

階層型道路ネットワーク計画・設計のための 性能目標設定と階層配置に関する考察

後藤 梓¹・中村 英樹²・浅野 美帆³

¹学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 博士後期課程
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-2(651))

E-mail: azusa@genv.nagoya-u.ac.jp

²フェロー会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 (同上)

E-mail: nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学大学院助教 工学研究科 社会基盤工学専攻 (同上)

E-mail: asano@genv.nagoya-u.ac.jp

階層型道路ネットワークの計画・設計においては、旅行時間などの地域・都市間連絡性能に関する目標を達成するように道路の機能的階層区分および階層別目標旅行速度を設定することが極めて重要である。しかしながら現状では、これらの設定方法は経験的に示されるにとどまっており、設定論拠の提示が課題となっている。そこで本稿では、階層型道路ネットワークにおいて実現するトリップの階層構造と旅行時間の関係を整理し、性能目標を満足しつつ最も効率的な拠点間連絡とするための階層数、階層別走行距離、目標旅行速度の最適な組み合わせを導出する方法について理論的検討を行った。また、この手法により理想的な階層構造を実現する完全ネットワークが得られた場合に、これを実際の道路配置に対して適用するときに生じるギャップへの対策例を示した。

Key Words : hierarchical road network, road planning, target performance

1. はじめに

本稿では、階層型道路ネットワークにおいて、より効率的な都市・地域間連絡を行うための道路階層と階層別性能目標の設定について考察する。具体的には、ある都市・地域間を連絡するのに最低限満足すべき目標旅行時間が与えられたとき、これを達成するためには何階層の道路が必要で、それぞれの階層では何km/hの旅行速度でどれだけの距離を走れば良いのかを導出する方法について検討する。

階層型道路ネットワークは、道路に必要な機能を階層ごとに明確化し、トレードオフの関係にあるトラフィック機能とアクセス・滞留機能を別々の階層に分担させることによって、合理的かつ効率的な交通運用を実現することが期待されている。わが国では、中村ら¹⁾によってこのための道路階層区分試案が提案されて以降、階層区分に基づいて道路の設計・運用を行う性能照査手法²⁾についての議論が精力的になされてきた。近年では、階層区分とそれに対応した目標旅行速度に基づいて、道路の

交差形式の設計、沿道アクセス制限などを行うための具体的な検討も進んでいる^{3,4)}など。

しかしながら、道路の階層をどのようにして決めるかや、目標旅行速度がどの程度であるべきかについては、定性的・経験的に示されるにとどまっており、設定根拠を理論的に提示することが現状の課題である。

そこで本稿では、これに応えるための基礎的考察として、道路ネットワークの都市・地域間連絡性能と、道路階層および階層別目標旅行速度との関係を再整理する。最終目標としては、都市・地域間連絡性能の目標値に対して整合性のある、道路階層および階層別目標旅行速度の提示を目指しており、このための手法の妥当性や有用性について、活発な議論を行いたい。

2. どのようにして道路階層・階層別目標旅行速度を決定すべきか？

(1) 拠点間連絡性能目標達成のための階層設定

道路ネットワークの第一義的機能は、ある地点からあ

る地点までの円滑な人流・物流を実現することである。このため、道路の計画・設計は、都市・地域や日常生活圏の中心となる「拠点」間を連絡する性能(以降、拠点間連絡性能)を考慮して行わなければならない。

階層型道路ネットワークにおいても、図-1に示すように、①旅行時間などの拠点間連絡性能に関する目標を達成するように道路階層と階層別目標旅行速度を設定し、その上で②階層別目標旅行速度を達成するように、道路構造や交通運用などを照査することが重要である。このとき、区間・地点レベルで目標旅行速度を達成すれば、それが都市・地域レベルでの目標旅行時間の達成に繋がるといった、一貫性のある道路整備が実現する。

