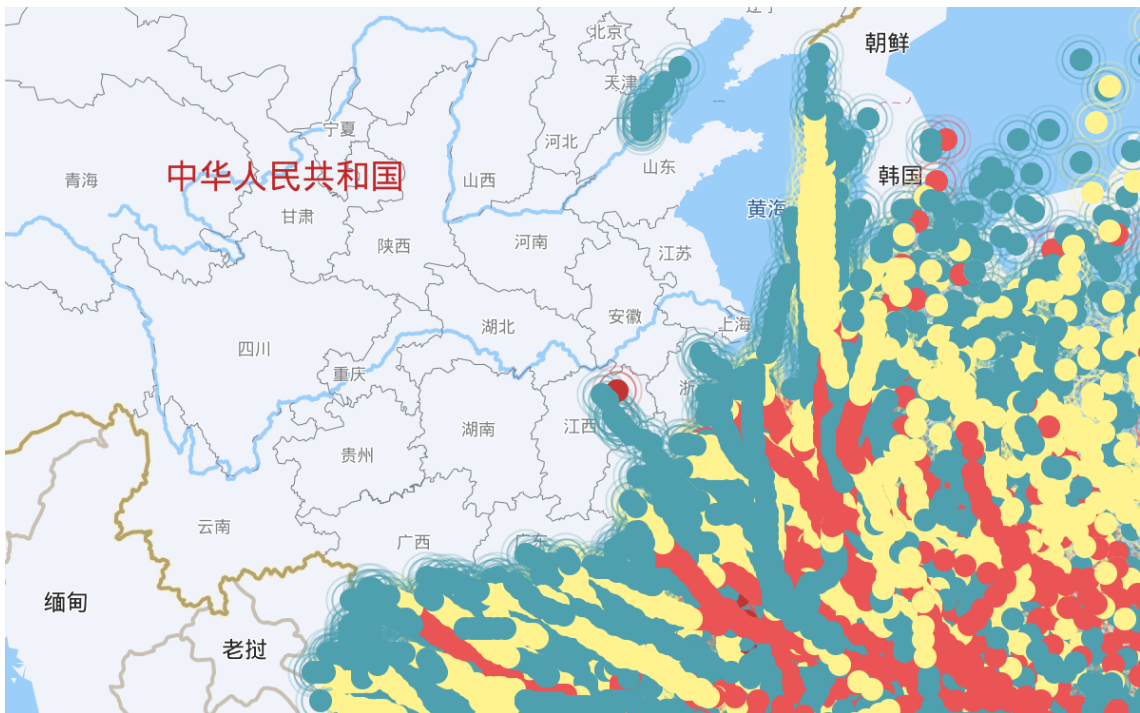


図 3.4：中国台風災害サムネイル

地震発生時のモーメント	経度	緯度	深度	震級MS	新しい震源地参照地名
1949-01-04 02:11:22	82.50	42.50	0.0	5.25	新疆阿克苏地区拜城县
1949-01-05 11:14:00	121.00	33.20	0.0	5.00	南黄海
1949-01-14 10:17:45	121.00	33.20	0.0	5.75	南黄海
1949-01-19 21:38:20	121.80	23.80	0.0	5.75	台湾花莲东南海域
1949-01-19 23:00:00	121.80	23.80	-999.0	6.50	台湾花莲东南海域
...
2019-10-12 22:55:26	110.52	22.16	10.0	5.10	广西玉林市北流市
2019-10-17 19:44:32	122.58	24.02	16.0	5.10	台湾花莲东海域
2019-10-27 13:29:46	78.82	41.21	11.0	5.00	新疆阿克苏地区乌什县
2019-10-28 01:56:49	102.69	35.10	10.0	5.70	甘肃甘南州夏河县
2019-11-25 09:18:19	106.65	22.89	10.0	5.20	广西百色市靖西市

図 3.6 地震データ



図 3.7：中国地震災害サムネイル

上記のリスクマップに加え、雪害の頻度、砂塵嵐のリスクなど、中国自然災害リスク地図集[20]の一部を参照した。この参照先は付録 D に示す。

第4章 実験・評価

本章では、2章、3章で説明した実験方法とデータ解析の結果を示す。4.1は中国高速鉄道ネットワークの可視化、4.2は降雨災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性評価、4.3は強風災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性評価、4.4は豪雪災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性評価、4.5は地震災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性評価、4.6はそれぞれの脆弱性評価分析結果を分析結果一覧表で示す。

4.1 中国高速鉄道ネットワークの可視化

4.1.1 中国高速鉄道ネットワークの可視化

中国の高速鉄道網は、ノード数 85、リンク数 146 の Pajek [17] を用いて 3.2 節の手法で可視化される。その結果を下図 4.1 に示す。

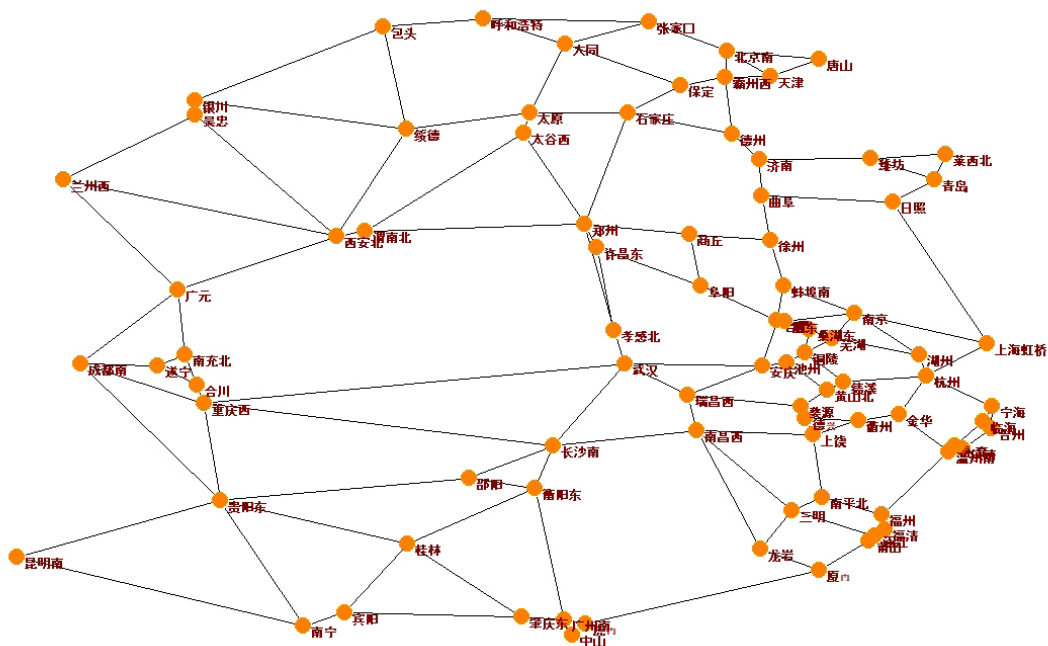


図 4.1：中国高速鉄道ネットワーク

全ノード間の非交差経路を行列式で計算できるようにするため、下図 4.2 のように各ノードの隣接ノードの前にダミーノードを追加している。計算手法と結果を付録 A に示す。

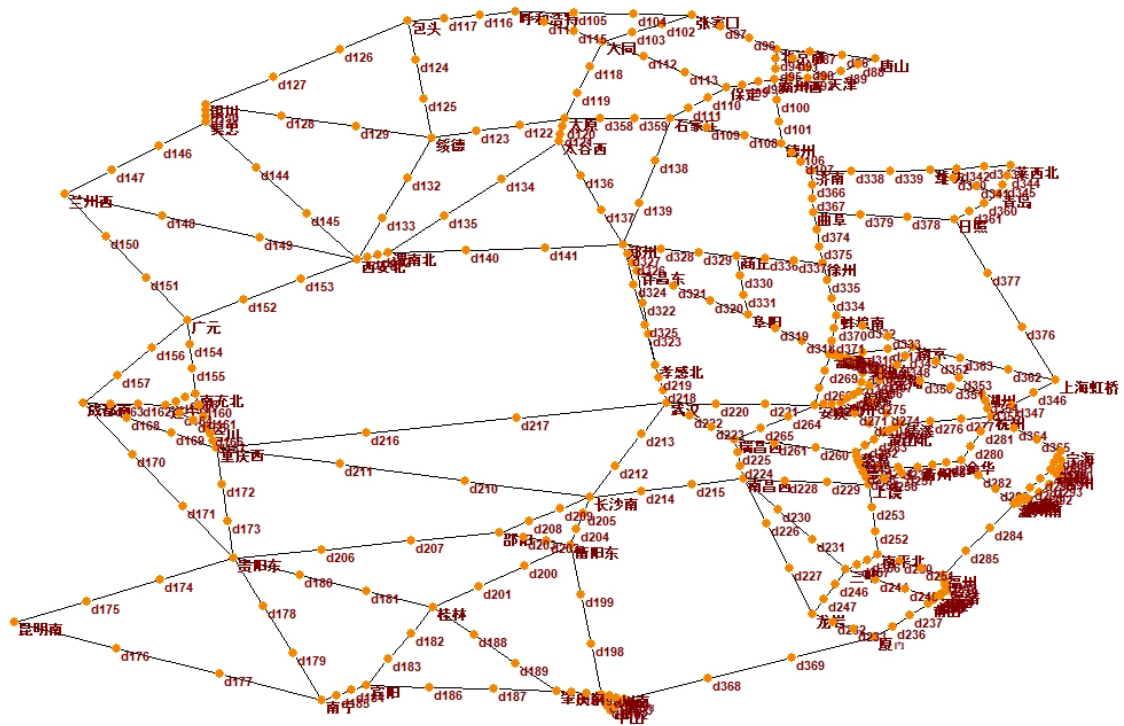


図 4.2：ダミーノットを付けるネットワーク

高速鉄道の自然災害によるリスクを分析する際には、路線の速度を考慮する必要があり、中国の高速鉄道では、路線の設計運転速度の違いから、以下図 4.3 は速度別路線分布図が作成される。

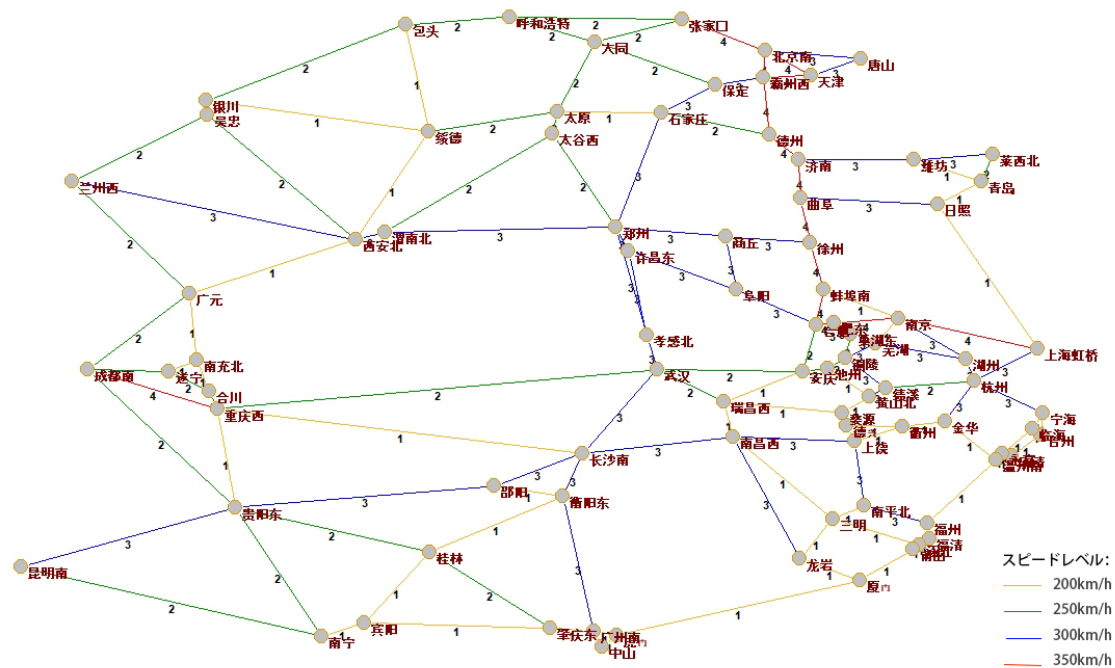


図 4.3：中国高速鉄道スピード分布図

中国の高速鉄道の最短経路を計算するためには、各路線リンクに所用時間の重みをつける必要がある。列車運行予定表[12]とチケット販売サイト (www.12306.cn) から提供された列車運行時間データを用いて路線に重みをつけると、下図 4.4 のようなネットワーク図が得られる (路線の数字は分単位である)。

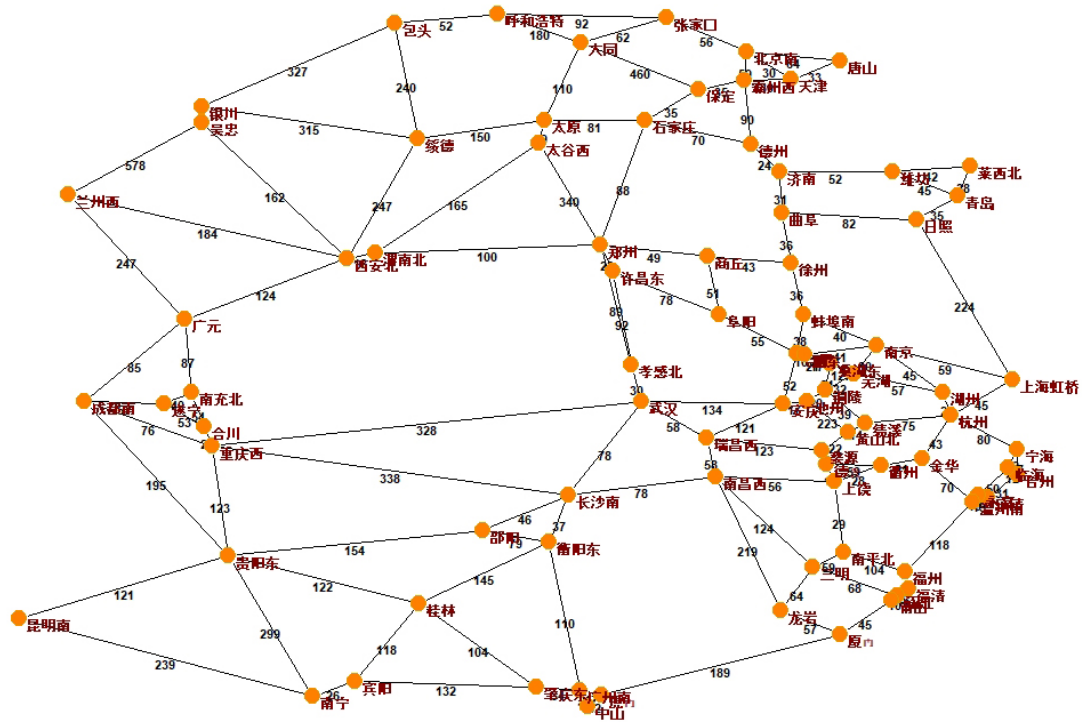


図 4.4 : 重み (時間) をつけの線路図

4.1.2 中国高速鉄道の駅間最短経路の算出結果

2.3.2 項の、フロイド最短経路計算法[18]を用いると、以下の図 4.6 は全駅間の最短経路計算表の一部 (全テーブルの結果は付録の表 B に詳述されている) として、その計算結果は待ち時間を除く経路の移動時間 (単位は min) で定義される。

s \ t	台州	上海虹桥	临海	乐清	永嘉	温州南	莱西北	青岛
宁海	27	125	22	58	68	73	383	375
台州	\	152	12	31	41	46	410	402
上海虹桥	\	\	147	173	168	158	296	259
临海	\	\	\	43	50	58	405	397
乐清	\	\	\	\	10	15	431	423
永嘉	\	\	\	\	\	10	426	418

図 4.6 中国高速鉄道路ネットワークの最短経路の計算表 (一部)

4.2 降雨災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性分析

4.2.1 中国高速鉄道運用のための降雨リスクマップ

3.3 節の手法を用いると、以下の図 4.7 のように、中国の高速鉄道が降雨災害の影響を受けるリスクを可視化することができる。

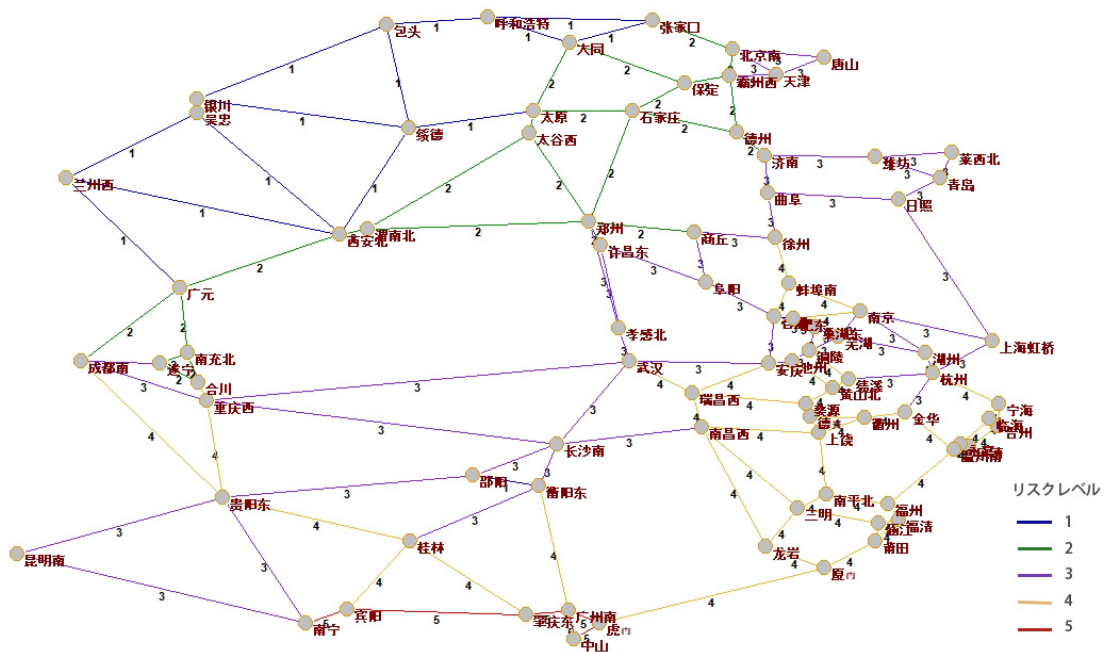


図 4.7：降雨災害リスクマップ

4.2.2 中国高速鉄道運用のための降雨リスク評価

赤い線で覆われた地域では、高速鉄道が降雨ハザードの影響を受ける確率が非常に高いため、それぞれの高リスク地域は通行不能地域（つまり 2 点間のつながりが断たれている）として個別に分析される。（但し、ハザードが脆弱地域全体に同時に影響を与える確率は非常に低く、データによる裏付けはありません）。新しい最短経路表のデータは、元の最短経路表とは別に、経路が通れない場合の迂回経路の移動時間の増加分である差分 Δt を求め、その影響の大きさや程度は経路の脆弱性をある程度反映している。分析結果を以下に示す。カテゴリ分析図では、赤い線が被災前の最短ルート、緑の線が被災後に変更された最短ルート、折れ線が被災の影響を受けて中断されたルートを表している。

(1) 割り込む線路：広州南-虎門

ケース 1: 時間増加 62min

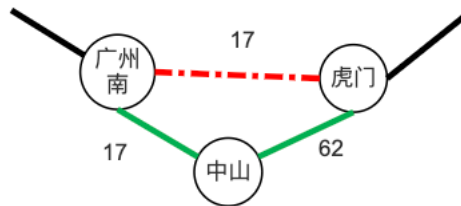
対象ライン：

虎门---上海虹桥 莱西北 青岛 杭州 湖州 阜阳 金华 淮 坊
 衢州 南京 芜湖 黄山北 南平北 唐山 上饶 巢湖东 德 兴
 铜陵 婺源 池州 蚌埠南 合肥 天津 徐州 安庆 北 京 南
 霸州西 南昌西 商丘 瑞昌西 武汉 孝感北 许昌东
 广州南 长沙南 衡阳东 太谷西 肇庆东 邵阳 吴忠 桂林 渭 南 北
 西安北 宾阳 南宁 贵阳东 重庆西 合川 南充北 广元 成 都 南
 兰州西 昆明南 张家口 大同 呼和浩特 包头 绥德 遂 宁
 银川 肥东 保定 德州 石家庄 太原 济南 绩溪 曲 阜
 日照 郑州

福州 涵江 莆田 厦门 龙岩 福清---广州南 肇庆东
 宾阳 南宁

厦门---广州南 长沙南 衡阳东 太谷西 肇庆东 邵阳 吴忠 桂 林
 渭南北 西安北 宾阳 南宁

カテゴリー分析図：

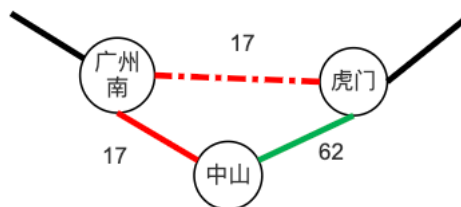


ケース 2: 時間増加 28min

対象ライン：

中山---福清 福州 涵江 莆田 厦门 龙岩 虎门

カテゴリー分析図：

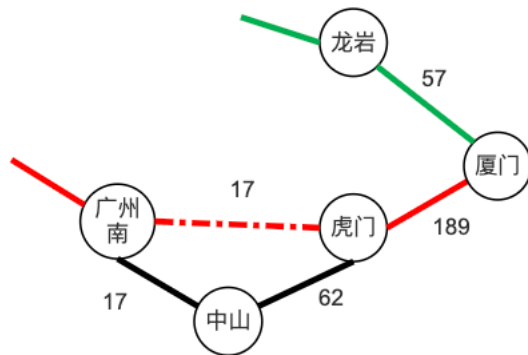


ケース 3: 時間増加 57min

対象ライン：

厦门---贵阳东 重庆西 合川 南充北 成都南 昆明南 遂宁

カテゴリー分析図：

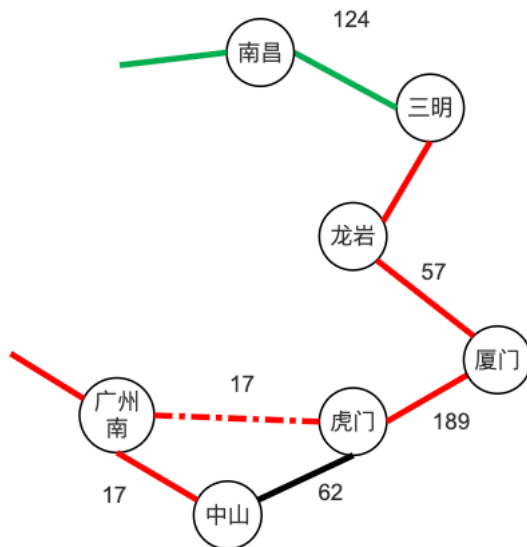


ケース 4: 時間増加 22min

対象ライン:

三明---中山 广州南 肇庆东

カテゴリー分析図:



ケース 5: 時間増加 44min

対象ライン:

厦内---衡阳

カテゴリー分析図:

ケース 6: 時間増加 55min

対象ライン:

福清---桂林

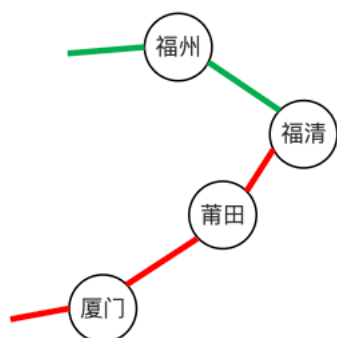
カテゴリー分析図:

ケース 7: 時間増加 27min

対象ライン:

福州---桂林

カテゴリー分析図:

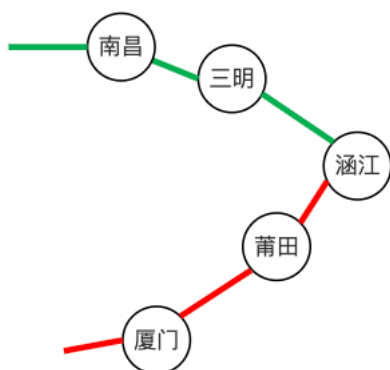


ケース 8: 時間増加 53min

対象ライン:

涵江---桂林

カテゴリー分析図:

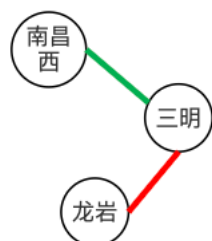


ケース 9: 時間増加 9min

対象ライン:

三明---宾阳 南宁

カテゴリー分析図:



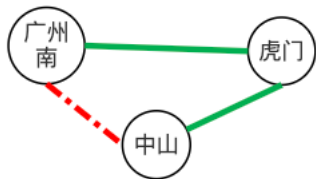
(2) 割り込む線路：虎門---中山
 ネットワーク図の最短経路は変更されていない。

(3) 割り込む線路：中山---广州南

ケース 1: 時間増加 62min

対象ライン：中山---广州南 长沙南 衡阳东 太谷西 肇庆东 邵 阳
 吴忠 桂林 渭南北 西安北 宾阳 南宁 贵阳东 重庆西 合 川
 南充北 广元 成都南 兰州西 昆明南 张家口 大同 呼 和 浩 特
 包头 绥德 遂宁 银川 肥东 保定 德州 石家庄 太 原
 济南 绩溪 曲阜 日照 上海虹桥 莱西北 青岛 杭 州
 湖州 阜阳 金华 潍坊 衢州 南京 芜湖 黄山北 南 平 北
 唐山 上饶 巢湖东 德兴 铜陵 婺源 池州 蚌埠南 合 肥
 天津 徐州 安庆 北京南 霸州西 南昌西 商丘 瑞昌西 武 汉
 孝感北 许昌东

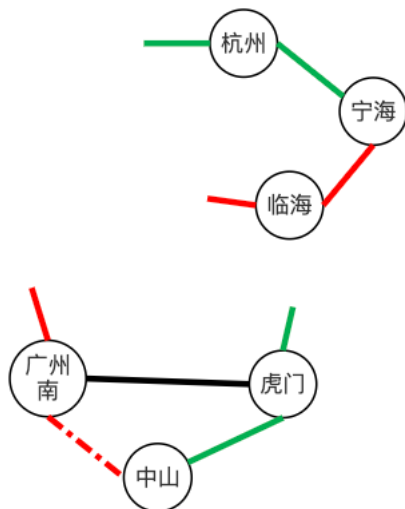
カテゴリ分析図：



ケース 2: 時間増加 50min

対象ライン：中山---宁海

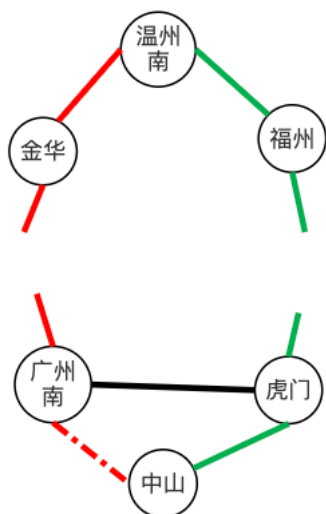
カテゴリ分析図：



ケース 3: 時間増加 30min

対象ライン：中山---台州 临海 乐清 永嘉 温州南

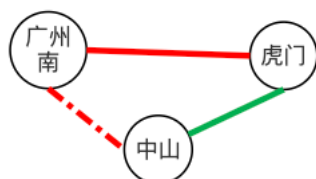
カテゴリー分析図：



ケース 4: 時間増加 28min

対象ライン：中山---福清 福州 涵江 莆田 厦门 三明
龙岩 虎门

カテゴリー分析図：

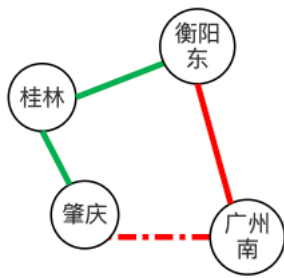


(4) 割り込む線路：肇庆东---广州南

ケース 1: 時間増加 105min

対象ライン：肇庆东---宁海 台州 上海虹桥 临海 乐 清
永嘉 温州南 莱西北 青岛 杭州 湖州 阜阳 金华 潍 坊
衢州 南京 芜湖 黄山北 南平北 唐山 上饶 巢湖东 德 兴
铜陵 婺源 池州 蚌埠南 合肥 天津 徐州 安庆 北 京 南
霸州西 南昌西 商丘 瑞昌西 武汉 孝感北 许昌东 郑 州 邵 阳
吴忠 渭南北 西安北 张家口 大同 呼和浩特 包 头 绥 德
银川 肥东 保定 德州 石家庄 太原 济南 绩溪 曲 阜
日照

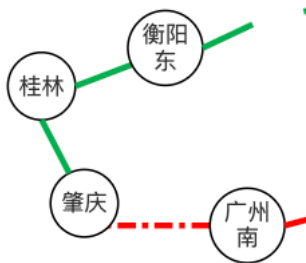
カテゴリー分析図：



ケース 2: 時間増加 325min

対象ライン: 肇庆东---厦门 虎门 中山 广州南

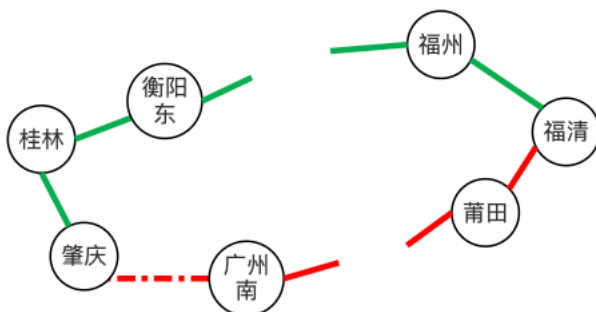
カテゴリ分析図:



ケース 3: 時間増加 263min

対象ライン: 肇庆东---福清

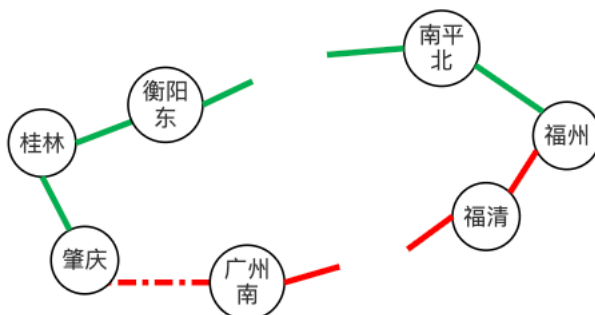
カテゴリ分析図:



ケース 4: 時間増加 235min

対象ライン: 肇庆东---福州

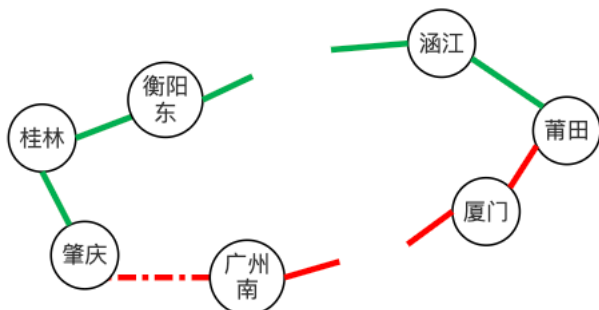
カテゴリ分析図:



ケース 5: 時間増加 281min

対象ライン：肇庆东---莆田

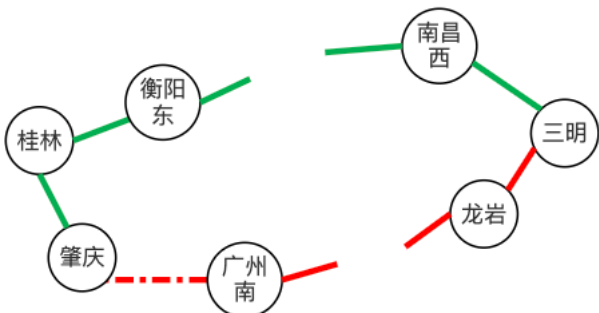
カテゴリー分析図：



ケース 6: 時間増加 127min

対象ライン：肇庆东---三明

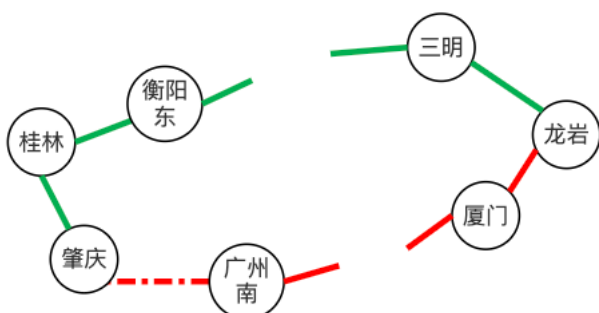
カテゴリー分析図：



ケース 7: 時間増加 255min

対象ライン：肇庆东---龙岩

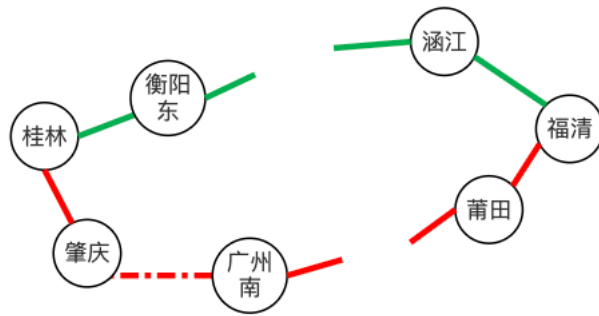
カテゴリー分析図：



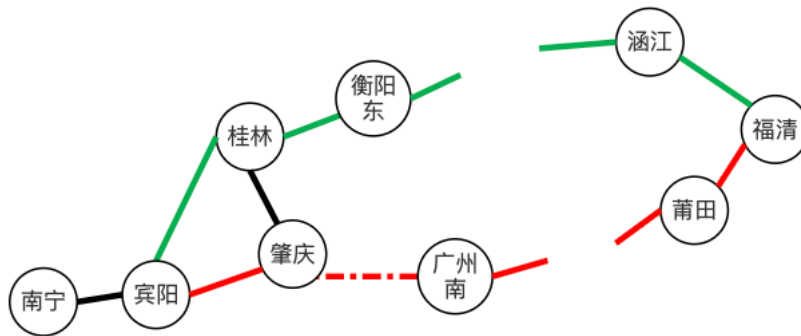
ケース 8: 時間増加 55min

対象ライン：桂林---福清

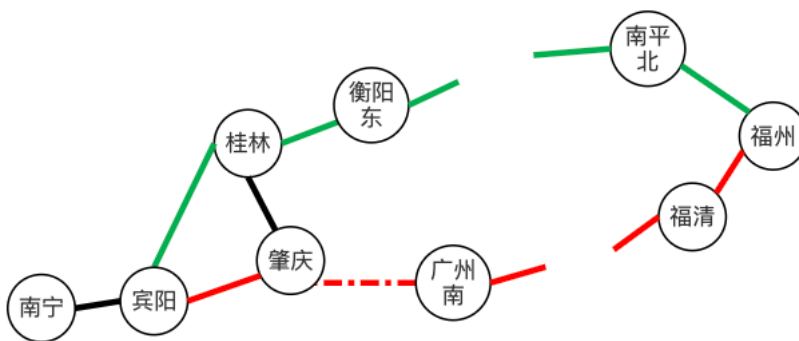
カテゴリー分析図：



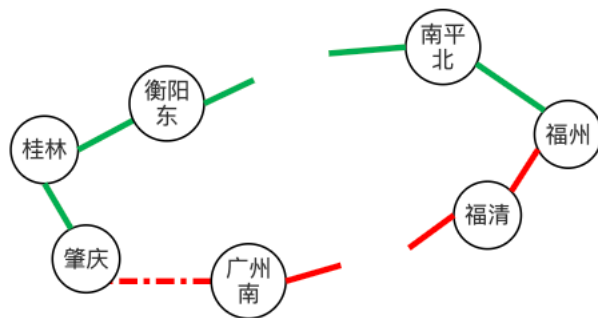
ケース 9: 時間増加 145min
 対象ライン：福清---宾阳 南宁
 カテゴリー分析図：



ケース 10: 時間増加 117min
 対象ライン：福州---宾阳 南宁
 桂林---厦门 虎门 中山 广州南
 カテゴリー分析図：



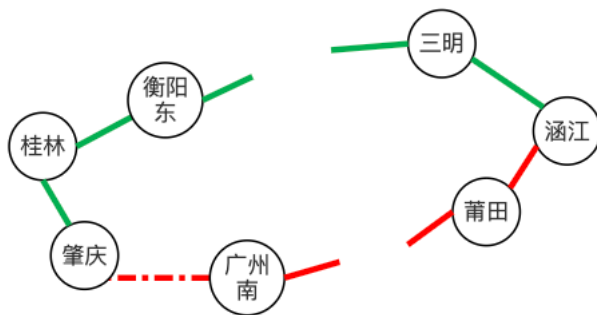
ケース 11: 時間増加 27min
 対象ライン：福州---桂林
 カテゴリー分析図：



ケース 12: 時間増加 53min

対象ライン：涵江---桂林

カテゴリ分析図：



ケース 13: 時間増加 143min

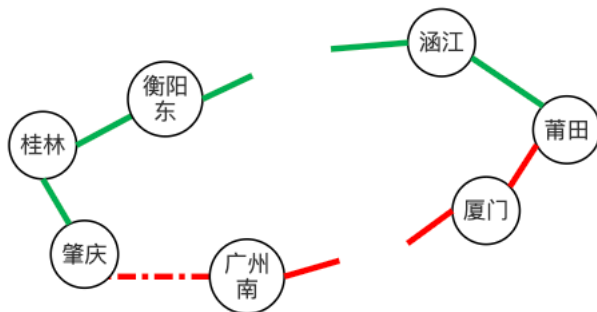
対象ライン：涵江---宾阳 南宁

カテゴリ分析図：

ケース 14: 時間増加 73min

対象ライン：莆田---桂林

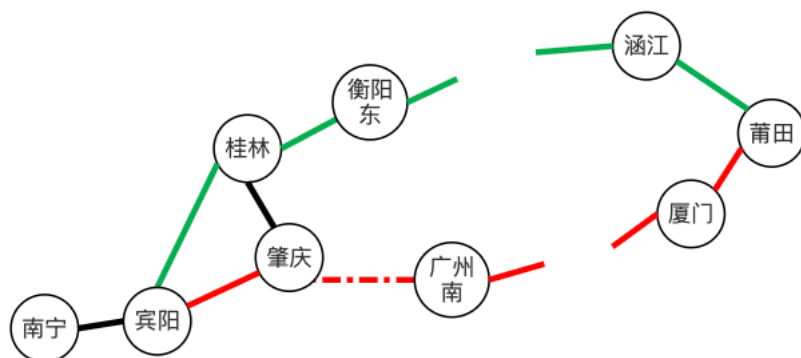
カテゴリ分析図：



ケース 15: 時間増加 163min

対象ライン：莆田---宾阳 南宁

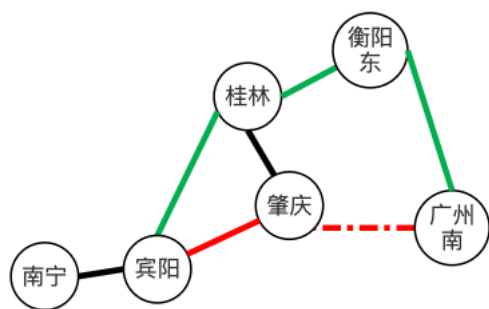
カテゴリー分析図：



ケース 16: 時間増加 207min

対象ライン：宾阳 南宁---厦门 虎门 中山 广州南

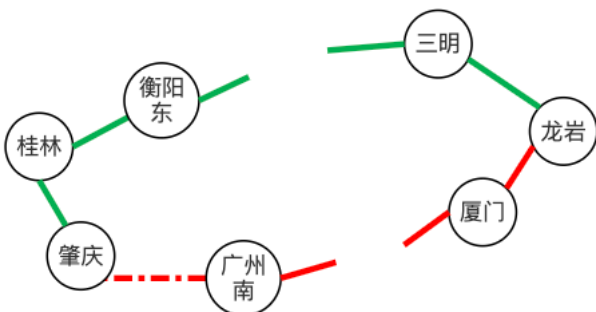
カテゴリー分析図：



ケース 17: 時間増加 57min

対象ライン：厦门---贵阳东 重庆西 合川 南充北 广元 成都南
昆明南 遂宁

カテゴリー分析図：

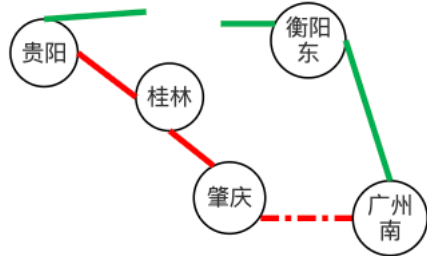


ケース 18: 時間増加 83min

対象ライン：虎门 中山 广州南---贵阳东 重庆西 合川 南充北

成都南 昆明南 遂宁

カテゴリー分析図：

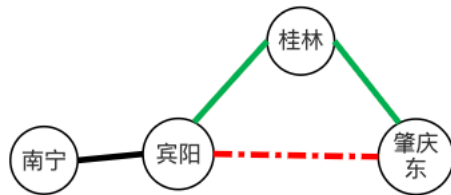


(5) 割り込む線路：肇庆东---宾阳

ケース 1: 時間増加 90min

対象ライン：宾阳 南宁---福清 福州 涵江 莆田 厦门 龙岩
虎门 中山 广州南 肇庆东

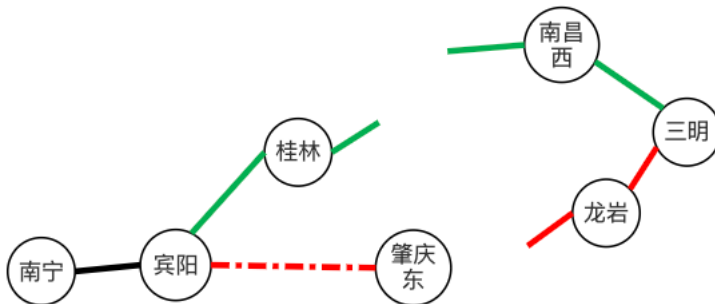
カテゴリー分析図：



ケース 2: 時間増加 9min

対象ライン：三明---宾阳 南宁

カテゴリー分析図：

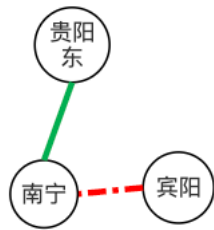


(6) 割り込む線路：南宁---宾阳

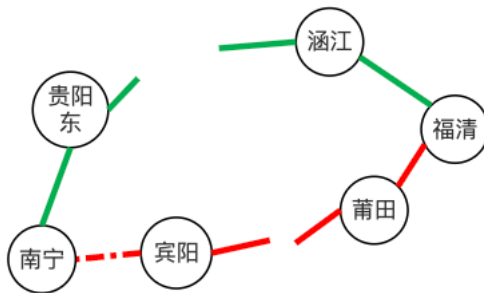
ケース 1: 時間増加 173min

対象ライン：南宁---宁海 台州 上海虹桥 临海 乐 清
永嘉 温州南 莱西北 青岛 杭州 湖州 阜阳 金华 潍 坊
衢州 南京 芜湖 黄山北 南平北 唐山 上饶 巢湖东 德 兴
铜陵 婺源 池州 蚌埠南 合肥 天津 徐州 安庆 北 京 南
霸州西 南昌西 商丘 瑞昌西 武汉 孝感北 许昌东 郑 州 长 沙 南

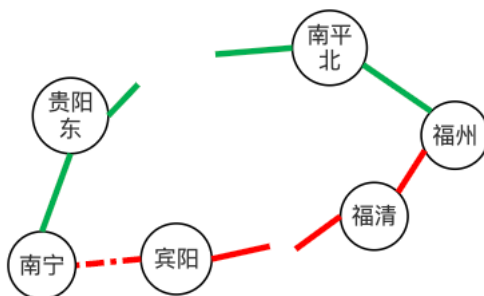
太谷西 张家口 大同 呼和浩特 包头 绥德 遂宁 银 川
 肥东 保定 德州 石家庄 太原 济南 绩溪 曲阜 日照
 カテゴリー分析図：



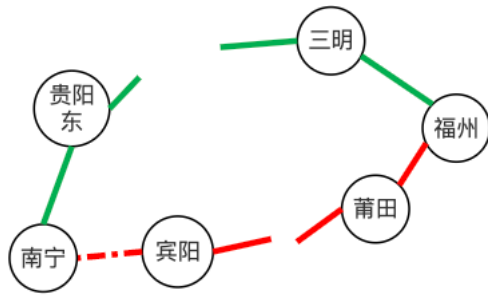
ケース 2: 時間増加 318min
 対象ライン：南宁---福清
 カテゴリー分析図：



ケース 3: 時間増加 290min
 対象ライン：南宁---福州
 カテゴリー分析図：



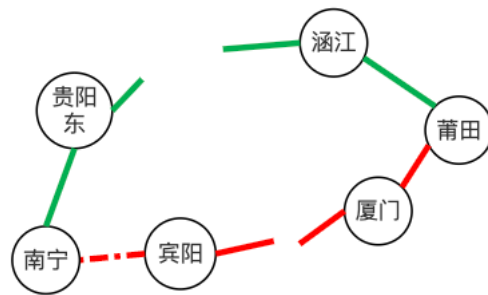
ケース 4: 時間増加 316min
 対象ライン：南宁---涵江
 カテゴリー分析図：



ケース 5: 時間増加 336min

対象ライン：南宁---莆田

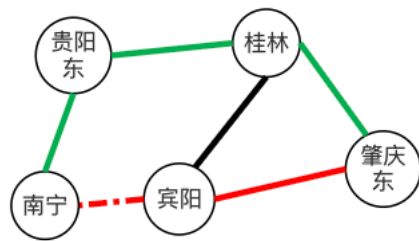
カテゴリー分析図：



ケース 6: 時間増加 367min

対象ライン：南宁---厦门 虎门 中山 广州南 肇庆东

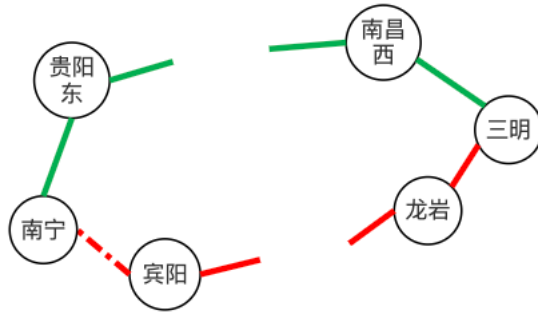
カテゴリー分析図：



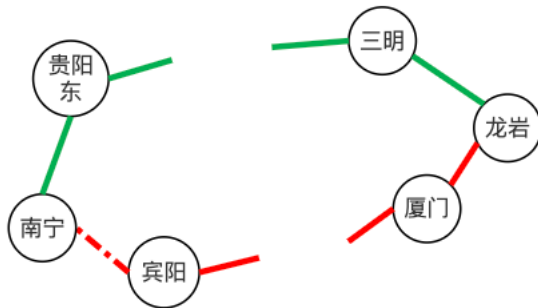
ケース 7: 時間増加 182min

対象ライン：南宁---三明

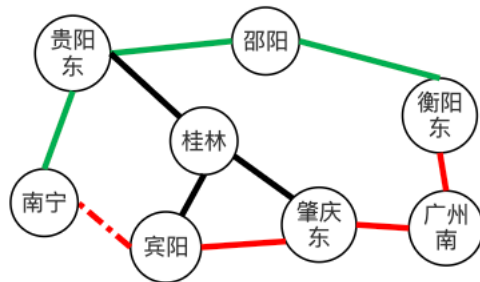
カテゴリー分析図：



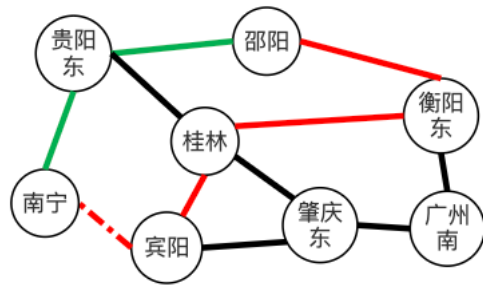
ケース 8: 時間増加 310min
 対象ライン：南宁---龙岩
 カテゴリー分析図：



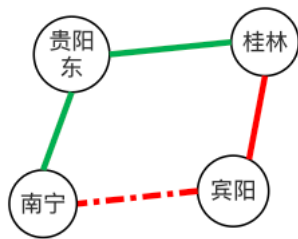
ケース 9: 時間増加 243min
 対象ライン：南宁---衡阳东
 カテゴリー分析図：



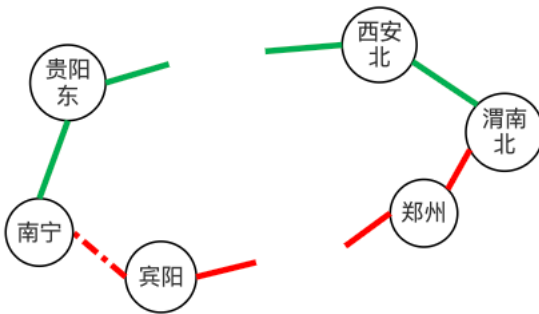
ケース 10: 時間増加 85min
 対象ライン：南宁---邵阳
 カテゴリー分析図：



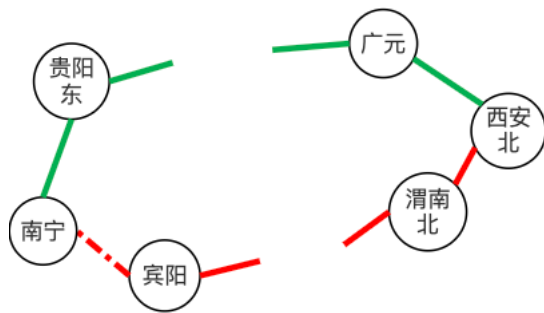
ケース 11: 時間増加 277min
 対象ライン: 南宁---桂林
 カテゴリー分析図:



ケース 12: 時間増加 98min
 対象ライン: 南宁---渭南北
 カテゴリー分析図:



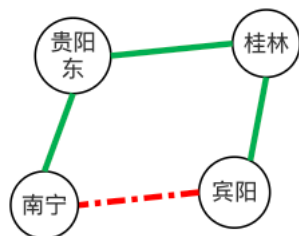
ケース 13: 時間増加 62min
 対象ライン: 南宁---西安北
 カテゴリー分析図:



ケース 14: 時間増加 513min

対象ライン: 南宁---宾阳

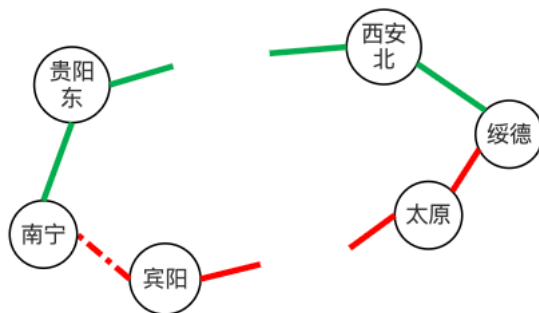
カテゴリー分析図:



ケース 15: 時間増加 108min

対象ライン: 南宁---绥德

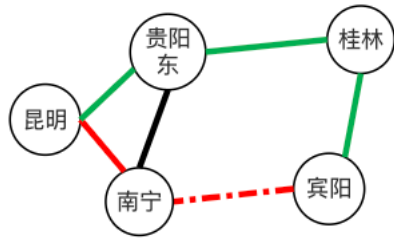
カテゴリー分析図:



ケース 16: 時間増加 96min

対象ライン: 昆明南---宾阳

カテゴリー分析図:



4.3 強風災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性分析

4.3.1 中国高速鉄道運用のための強風リスクマップ

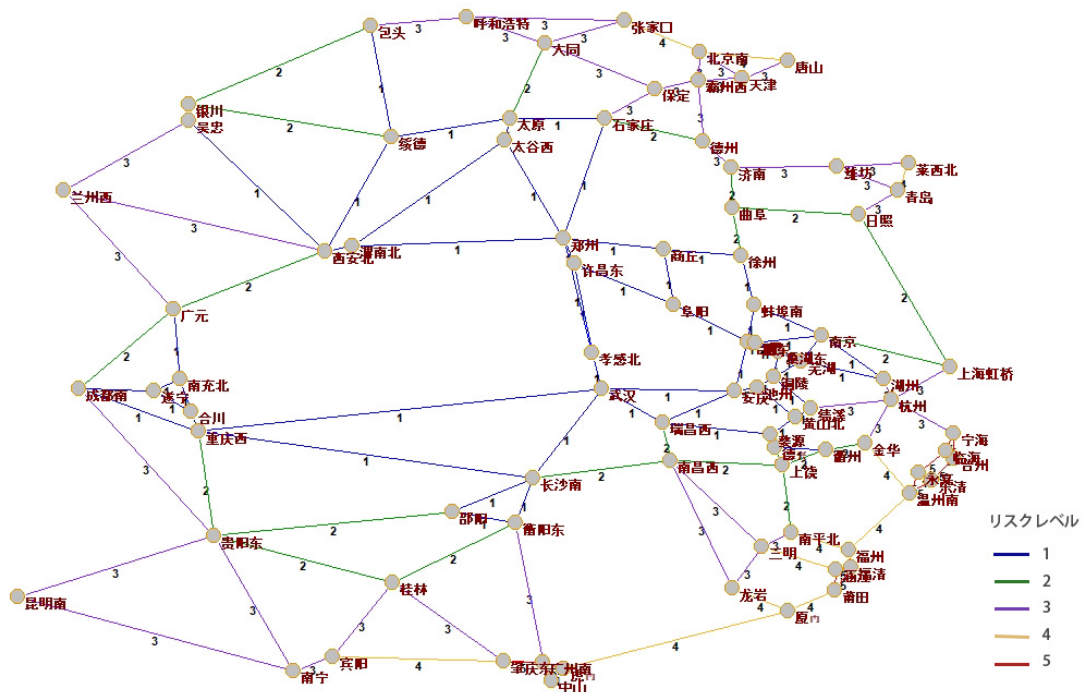


図 4.8：強風災害リスクマップ

4.3.2 中国高速鉄道運用のための強風リスク評価

(1) 割り込む線路：宁海---台州

ケース 1: 時間増加 7min

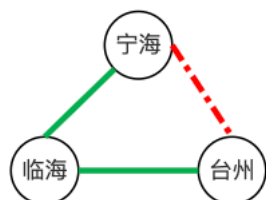
対象ライン：宁海---台州 乐清 温州南 福清 福州 涵江 莆田
厦門 虎門

台州---上海虹桥 莱西北 青島 杭州 湖州 阜陽 濰坊

南京 芜湖 黄山北 唐山 巢湖东 銅陵 池州 蚌埠南 合肥

天津 徐州 安慶 北京南 霸州西 商丘 許昌东 鄭州 太谷西

吴忠 渭南北 西安北 南充北 广元 成都南 兰州西 张家口 大同
 呼和浩特 包头 绥德 银川 肥东 保定 德州 石家庄
 太原 济南 绩溪 曲阜 日照
 カテゴリー分析図：



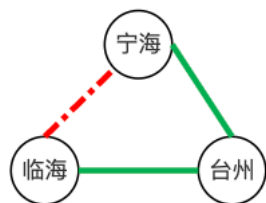
(2) 割り込む線路：宁海---临海

ケース 1: 時間増加 17min

対象ライン：临海---宁海 上海虹桥

临海---莱西北 青岛 杭州 湖州 阜阳 潍坊 南京 芜 湖
 黄山北 唐山 巢湖东 铜陵 池州 蚌埠南 合肥 天津 徐 州
 安庆 北京南 霸州西 商丘 许昌东 郑州 太谷西 吴忠 渭南北
 西安北 南充北 广元 成都南 兰州西 张家口 大同 呼 和 浩 特
 包头 绥德 遂宁 银川 肥东 保定 德州 石家庄 太 原
 济南 绩溪 曲阜 日照

カテゴリー分析図：

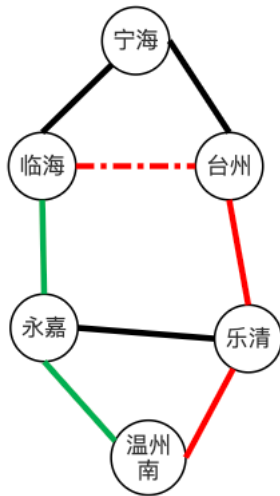


(3) 割り込む線路：台州---临海

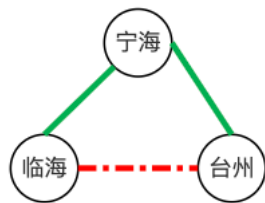
ケース 1: 時間増加 2min

対象ライン：临海---温州南 金华 福清 福州 涵江 莆 田
 衢州 南平北 厦门 上饶 德兴 婺源 三明 龙岩 南昌西
 瑞昌西 武汉 孝感北 虎门 中山 广州南 长沙南 衡阳东 肇 庆 东
 邵阳 桂林 宾阳 南宁 贵阳东 重庆西 合川 昆明南

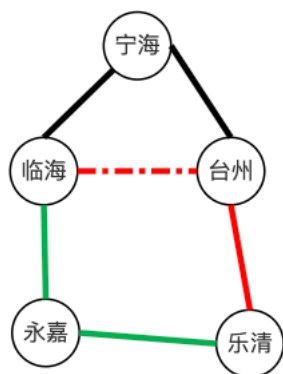
カテゴリー分析図：



ケース 2: 時間増加 37min
 対象ライン: 临海---台州
 カテゴリー分析図:



ケース 3: 時間増加 17min
 対象ライン: 临海---乐清
 カテゴリー分析図:

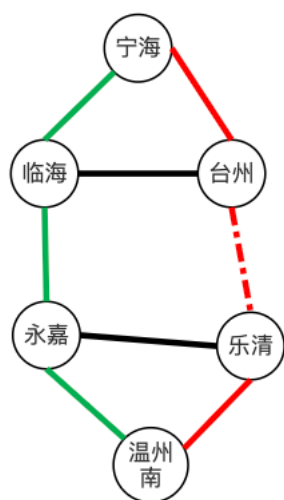


(4) 割り込む線路: 台州---乐清

ケース 1: 時間増加 9min
 対象ライン: 宁海---温州南
 虎門

福清 福州 涵江 莆田 厦 門

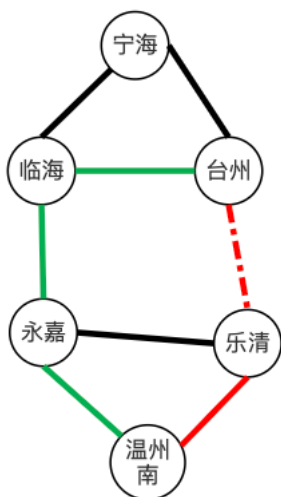
カテゴリー分析図：



ケース 2: 時間増加 26min

対象ライン：台州---温州南 金华 福清 福州 涵江 莆田
 衢州 南平北 厦门 上饶 德兴 三明 龙岩 南昌西 瑞昌西
 武汉 孝感北 中山 广州南 长沙南 衡阳东 肇庆东 邵阳 桂林
 宾阳 南宁 贵阳东 重庆西 合川 昆明南

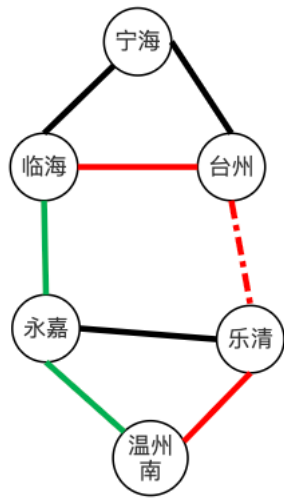
カテゴリー分析図：



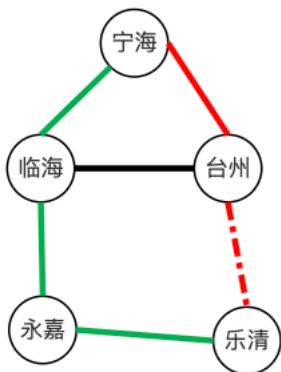
ケース 3: 時間増加 2min

対象ライン：临海---温州南 金华 福清 福州 涵江 莆田
 衢州 南平北 厦门 上饶 德兴 三明 龙岩 南昌西 瑞昌西
 武汉 孝感北 中山 广州南 长沙南 衡阳东 肇庆东 邵阳 桂林
 宾阳 南宁 贵阳东 重庆西 合川 昆明南

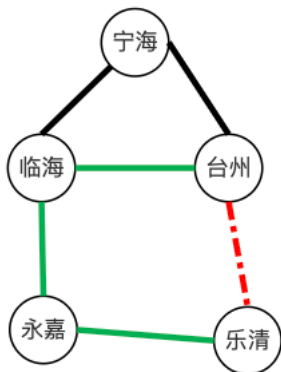
カテゴリー分析図：



ケース 4: 時間増加 24min
 対象ライン：宁海---乐清
 カテゴリー分析図：



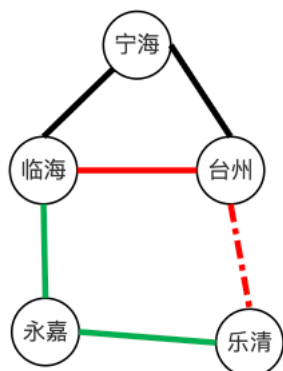
ケース 5: 時間増加 41min
 対象ライン：台州---乐清
 カテゴリー分析図：



ケース 6: 時間増加 17min

対象ライン: 临海---乐清

カテゴリ分析図:

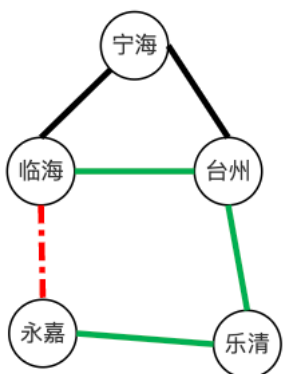


(5) 割り込む線路: 临海---永嘉

ケース 1: 時間増加 3min

対象ライン: 临海---永嘉

カテゴリ分析図:

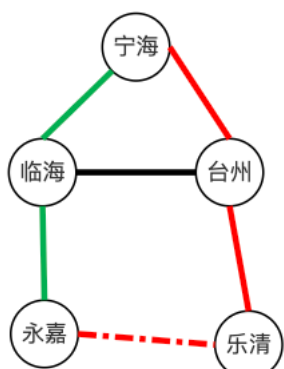


(6) 割り込む線路: 乐清---永嘉

ケース 1: 時間増加 4min

対象ライン: 宁海---永嘉

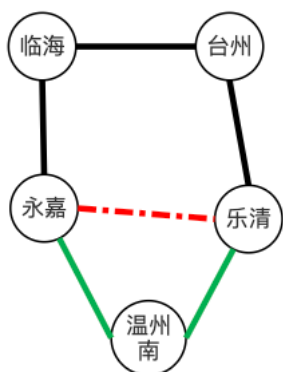
カテゴリ分析図:



ケース 2: 時間増加 15min

対象ライン: 永嘉---台州 乐清

カテゴリ分析図:



(7) 割り込む線路: 乐清---温州南

ケース 1: 時間増加 5min

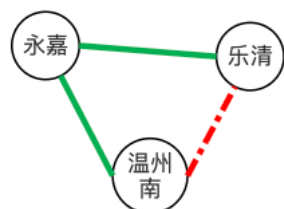
対象ライン: 宁海---温州南 福清 福州 涵江 莆田 厦 門
虎門

台州---温州南 金华 福清 福州 涵江 莆田 衢州 南平北
厦門 德兴 婺源 三明 龙岩 南昌西 瑞昌西 武汉 孝感北
虎門 中山 广州南 长沙南 衡阳东 肇庆东 邵阳 桂林 宾 阳
南宁 贵阳东 重庆西 合川 昆明南 遂宁

乐清---温州南 莱西北 青岛 杭州 湖州 阜阳 金华 福 清
福州 涵江 潍坊 莆田 衢州 南京 芜湖 黄山北 南平北
唐山 厦門 上饶 巢湖东 德兴 铜陵 婺源 三明 池 州
蚌埠南 合肥 天津 徐州 安庆 龙岩 北京南 霸州西 南昌西
商丘 瑞昌西 武汉 孝感北 许昌东 虎門 郑州 中山 广州南
长沙南 衡阳东 太谷西 肇庆东 邵阳 吴忠 桂林 渭南北 西安北

宾阳 南宁 贵阳东 重庆西 合川 南充北 广元 成都南 兰州 西
 昆明南 张家口 大同 呼和浩特 包头 绥德 遂宁 银 川
 肥东 保定 德州 石家庄 太原 济南 绩溪 曲阜 日照

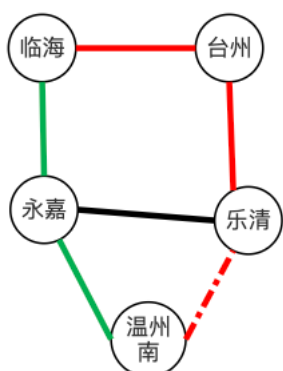
カテゴリー分析図：



ケース 2: 時間増加 2min

対象ライン：臨海--- 温州南 金华 福清 福州 涵江 莆 田
 衢州 南平北 厦門 上饶 德兴 婺源 三明 龙岩 南昌 西
 瑞昌西 武汉 孝感北 虎門 中山 广州南 长沙南 衡阳东 肇 庆 东
 邵阳 桂林 宾阳 南宁 贵阳东 重庆西 合川 昆明南

カテゴリー分析図：



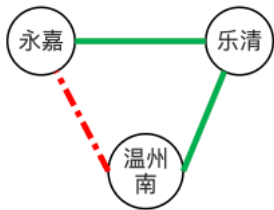
(8) 割り込む線路：永嘉---温州南

ケース 1: 時間増加 15min

対象ライン：上海虹桥---永嘉

永嘉---温州南 莱西北 青岛 杭州 湖州 阜阳 金华 福 清
 福州 涵江 潍坊 莆田 衢州 南京 芜湖 黄山北 南平北
 唐山 厦門 上饶 巢湖东 德兴 铜陵 婺源 三明 池 州
 蚌埠南 合肥 天津 徐州 安庆 龙岩 北京南 霸州西 南昌 西
 商丘 瑞昌西 武汉 孝感北 许昌东 虎門 郑州 中山 广州南
 长沙南 衡阳东 太谷西 肇庆东 邵阳 吴忠 桂林 渭南北 西安北
 宾阳 南宁 贵阳东 重庆西 合川 南充北 广元 成都南 兰州 西
 昆明南 张家口 大同 呼和浩特 包头 绥德 遂宁 银 川
 肥东 保定 德州 石家庄 太原 济南 绩溪 曲阜 日照

カテゴリー分析図：

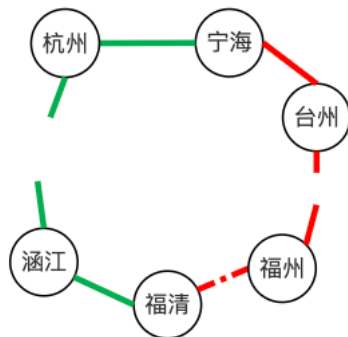


(9) 割り込む線路：福清---福州

ケース 1: 時間増加 136min

対象ライン：宁海---福清

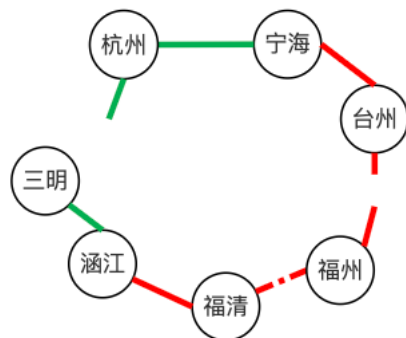
カテゴリー分析図：



ケース 2: 時間増加 110min

対象ライン：宁海---涵江

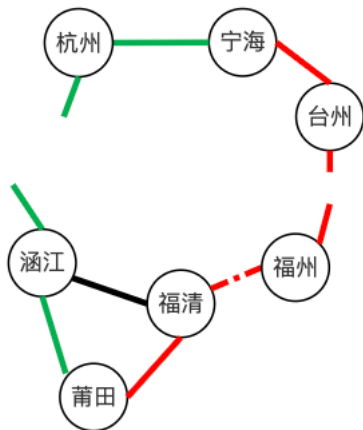
カテゴリー分析図：



ケース 3: 時間増加 114min

対象ライン：宁海---莆田

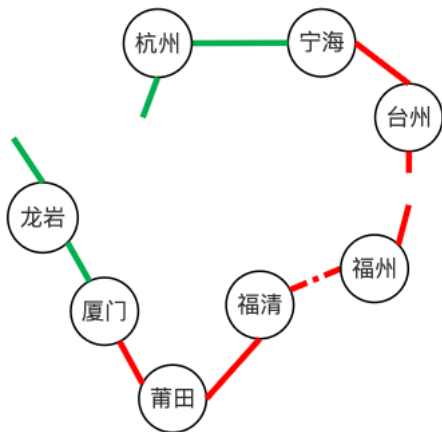
カテゴリー分析図：



ケース 4: 時間増加 112min

対象ライン：宁海---厦門

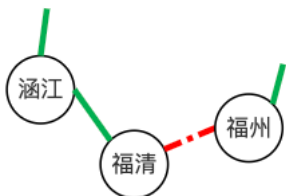
カテゴリー分析図：



ケース 5: 時間増加 230min

対象ライン：福清---福州

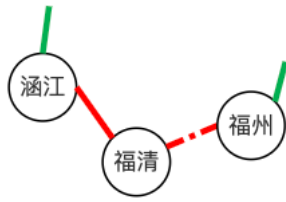
カテゴリー分析図：



ケース 6: 時間増加 204min

対象ライン：福州---涵江

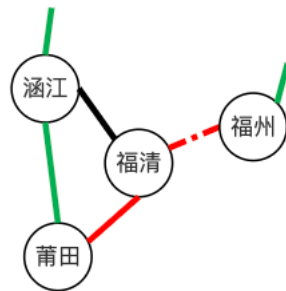
カテゴリー分析図：



ケース 7: 時間増加 208min

対象ライン：福州---莆田

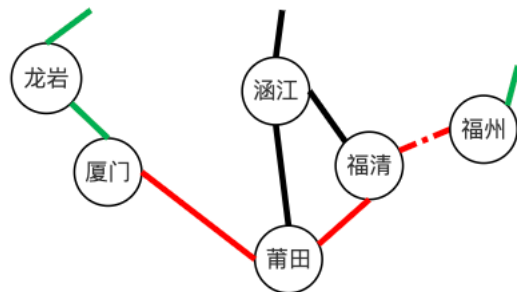
カテゴリー分析図：



ケース 8: 時間増加 206min

対象ライン：福州---厦門

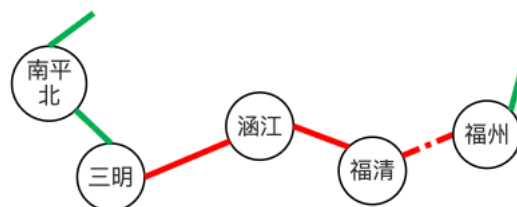
カテゴリー分析図：



ケース 9: 時間増加 68min

対象ライン：福州---三明

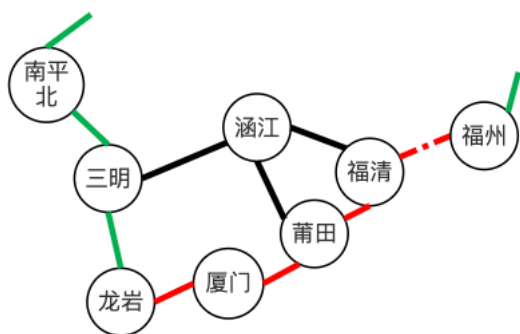
カテゴリー分析図：



ケース 10: 時間増加 92min

対象ライン：福州---龙岩

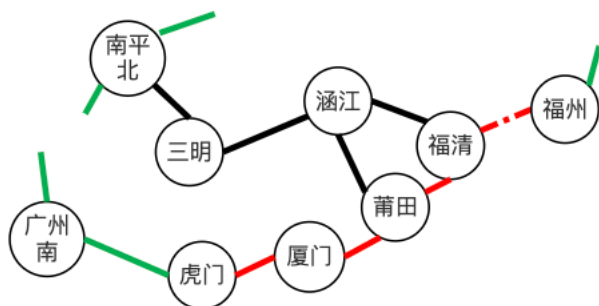
カテゴリー分析図：



ケース 11: 時間増加 164min

対象ライン：福州---虎門

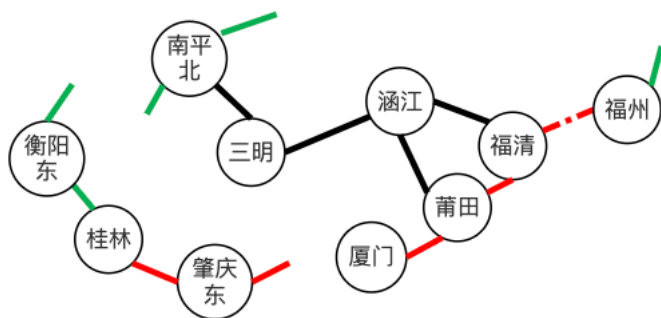
カテゴリー分析図：



ケース 12: 時間増加 27min

対象ライン：福州---桂林

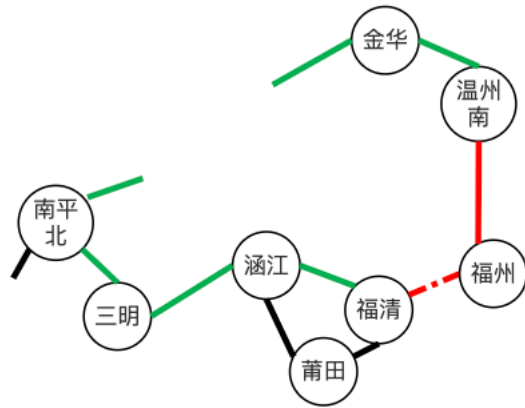
カテゴリー分析図：



ケース 13: 時間増加 156min

対象ライン：福清---台州 临海 乐清 永嘉 温州南

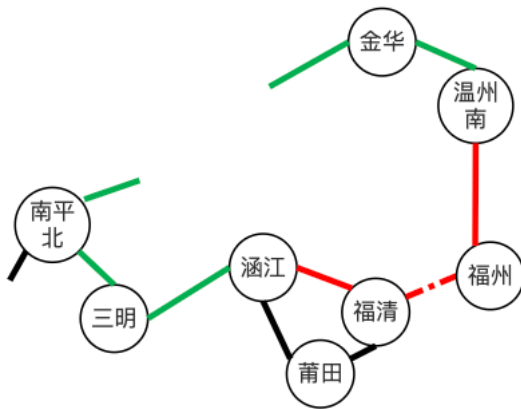
カテゴリー分析図：



ケース 14: 時間増加 130min

対象ライン: 涵江---台州 临海 乐清 永嘉 温州南

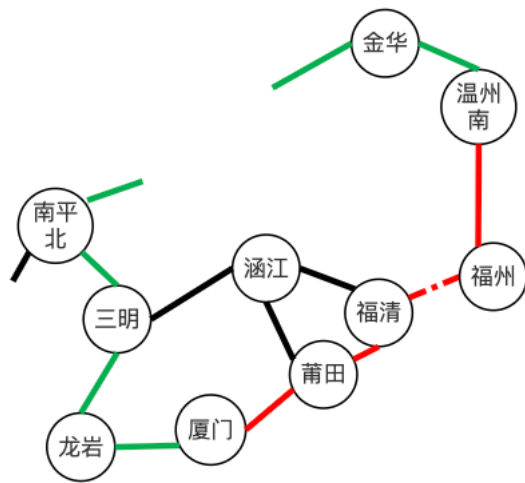
カテゴリ分析図:



ケース 15: 時間増加 132min

対象ライン: 厦門---台州 临海 乐清 永嘉 温州南

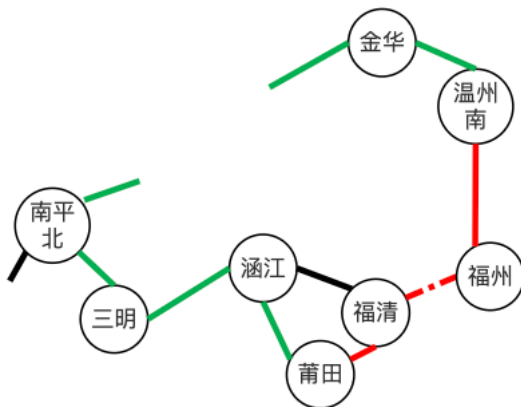
カテゴリ分析図:



ケース 16: 時間増加 134min

対象ライン: 莆田---台州 临海 乐清 永嘉 温州南

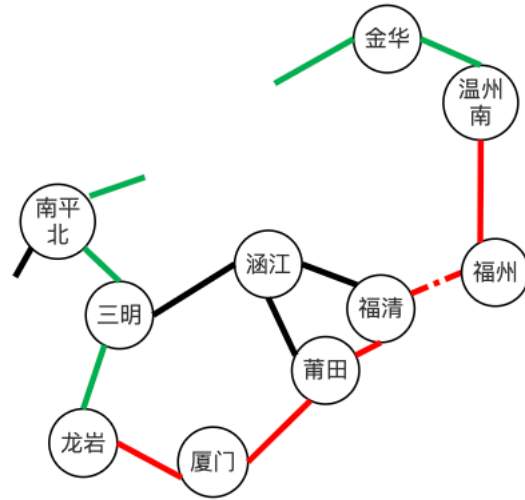
カテゴリー分析図:



ケース 17: 時間増加 18min

対象ライン: 龙岩---台州 临海 乐清 永嘉 温州南

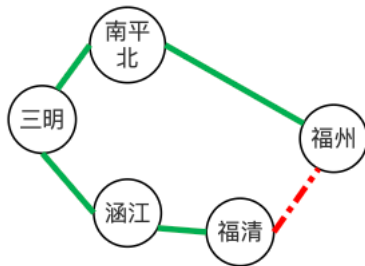
カテゴリー分析図:



ケース 18: 時間増加 22min

対象ライン：福清---潍坊 衢州 南京 芜湖 黄山北 南平北
 唐山 上饶 巢湖东 德兴 铜陵 婺源 池州 蚌埠南 合肥
 天津 徐州 安庆 北京南 霸州西 商丘 张家口 呼和浩 特
 包头 肥东 德州 济南 绩溪 曲阜 日照

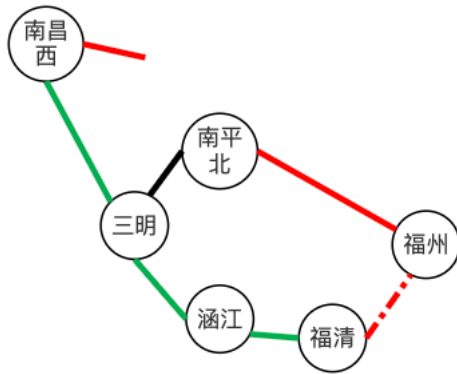
カテゴリー分析図：



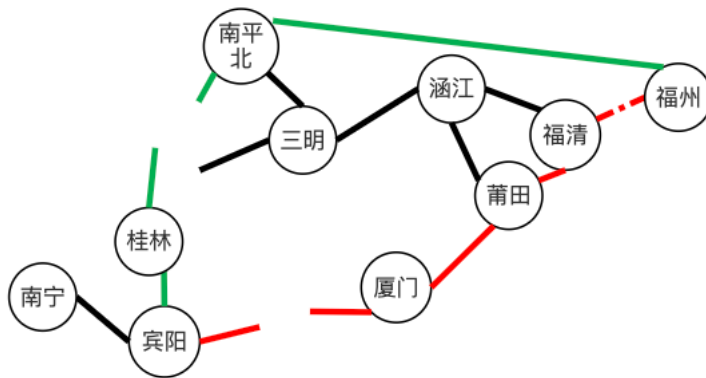
ケース 19: 時間増加 2min

対象ライン：福清---南昌西 瑞昌西 武汉 孝感北 郑州 长沙南
 衡阳东 太谷西 邵阳 吴忠 渭南北 西安北 贵阳东 重庆西 合 川
 南充北 广元 成都南 兰州西 昆明南 大同 绥德 遂宁 银 川
 保定 石家庄 太原

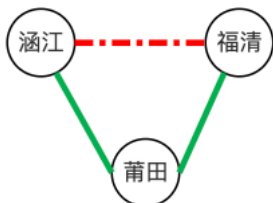
カテゴリー分析図：



ケース 20: 時間増加 117min
 対象ライン：福州---宾阳 南宁
 カテゴリー分析図：



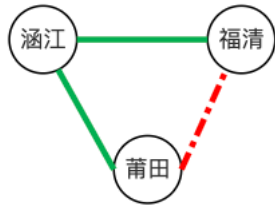
(10) 割り込む線路：福清---涵江
 ケース 1: 時間増加 16min
 対象ライン：涵江---宁海 台州 临海 乐清 永嘉 温州 南
 福清 福州
 三明---福州 福清
 カテゴリー分析図：



(11) 割り込む線路：福清---莆田
 ケース 1: 時間増加 4min

対象ライン：福清 福州---莆田 厦門 龙岩 虎門 中山 广州南
 肇庆东 桂林 宾阳 南宁
 台州 临海 乐清 永嘉 温州南---莆田 厦門 龙岩 虎門

宁海---莆田 厦門 虎門
 カテゴリー分析図：



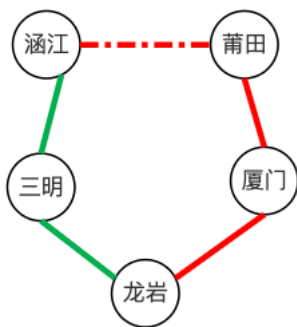
(12) 割り込む線路：涵江---莆田

ケース 1: 時間増加 20min

対象ライン：涵江---龙岩

莆田---南昌西 瑞昌西 武汉 孝感北 郑州 长沙南 衡阳东 太谷 西
 邵阳 吴忠 渭南北 西安北 贵阳东 重庆西 合川 南充北 广 元
 成都南 兰州西 昆明南 大同 绥德 遂宁 银川 保定 石 家 庄
 太原

カテゴリー分析図：

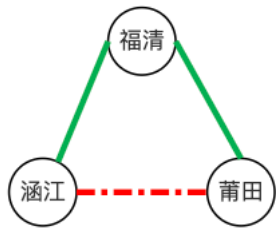


ケース 2: 時間増加 22min

対象ライン：莆田---三明

涵江---莆田 厦門 虎門 中山 广州南 肇庆东 桂林 宾 阳
 南宁

カテゴリー分析図：



(13) 割り込む線路：虎門---中山、虎門---广州南、中山---广州南、广州南---肇庆东、既に 4.2 で分析した。

4.4 豪雪災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性分析

4.4.1 中国高速鉄道運用のための豪雪リスクマップ

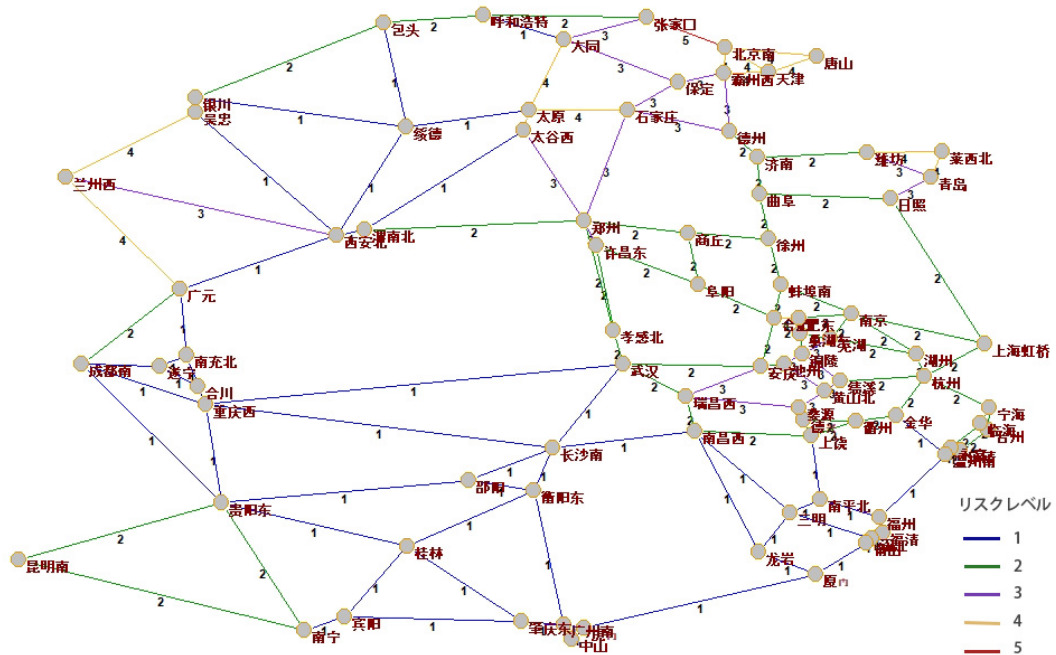
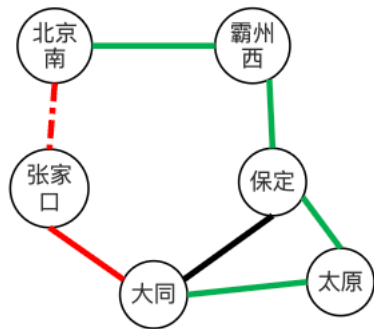


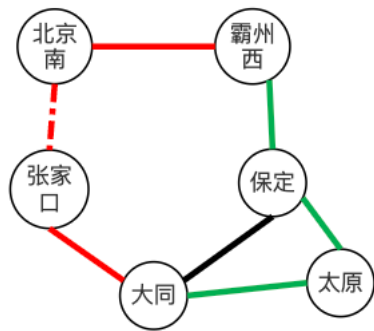
図 4.9：豪雪災害リスクマップ

4.4.2 中国高速鉄道運用のための豪雪リスク評価

- (1) 割り込む線路：北京---张家口
 ケース 1: 時間増加 202min
 対象ライン：大同 ---北京南
 カテゴリー分析図：



ケース 2: 時間増加 84min
 対象ライン：大同 --- 霸州西
 カテゴリー分析図：



4.5 地震災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性分析

4.5.1 中国高速鉄道運用のための地震リスクマップ

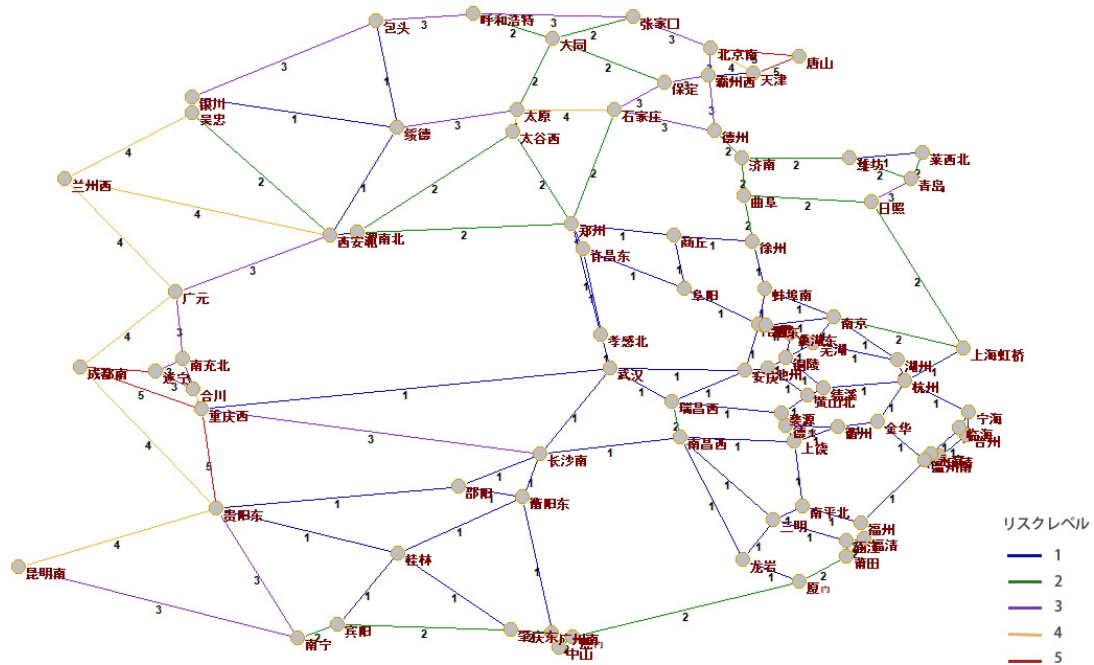


図 4.10：地震災害リスクマップ

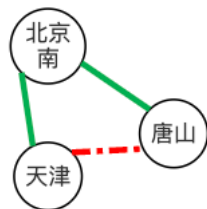
4.5.2 中国高速鉄道運用のための地震リスク評価

(1) 割り込む線路：唐山---天津

ケース 1: 時間増加 61min

対象ライン：唐山---天津

カテゴリ分析図：



ケース 2: 時間増加 1min

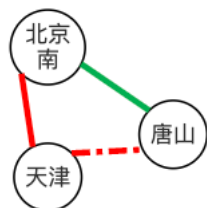
対象ライン：唐山---北京南

张家口 大同

呼和浩特

包头

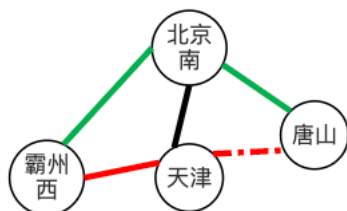
カテゴリ分析図：



ケース 3: 時間増加 60min

対象ライン：唐山---宁海 台州 上海虹桥 临海 乐清
 永嘉 温州南 莱西北 青岛 杭州 湖州 阜阳 金华 福清
 福州 涵江 潍坊 莆田 衢州 南京 芜湖 黄山北 南平北
 厦门 上饶 巢湖东 德兴 铜陵 婺源 三明 池州 蚌埠南
 合肥 天津 徐州 安庆 龙岩 霸州西 南昌西 商丘 瑞昌西
 武汉 孝感北 许昌东 虎门 郑州 中山 广州南 长沙南 衡阳东
 太谷西 肇庆东 邵阳 吴忠 桂林 渭南北 西安北 宾阳 南宁
 贵阳东 重庆西 合川 南充北 广元 成都南 兰州西 昆明南 绥德
 遂宁 银川 肥东 保定 德州 石家庄 太原 济南 绩溪
 曲阜 日照

カテゴリー分析図：



(2) 割り込む線路：唐山---北京南
 ネットワーク図の最短経路は変更されていない。

(3) 割り込む線路：贵阳东---重庆西

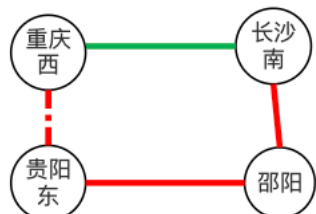
ケース 1: 時間増加 15min

対象ライン：重庆西---宁海 台州 上海虹桥 临海 乐清
 永嘉 温州南 杭州 湖州 金华 福清 福州 涵江 莆田
 衢州 黄山北 南平北 上饶 德兴 婺源 三明 龙岩 南昌西
 长沙南 绩溪

合川---宁海 台州 临海 乐清 永嘉 温州南 杭州 金华
 福清 福州 涵江 莆田 衢州 黄山北 南平北 上饶 德兴
 婺源 三明 龙岩 南昌西 绩溪

遂宁---乐清 永嘉 温州南 金华 福清 福州 涵江 莆田
 衢州 黄山北 南平北 上饶 德兴 婺源 三明 龙岩 南昌西
 长沙南

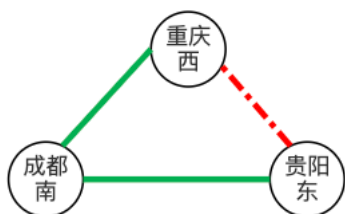
カテゴリー分析図：



ケース 2: 時間増加 148min

対象ライン：重庆西 合川---桂林 宾阳 南宁 贵阳东 昆明南

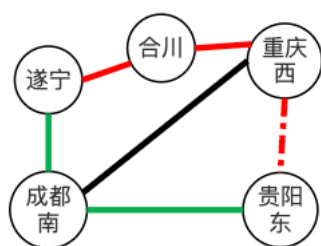
カテゴリー分析図：



ケース 3: 時間増加 48min

対象ライン：遂宁---厦门 虎门 中山 广州南 肇庆东 邵 阳
 桂林 宾阳 南宁 贵阳东 昆明南

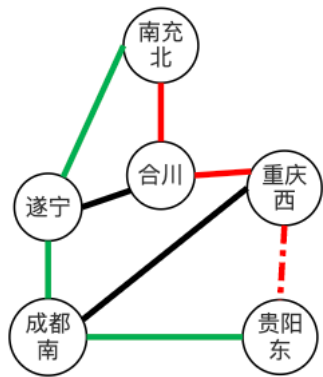
カテゴリー分析図：



ケース 4: 時間増加 87min

対象ライン：南充北---虎门 中山 广州南 肇庆东 邵阳 桂 林
 宾阳 南宁 贵阳东 昆明南

カテゴリー分析図：



ケース 5: 時間増加 19min

対象ライン: 衡阳东---重庆西 合川 南充北 遂宁

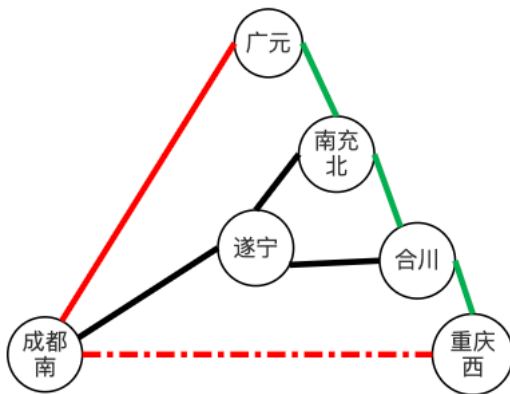
カテゴリー分析図:

(4) 割り込む線路: 重庆西---成都南

ケース 1: 時間増加 8min

対象ライン: 重庆西---莱西北 青岛 阜阳 潍坊 唐山 蚌埠 南
 天津 徐州 北京南 霸州西 商丘 许昌东 郑州 太谷西 吴 忠
 渭南北 西安北 广元 兰州西 张家口 大同 呼和浩特 包头 绥德
 银川 保定 德州 石家庄 太原 济南 曲阜 日照

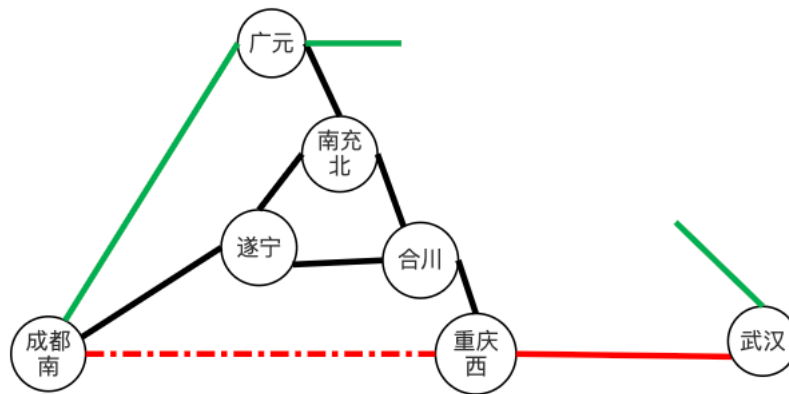
カテゴリー分析図:



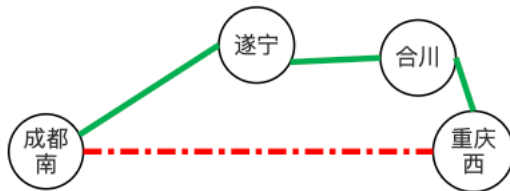
ケース 2: 時間増加 42min

対象ライン: 成都南---瑞昌西 武汉

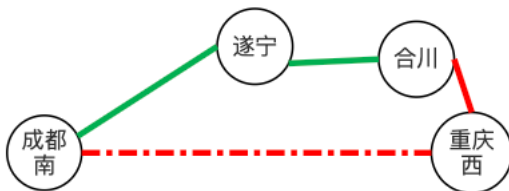
カテゴリー分析図:



ケース 3: 時間増加 62min
 対象ライン：成都南---重庆西
 カテゴリー分析図：



ケース 4: 時間増加 6min
 対象ライン：成都南---合川
 カテゴリー分析図：



(5) 割り込む線路：遂宁---成都南
 ネットワーク図の最短経路は変更されていない。

4.6 結果の一覧表

以下は、4.2、4.3、4.4、4.5 節の脆弱性分析の結果をまとめた一覧表である。この表は、異なる災害状況下で、各被災線が鉄道網全体に与える影響について、その結果生じる遅れ時間や影響を受けたリンク数などの情報を与える。

災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性評価一覧表				
災害種類	割り込み線路	遅れ時間 (min)	影響を受けるリンク数	
豪雨	广州南-虎门	62	105	
		57	7	
		55	1	
		44	1	
		28	7	
		27	1	
		22	3	
		53	1	
		9	2	
		虎门-中山	\	\
	中山-广州南	62	69	
		50	1	
		30	5	
		28	8	
	肇庆东-广州南	105	59	
		325	4	
		263	1	
		235	1	
		281	1	
		127	1	
		255	1	
		55	1	
		145	2	
117		6		
27		1		
53	1			
143	2			

		73	1
		163	2
		207	8
		57	8
		83	21
	肇庆东-宾阳	90	20
		9	2
	南宁-宾阳	173	58
		318	1
		290	1
		316	1
		336	1
		367	5
		182	1
		310	1
		243	1
		85	1
		227	1
		98	1
		62	1
513		1	
108		1	
96	1		
強風	宁海-台州	7	56
	宁海-临海	17	49
	台州-宁海	2	32
		37	1
		17	1
	台州-乐清	9	7
		26	30
		2	30
		24	1
		41	1
		17	1
	临海-永嘉	3	1

乐清-永嘉	4	1	
	15	2	
乐清-温州南	5	118	
	2	32	
永嘉-温州南	15	79	
福清-福州	136	1	
	110	1	
	114	1	
	112	1	
	230	1	
	204	1	
	208	1	
	206	1	
	68	1	
	92	1	
	164	1	
	27	1	
	156	1	
	130	5	
	132	5	
	134	5	
	18	5	
	22	30	
	2	27	
117	2		
福清-涵江	16	10	
福清-莆田	4	43	
涵江-莆田	20	28	
	22	10	
虎门-中山	既に「豪雨」のカテゴリに統計した		
虎门-广州南			
中山-广州南			
广州南-肇庆东			
豪雪	北京-张家口	202	1

地震	唐山-天津	84	1
		61	1
		1	5
		60	79
	唐山-北京	\	\
	贵阳东-重庆西	15	65
		148	10
		48	11
		87	10
		19	4
	重庆西-成都南	8	32
		42	2
		62	1
		6	1
	遂宁-成都南	\	\

表 4.1 災害の影響を受けた中国高速鉄道網の脆弱性評価一覧表

表中の割り込み線路は、切断線数が多いほど災害の影響が大きいということが示すように、さまざまな災害が鉄道システムの運転に大きな影響を及ぼしやすいことを反映している。

遅れ時間の長さは、災害の影響の程度を反映している。ルートが分断されることで、より長い迂回路が選択される傾向にある。遅れば遅れるほど、災害の影響は深刻になる。

影響を受けるリンク数は、災害の影響範囲を反映している。つまり、その路線が被災すると、他の多くの路線の最短ルートがそこを通らなければならないことが多く、いったん運行に影響が出ると、複数のルートで連鎖的に遅れが発生する可能性がある。つまり、影響を受けるリンク数が多ければ多いほど、災害の規模は大きくなる。

まとめると、割り込み線路の数は、鉄道ネットワークの災害に対する敏感性を反映することができ、すでに影響を受けるリンク数と遅延時間は、自然災害の状況に対する鉄道路線の脆弱性を反映している。

第5章 おわりに

5.1 まとめ

中国では、各地の経済的あるいは文化的なつながりから地域を越えた交通距離が非常に長い。特に、鉄道輸送システムは、重要な交通インフラとして、航空輸送に比べて輸送量が多い（輸送旅客が多い）、密度が高い（空港に比べて鉄道駅が多い）という利点があり、一部の都市間短距離輸送システムと比べて輸送距離が長い、速度が速いという利点がある。また、高速鉄道は快適性やエネルギー効率にも優れているため、中国の交通システムにおいて、他の交通手段には代えがたい役割を担っている。

本論文では、近年の中国における高速鉄道の発展と自然災害による列車運行の支障を考慮して、高速鉄道の脆弱性について、地域ごとの高速鉄道の自然災害からの保護と新路線建設の参考とするために、次の分析を行った。

(1)中国高速鉄道網の可視化

中国の高速鉄道のリアルな運行データをもとに、分析に必要なネットワーク構造を抽象化・単純化し、分析ニーズに合わせて可視化。（速度分布図、走行時間図など）

(2)最短経路の計算

輸送時間を重み付けにしたフロイトのアルゴリズムによる駅間最短経路の算出

(3)災害の影響を受ける場所の特定

高速鉄道の運行に大きな影響を与える3種類の気象災害（大雨、大雪、強風）と1種類の地質災害（地震）を用いて中国高速鉄道災害マップ（ハザードデータ、Baidu API など）を作成し、中国高速鉄道のネットワーク（路線設計速度をリンク重み）と組み合わせ、リスクマトリクスモデルを用いて様々な災害状況における中国高速鉄道のハザードリスクマップを作って、災害区間を特定する。

(4)自然災害の影響下における中国高速鉄道の経路脆弱性分析

中国高速鉄道災害リスクマップにおいて、リスクレベルが最も高い（当該ハザードに対する耐性が最も弱い）リンクを個別に切断し、この条件に対してマップ内の他のノード間の最短経路変化値を算出し、最短経路の変化パターンを分析することで、脆弱性を評価する。

本論文の分析研究から、次のような結論が導き出される。

- (1) 中国の高速鉄道のネットワーク構造は、東部は密集し、西部はまばらである。東北と西北を結ぶ高速鉄道は 1 本しかなく、事故が起きても代替の迂回路が見つからないため、脆弱性は非常に高い。
- (2) 自然災害による路線への影響と高速鉄道の設計速度について、沿岸部や西部山岳盆地では、しばしば発生する豪雨、強風、地震に対応するため、高速鉄道の設計速度が低くなっている。吹雪は中国北部に集中し、高速鉄道の代替路線が少ないため、吹雪の際は交通に重大な支障をきたす可能性がある。
- (3) 脆弱性分析の結果、「広州-虎門」、「中山-虎門」、「肇慶-広州」、「南寧-臨港」ルートは、豪雨の影響を受ける条件下では脆弱性が高い。強風の影響を受ける条件下では、「温州-福清」、「広州-虎門」、「中山-虎門」、「肇慶-広州」の脆弱性は高い。「貴陽-重慶」と「唐山-天津」は、地震災害の影響を受けるという条件では、脆弱性が高くなる。一方、高速鉄道が密集している中部地方では豪雪の影響は少なく、北東部の脆弱性に大きな影響を与えている。

5.2 今後の展望

(1) 無向ネットワークから有向ネットワークへ変化

有向ネットワークモデルに基づく研究は、関連する特性を拡張することができると考えられる。例えば、異なる方向への列車の出発回数と頻度が、影響について異なる結論を導く可能性がある。

(2) 単一のネットワークから相互依存のネットワーク（輸送網）へ

交通網の一部として、高速鉄道網は他のネットワークと連携している。また、交通機関では、バス網、地下鉄網などは、一見独立しているように見えるが、実は依存関係や補完関係がある。したがって、鉄道網の脆弱性は、こうした他の交通機関をも含めて、より良い路線設計と運営計画によって高めることができる。

(3) 静的ネットワークから動的ネットワークへ

現在の研究では、静的なネットワークの脆弱性に焦点が当てられているが、交通ネットワークは動的なネットワークであり、車両や路線は常に変化し、突発的な事象の影響範囲やタイミングも不確実である。したがって、今後の研究では、交通網の脆弱性を研究するために、さらなる要因を考慮することができる。

付録 A 災害地図情報

本章の地図は、すべて本研究の参考資料として使用した中国自然災害リスク地図集[20]から転載したものである。

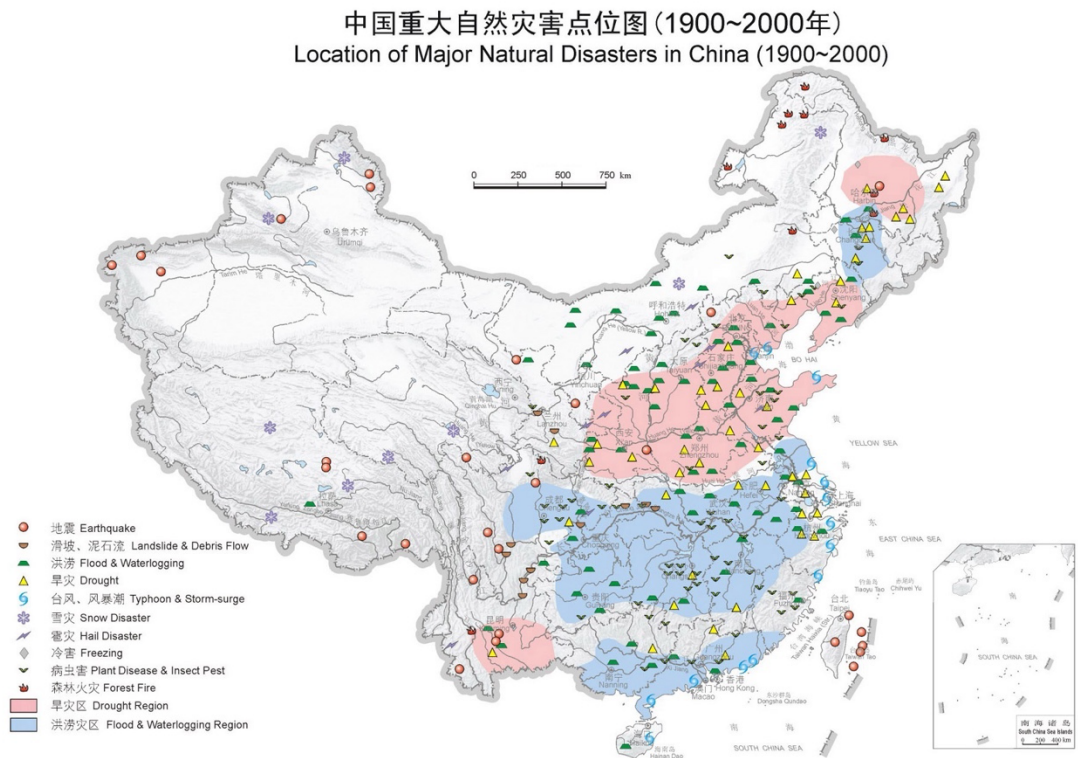


図 a-1 中国主要自然災害地マップ [20]より転載

中国年平均降水量与降水相对变率
 Mean Annual Precipitation and Its
 Relative Variability in China

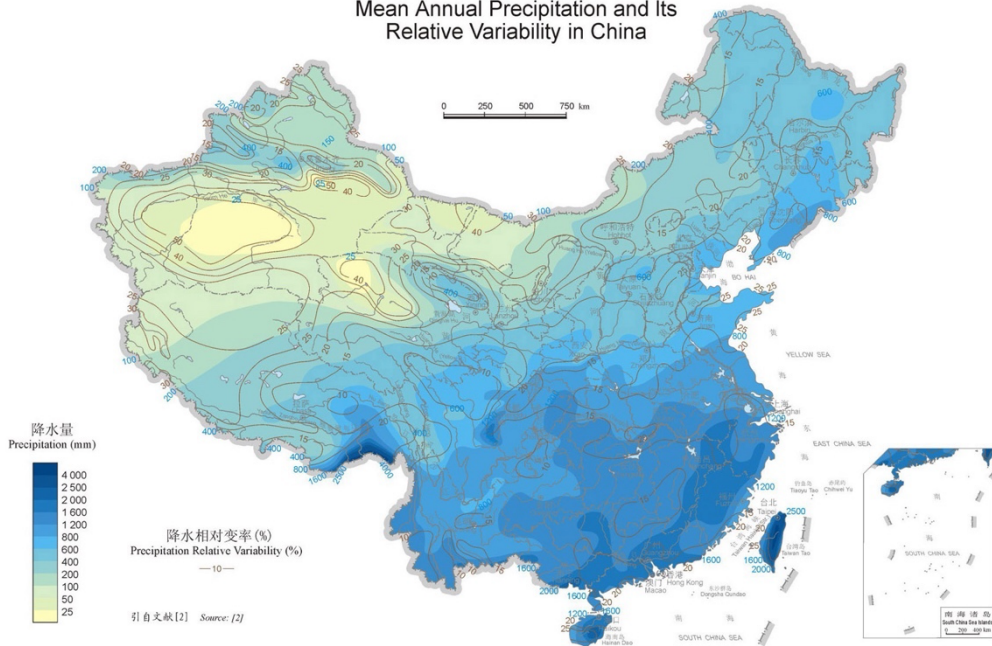


图 a-2 中国の年平均降水量分布図 [20]より転載

中国年均风速
 Mean Annual Wind Speed of China

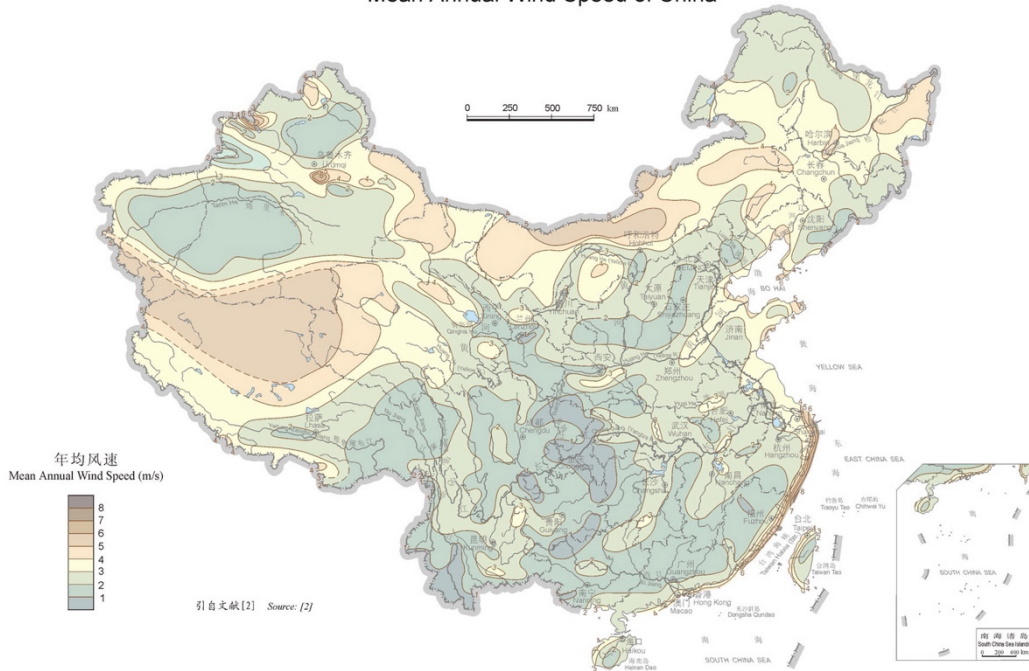


图 a-3 中国の年平均風速分布 [20]より転載

西北太平洋热带气旋路径频率 1949~2000年
Track Frequency of Tropical Cyclones in Northwest Pacific (1949~2000)

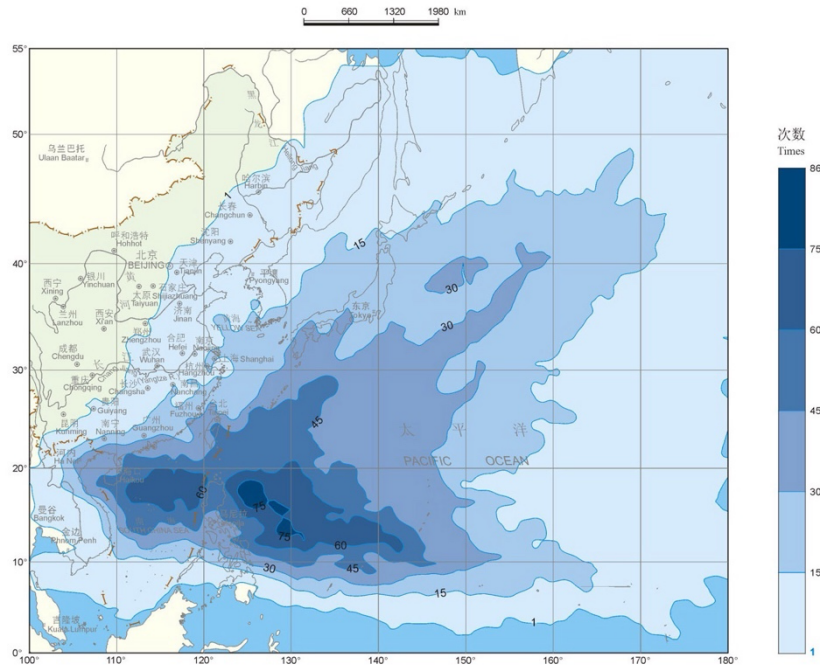


図 a-4 中国熱帯低気圧進路頻度マップ [20]より転載

中国沙尘暴灾害危险性评价 (2000年3~6月)
Risk Assessment of Dust Storm Disaster in China (March~June, 2000)

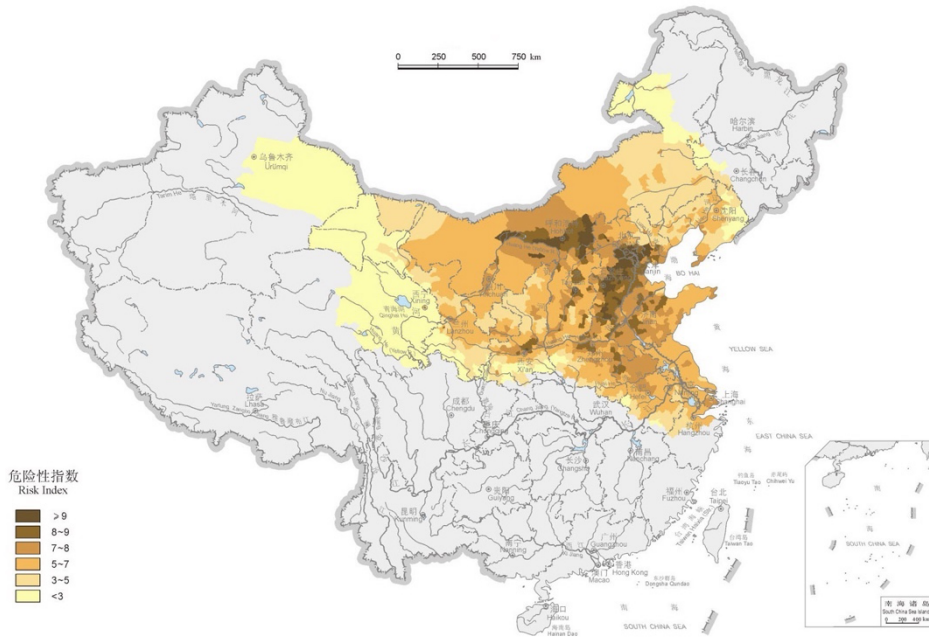


図 a-5 中国の砂嵐リスク評価マップ [20]より転載

中国地震震中分布 (1949~2000年, $M_s \geq 4$)
 Earthquake Epicenter Distribution in China (1949~2000, $M_s \geq 4$)

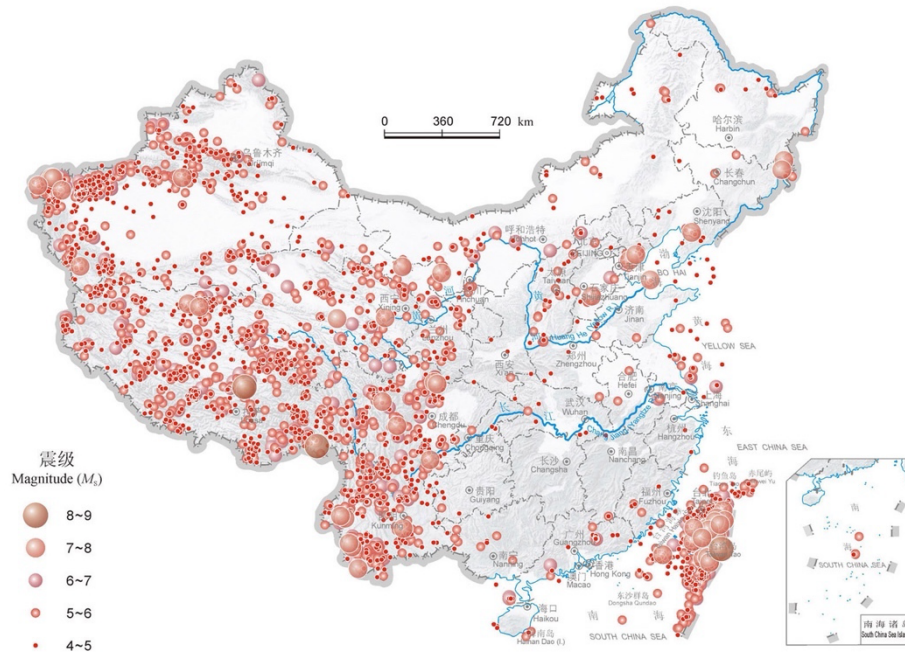


图 a-6 中国の震源分布図 [20]より転載

中国长期地震烈度区划
 Long-term Regional Planning of Seismic Intensity of China

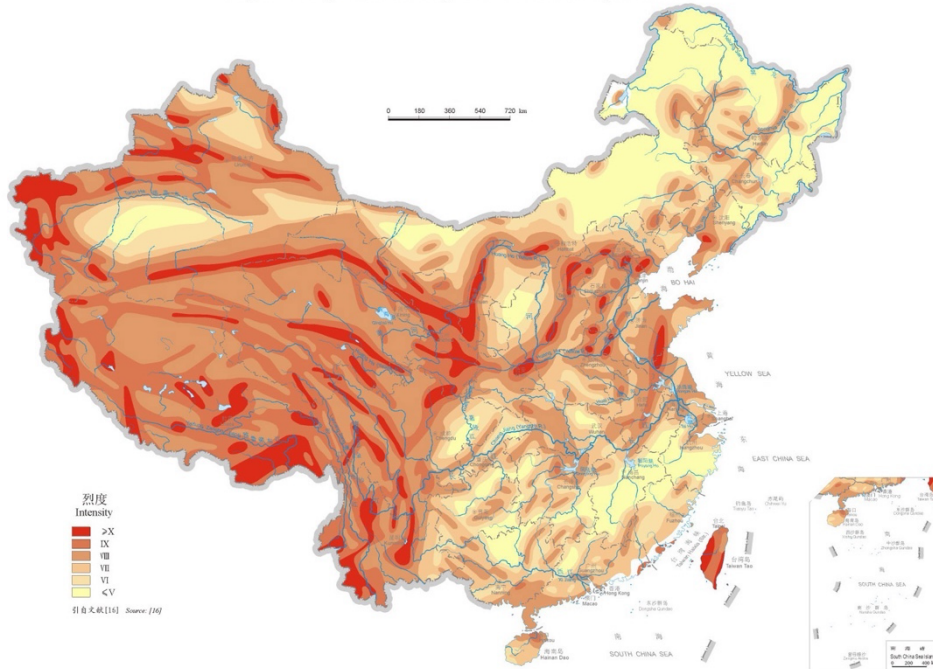


图 a-7 中国における長期震度ゾーニング [20]より転載

中国多年平均降雪日数
Mean Annual Snow Days of China

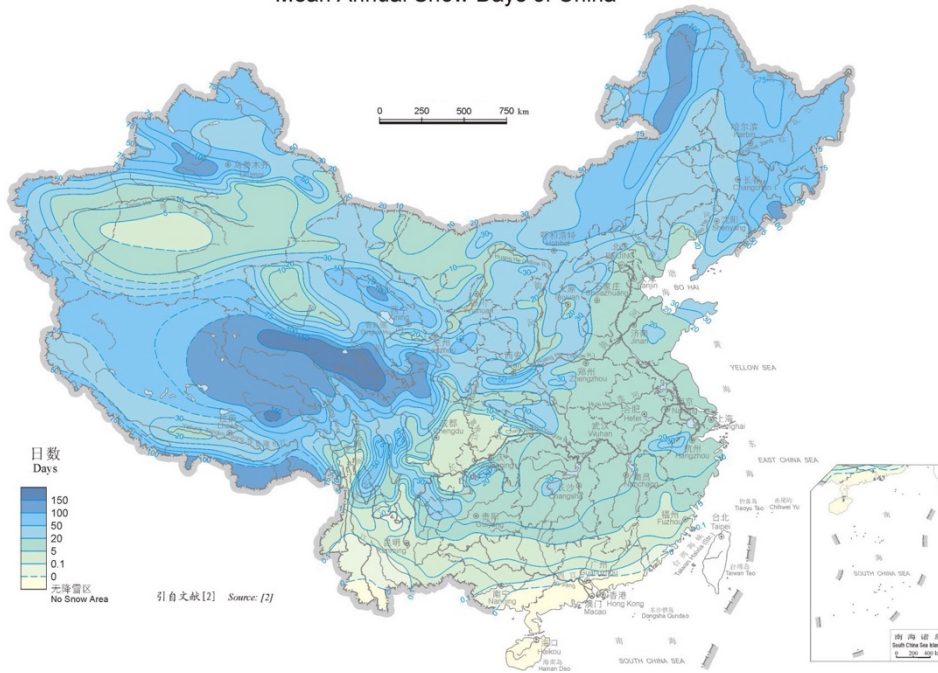


図 a-8 中国多年平均降雪日数 [20]より転載

中国多年平均积雪日数
Mean Annual Snow Cover Days of China

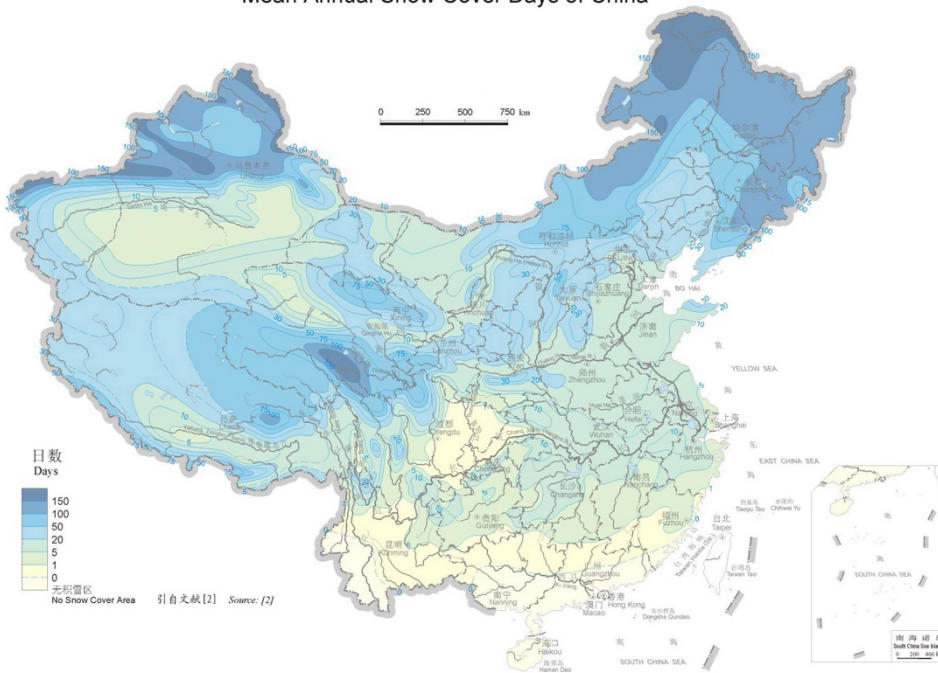


図 a-9 中国の多年平均積雪日数 [20]より転載

付録 B 最短経路の算出結果

駅番号	駅名	経路	距離(km)
1	北京	北京-天津	120
2	天津	天津-北京	120
3	北京	北京-保定	180
4	保定	保定-北京	180
5	北京	北京-石家荘	270
6	石家荘	石家荘-北京	270
7	北京	北京-鄭州	450
8	鄭州	鄭州-北京	450
9	北京	北京-西安	700
10	西安	西安-北京	700
11	北京	北京-長沙	900
12	長沙	長沙-北京	900
13	北京	北京-重慶	1100
14	重慶	重慶-北京	1100
15	北京	北京-成都	1200
16	成都	成都-北京	1200
17	北京	北京-昆明	1500
18	昆明	昆明-北京	1500
19	北京	北京-蘭州	1000
20	蘭州	蘭州-北京	1000
21	北京	北京-西寧	1300
22	西寧	西寧-北京	1300
23	北京	北京-ラサライ	1800
24	ラサライ	ラサライ-北京	1800
25	北京	北京-ウルムチ	1700
26	ウルムチ	ウルムチ-北京	1700
27	北京	北京-チンギン	1600
28	チンギン	チンギン-北京	1600
29	北京	北京-クワンミン	1400
30	クワンミン	クワンミン-北京	1400
31	北京	北京-ハルビン	1200
32	ハルビン	ハルビン-北京	1200
33	北京	北京-モスクワ	8000
34	モスクワ	モスクワ-北京	8000
35	北京	北京-シベリヤ	8000
36	シベリヤ	シベリヤ-北京	8000
37	北京	北京-アムステルダム	10000
38	アムステルダム	アムステルダム-北京	10000
39	北京	北京-ロンドン	10000
40	ロンドン	ロンドン-北京	10000
41	北京	北京-ニューヨーク	12000
42	ニューヨーク	ニューヨーク-北京	12000
43	北京	北京-東京	2000
44	東京	東京-北京	2000
45	北京	北京-ソウル	1200
46	ソウル	ソウル-北京	1200
47	北京	北京-バンコク	1800
48	バンコク	バンコク-北京	1800
49	北京	北京-ジャカルタ	2200
50	ジャカルタ	ジャカルタ-北京	2200
51	北京	北京-シドニー	11000
52	シドニー	シドニー-北京	11000
53	北京	北京-メルボルン	10000
54	メルボルン	メルボルン-北京	10000
55	北京	北京-オーストラリア	10000
56	オーストラリア	オーストラリア-北京	10000
57	北京	北京-南アフリカ	11000
58	南アフリカ	南アフリカ-北京	11000
59	北京	北京-ブラジル	12000
60	ブラジル	ブラジル-北京	12000
61	北京	北京-インド	10000
62	インド	インド-北京	10000
63	北京	北京-パキスタン	10000
64	パキスタン	パキスタン-北京	10000
65	北京	北京-イラン	10000
66	イラン	イラン-北京	10000
67	北京	北京-トルコ	9000
68	トルコ	トルコ-北京	9000
69	北京	北京-ロシア	8000
70	ロシア	ロシア-北京	8000
71	北京	北京-ドイツ	9000
72	ドイツ	ドイツ-北京	9000
73	北京	北京-フランス	9000
74	フランス	フランス-北京	9000
75	北京	北京-イタリア	9000
76	イタリア	イタリア-北京	9000
77	北京	北京-スペイン	9000
78	スペイン	スペイン-北京	9000
79	北京	北京-ポランド	9000
80	ポランド	ポランド-北京	9000
81	北京	北京-チェコ	9000
82	チェコ	チェコ-北京	9000
83	北京	北京-ハンガリー	9000
84	ハンガリー	ハンガリー-北京	9000
85	北京	北京-オーストリア	9000
86	オーストリア	オーストリア-北京	9000
87	北京	北京-スイス	9000
88	スイス	スイス-北京	9000
89	北京	北京-オランダ	9000
90	オランダ	オランダ-北京	9000
91	北京	北京-ベルギー	9000
92	ベルギー	ベルギー-北京	9000
93	北京	北京-ルクセンブルグ	9000
94	ルクセンブルグ	ルクセンブルグ-北京	9000
95	北京	北京-ギリシア	9000
96	ギリシア	ギリシア-北京	9000
97	北京	北京-ポルトガル	9000
98	ポルトガル	ポルトガル-北京	9000
99	北京	北京-アイスランド	9000
100	アイスランド	アイスランド-北京	9000

図 b-1 中国高速鉄道ネットワークの最短経路の計算結果

付録 C 中国高速鉄道ネットワークの脆弱性評価 の手法

C-1 非交差経路

他の研究では、脆弱性の指標として非交差経路数を用いており、ネットワーク内の 2 つのノード間の経路において互いに独立した経路の本数の全組み合わせ数として非交差経路数を定義している [5]。下の図 c-1 を用いて説明する。

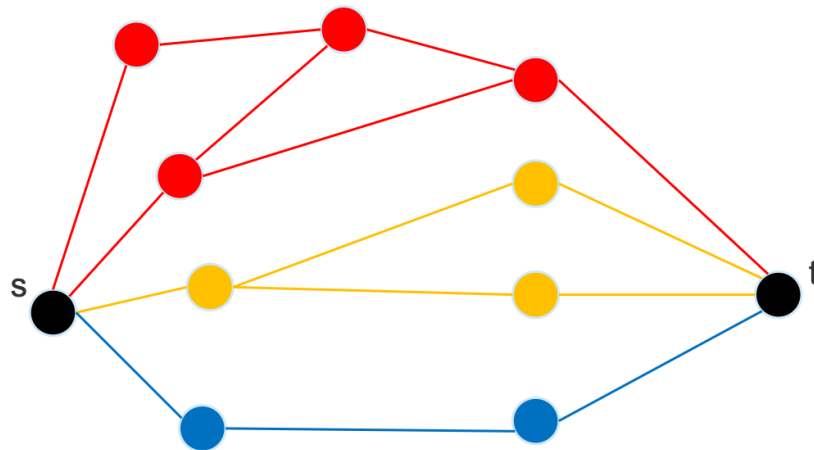


図 c-1 非交差経路数を三本とした時、6通りとなる例

まず、2点sとtを結ぶが途中で互いに干渉しない経路群を見つける必要がある。そのためには、図 2.2 で赤、黄、青の経路群の中に含まれる経路が互いに干渉しないことを確認し、図上の始点と終点の間で独立した経路の本数は3本であることが分かる。次に、各経路群に何本の経路が存在するかを個別に見ている。図から、赤の経路には3本、黄色の経路には2本、青の経路には1本しかないので、3本の自由な組み合わせから、非交差数は $3 \times 2 \times 1 = 6$ 通りとなる。

前に述べた、鉄道事故につながる災害が発生した場合、線路そのものの強度が重要であることを知る必要がある。ネットワーク上の2点間で互いに影響を及ぼさない経路組のうち、非交差経路数を調べると、2点間の接続の強さをある程度反映させることができる。現実的なネットワークとして高速鉄道ネットワーク

全体の脆弱性分析を行うためには、ネットワーク内の任意の 2 点間の非交差経路数を算出する必要があるので、単純な総当たりの数え上で膨大な計算量となり、計算の実施が困難となるため[5]、次章では経路和行列式による非交差経路数の算出方法について説明する。

C-2 経路和行列式による非交差経路の算出手法

効率よく非交差経路数を求める経路和行列の特殊性を利用した数理物理の手法[21]は、対象となるグラフは無閉路・有限・有向なグラフである。以下は正方形列へのマッピングについて説明する。

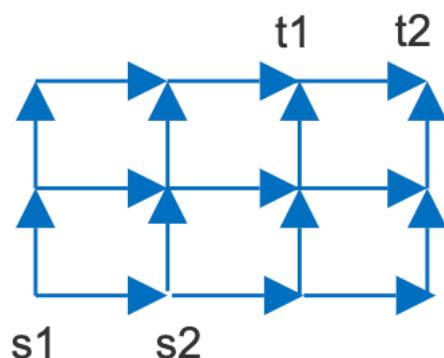


図 c-2 無閉路・有限・有向の平面グラフ

まず、非交差経路数の全組み合わせ数を求めようとした場合、互いに独立した 2 つの始点 (s_1, s_2) と、互いに独立した 2 つの終点 (t_1, t_2) を設定して、下記の図 c-2 に示すように、始点と終点のすべての組み合わせにおける 2 点間の経路数 ($s_1-t_1, s_1-t_2, s_2-t_1, s_2-t_2$) を行列要素とした経路和行列 W を考える。このとき、注意点が四つあり、無閉路・有限・有向、平面グラフを対象とする。有限でも閉路が存在すれば、 s から t に至る途中でそのような閉路に出会って、そこを何度も回ることが可能になるので、無閉路・有限グラフのみを考える。経路和行列 W の行列式 $\det W$ の値が、始点 (s_1, s_2) と終点 (t_1, t_2) 間の非交差経路数が 2 本の全組み合わせ数の値と等しくなるということが分かっている[22]。計算過程を下図 c-3 で示すと、以下のようになる。

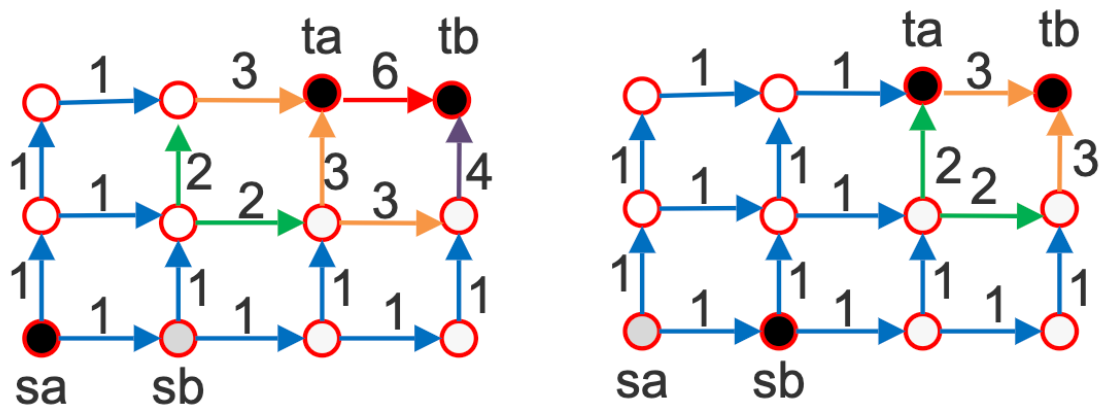


図 c-3 $k=2$ 非交差経路の組み合わせ例

上の最初の図は、 sa から ta 、 tb へすべての経路集合を示し、各ノード w_{ij} を通る次数の伝達[22]を用いて、 $W_{sata}=6$ と $W_{satb}=10$ を計算する。同様に、最後の図では $W_{sbta}=3$ と $W_{sbtb}=6$ となる。 $\det W$ の結果は非交差経路数を与える。

$$W = \begin{pmatrix} s_a t_a & s_a t_b \\ s_b t_a & s_b t_b \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 6 & 10 \\ 3 & 6 \end{pmatrix}$$

$$\det w = \begin{vmatrix} 6 & 10 \\ 3 & 6 \end{vmatrix}$$

$$= 6$$

C-3 中国高速鉄道網のマッピング

前節では、経路隣接行列式を用いた非交差経路数の基本的な計算方法を紹介したが、この計算方法が適用できる条件として、閉路がないこと、有限であること、有向グラフであることが既に知られている[22]。そこで、この問題設定（マッピング）を満足させるために、現実的な高速鉄道網をどう作るかを考える必要がある。

まず、高速鉄道網の特徴をいくつか知っておく必要がある。中国の高速鉄道網

は基本的に地表に作られた限られた輸送施設であり、空間的に路線の立体交差がないため、高速鉄道網の地図は有限の図面と等しいと言える。次に、高速鉄道のネットワーク図では、隣接する駅間を結ぶ線路は 1 本だけであるが、線路上には異なる往復の線路が複数並行している場合がありだと、上記の条件を(部分的に)満たさない。

上記から、中国の高速鉄道網は有限かつ無向のネットワークとして考える。本研究は、ネットワークの局所的な性質を研究しているので、どの頂点の組に代替経路が多いか少ないか、他の条件を考慮しない場合、原理的には、全 M 個のエッジに対して 2^M の方向の組み合わせがある。これは網羅的なアルゴリズムであるため、所要時間は幾何級数的に上昇し、 $O(a^n)$ という指数的な複雑さとなり、その大きさは非多項式であり、コンピュータで計算できない、NP 困難問題となる。そこで、リンクの方向と角度を指定することで、時間計算量を多項式化した。次のような方法を考える: 始点 s と終点 t 間のベクトルを基準として辺の方向を線分ベクトル s から t までと ± 90 度内づけを行っている。この範囲内でそれぞれの方向が進めば、閉路のできない有向グラフとなる。

C-4 提案手法の活用事例

ここで、中国高速鉄道路線網に対して、先のマッピングを施して経路和行列による非交差経路数の算出手法を適用した例を以下の図 c-4 を用いて説明する。

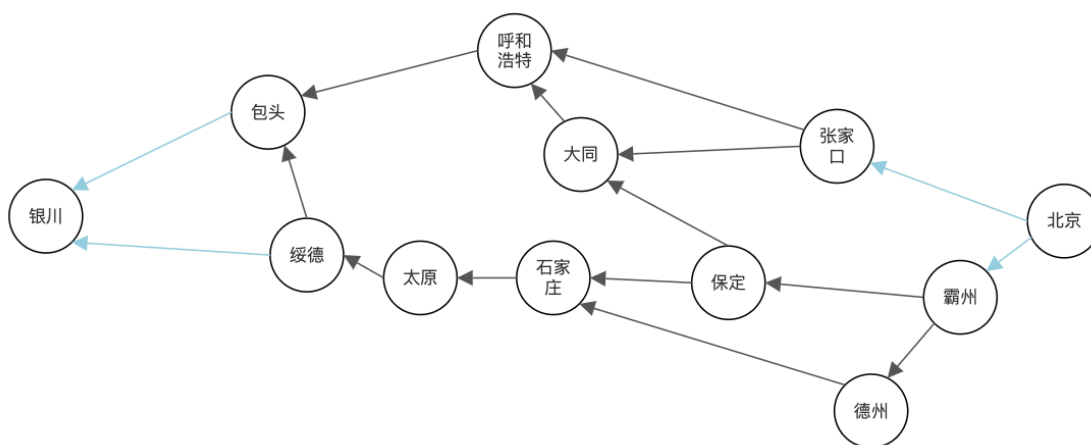


図 c-4 北京—銀川間的高速鉄道網

上記より、 s は北京で、張家口と霸州を隣接ノードとする。 t は銀川で、包頭、绥德を隣接ノードとする。したがって、非交差経路の本数は全部で 2 本あり、

その非交差経路の和行列式は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 W &= \begin{bmatrix} \text{張家口} - \text{包頭} & \text{張家口} - \text{綏徳} \\ \text{霸州} - \text{包頭} & \text{霸州} - \text{綏徳} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 4 \end{bmatrix} \\
 &= 5
 \end{aligned}$$

計算結果によって、非交差経路数は本数 2 本の組み合わせ数が 5 通りとなる。具体的の経路は以下の表 c-1 に示す。

Path-A:	北京-張家口-呼和浩特-包頭-銀川
Path-B:	北京-霸州-保定-石家莊-太原-綏徳-銀川
Path-A:	北京-張家口-呼和浩特-包頭-銀川
Path-B:	北京-霸州-德州-石家莊-太原-綏徳-銀川
Path-A:	北京-張家口-呼和浩特-包頭-銀川
Path-B:	北京-霸州-保定-大同-太原-綏徳-銀川
Path-A:	北京-張家口-大同-呼和浩特-包頭-銀川
Path-B:	北京-霸州-保定-石家莊-太原-綏徳-銀川
Path-A:	北京-張家口-大同-呼和浩特-包頭-銀川
Path-B:	北京-霸州-德州-石家莊-太原-綏徳-銀川

表 c-1 北京—銀川間の非交差経路

付録 D 非交差経路計算結果

経路和行列による非交差経路数の算出手法を、中国高速鉄道網に適用した。以下の図 b-1 は一部のネットワークの非交差経路数を算出した結果を示す（全テーブルの結果は付録の図 b-2 に詳述されている）。

本数；組数	...	許昌	虎門	鄭州	中山	広州	長沙	衡陽
...		2,5294	×	2,5294	2,2	2,1	×	×
許昌	2,334744		2,76582	×	×	×	×	2,3486
虎門	2,9	2,701256		2,76582	2,612	2,294 3,124	×	2,1
鄭州	2,167372	2,1	2,329640		2,1	×	×	2,3486
中山	2,401820	2,13	2,793544	2,1		2,2	2,2	2,488
広州	2,40989	2,1920	2,137298	2,960	2,2294		2,1	2,96
長沙	2,166803	2,370	2,388427	2,185	2,380	2,556		×
衡陽	2,8	2,824920	2,38	2,412460	2,984572	2,120358	2,383638	

図 d-1 中国高速鉄道ネットワークの非交差経路の計算表（一部）

図 b-1 において、右上は隣接ノードが1ホップ先である場合の非交差経路数を示し、左下は隣接ノード2ホップ先に大回り経路の非交差経路数を示している。また、非交差経路が存在しないところは“×”で表示する。2点間の脆弱性は非交差経路数の大きさに反映している。従って、脆弱な地域の一つの特徴は、非交差経路数が少ないか存在しない場合である。

参考文献

- [1]: Lani M'cleod, Richard Vecsler, Yuan Shi, Ekaterina Levitskaya, Sunny Kulkarni, Sergey Malinchik, Stanislav Sobolevsky, Vulnerability of Transportation Networks: The New York City Subway System under Simultaneous Disruptive Events, Procedia Computer Science, Volume 119, 2017, Pages 42-50, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.158>.
- [2] Sitti Asmah Hassan, Hamizah Amalina Amlan, Nor Eliza Alias, Mariyana Aida Ab-Kadir, Nur Sabahiah Abdul Sukor, Vulnerability of road transportation networks under natural hazards: A bibliometric analysis and review, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 83, 2022, 103393, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103393>.
- [3] Yu Gu, Anthony Chen, Songyot Kitthamkesorn, Accessibility-based vulnerability analysis of multi-modal transportation networks with weibit choice models, Multimodal Transportation, Volume 1, Issue 3, 2022, 100029, ISSN 2772-5863, <https://doi.org/10.1016/j.multra.2022.100029>.
- [4] Qing-Chang Lu, Peng-Cheng Xu, Jingxiao Zhang, Infrastructure-based transportation network vulnerability modeling and analysis,

Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,
Volume 584,
2021,
126350,
ISSN 0378-4371,
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126350>.

[5]北川 寛也: 現実のネットワークにおける経路の脆弱性の分析, 2021

[6] Shao Sun, Ge Gao, Ying Li, Xingyan Zhou, Dapeng Huang, Deliang Chen, Yaqun Li,

A comprehensive risk assessment of Chinese high-speed railways affected by multiple meteorological hazards,

Weather and Climate Extremes,

Volume 38,

2022,

100519,

ISSN 2212-0947,

<https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100519>.

[7] 廖 福軒: ネットワークの核とループ形成の密接な関係について, 2020

[8] 中山晶一郎, 朝倉 康夫: 道路交通の信頼性評価, コロナ社, 東京 (2014)

[9] Graham Cox, 2022

Overview of Dijkstra's Algorithm

[10] (Image source <https://www.travelchinaguide.com/china-trains/railway-map.htm>)

[11] 石勇, 许世远, 石纯, et al. 自然灾害脆弱性研究进展 自然灾害学报, 2011, 20(2): 131-137.

[12] 全国鉄道駅データシート・列車時刻表データベースのダウンロード

<http://db.myds.cn/download.aspx>

[13] Jing Zhao, Kai Liu & Ming Wang (2020) Exposure analysis of Chinese railways to multihazards based on datasets from 2000 to 2016, Geomatics, Natural Hazards and Risk

[14] Shao Sun, Ge Gao, Ying Li, Xingyan Zhou, Dapeng Huang, Deliang Chen, Yaqun Li,

A comprehensive risk assessment of Chinese high-speed railways affected by multiple meteorological hazards, Weather and Climate Extremes, Volume 38, 2022

[15] Nijs Jan Duijm,

Recommendations on the use and design of risk matrices,
Safety Science,
Volume 76,
2015,
Pages 21-31,
ISSN 0925-7535,
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.014>.

[16] ISO, 2009. ISO 31000: 2009(E) Risk management – principles and guidelines, first ed. ISO. Geneva.

[17] 佐藤 恵介: 大規模ネットワーク解析・可視化プログラム Pajek (2006)

[18] Intuitive understanding: shortest path between any two points - Floyd's algorithm

https://www.jianshu.com/p/4d40cc525c07

[19] 高速鉄道の地震後の応急処置に関する暫定規定,2019,pages 77

[20] 史培軍: 中国自然災害リスク地図集, 科学出版社,北京 (2003)

[21] Mark Skandera: Introductory Notes on Total Positivity (2003)

[22] 高崎金久: 線形代数とネットワーク, 日本評論社, 東京 (2017)

[23] Asghar Aini, Amir Salehipour,

Speeding up the Floyd–Warshall algorithm for the cycled shortest path problem,

Applied Mathematics Letters,

Volume 25, Issue 1,

2012,

Pages 1-5,

ISSN 0893-9659,

<https://doi.org/10.1016/j.aml.2011.06.008>.

[24] China Railway Corporation

Technical Management Regulations for Highspeed Railway

China Railway Press, Beijing (2017)

(in Chinese)

[25] 中国气象局国家气象情報センター

<http://data.cma.cn/>

[26] 中国科学院資源環境科学データセンター

<https://www.resdc.cn>

[27] Baidu Maps API の利用サイト : <https://lbsyun.baidu.com/>