橋本ら⁹⁾は、県庁所在地などを対象に拠点間旅行速度の実態を調査し、拠点間旅行速度の低下の原因には、そもそも必要な階層が未整備であるという①に関する問題と、必要な階層は整備されているが特定区間での著しい遅れなどにより個別階層の性能が確保されていないという②に関する問題の二種類があることを示唆している。別次元の問題に対してそれぞれ適切な対策を行うためにも、上記のような計画・設計の体系化が不可欠である。

(2) 道路階層・目標旅行速度の決定に関する課題

本稿では、上記のうち、①拠点間連絡性能目標を達成するための道路階層と階層別目標旅行速度を提示する方法について考える。ここで、拠点間連絡性能は、階層別走行距離や目標旅行速度との関係が明解な旅行時間によってひとまず評価するものとする。また、その目標値は、国土形成計画や都道府県マスタープランで示される時間交通圏の適用や、利用者ニーズに基づいた設定方法⁹⁾などによって既に設定されている段階を想定する。

道路階層および目標旅行速度決定の根本には、重要度の高い大規模拠点ほど、目標旅行速度の高い上位階層で連絡すべきという考えがある。このような拠点ほど、拠点間の距離が長い一方、旅行時間短縮による経済的・社会的効果が大きいためである。ドイツの交通ネットワーク計画指針であるRIN(2008)⁷⁾では、この考えに基づいて、拠点を大都市から個別施設/敷地まで6段階にレベル分けし、どのレベルの拠点を接続するかによって道路階層を決定、これと沿道状況との組み合わせによって目標旅行速度を定めている。わが国の道路階層区分試案¹⁾も、この枠組みを踏襲したものとなっている。

しかし、この前提のもとで道路階層・目標旅行速度を決定するには、以下に述べる2つの課題が残る。

a) 起終点へのアクセス/イグレスをスムーズに行うには何階層必要なのか？

例えば、中村らによる階層区分試案によれば、300km程度の大都市間連絡には、都市間高速道路を用いること

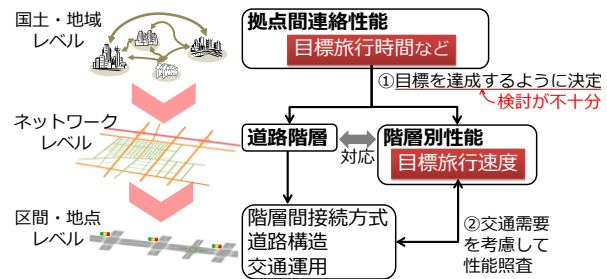


図-1 階層型ネットワーク計画・設計の流れ

となっている。しかしながら、現実にはトリップの起終点が高速道路のインターに直結していることは殆どあり得ず、インターまでのアクセス(イグレス)に一般道を走行する必要がある。実際問題として、この一般道区間がうまく階層化されていないことによる拠点間旅行時間への影響は大きい。従って、このような起終点へのアクセス/イグレスをどのように階層化すべきかについて明確にすることが重要である。

RINでは、都市間高速道路から都市中心部までの距離に応じて、高速道路にアクセスするための道路階層を決定しているが、ここで用いる距離の閾値については、実際の拠点分布から経験的に設定しており、拠点間旅行時間などとの関連は不明確である。

b) どのようにして階層別目標旅行速度を決定するのか？

現在提示されている階層別目標旅行速度は、いずれも道路階層区分に対応するように経験的に設定されたものであり、2.(1)で述べたような目標拠点間旅行時間との整合性については充分検証されていない。

下川ら²⁾は、対象とする複数の拠点間について、目標旅行時間とこれを構成する各拠点間の階層別道路延長の関係から、連立方程式を解く要領で各階層の目標旅行速度を導出することで整合性を持たせるとしているが、a)で述べたようなアクセス/イグレス区間について何階層存在すべきかが明確でない場合には、この方法の適用は困難である。

(3) 完全ネットワークを考慮した決定方法の提案

以上の課題を踏まえて、本稿では、拠点間を最も効率的に連絡するには、トリップの起点から終点までの経路がどのような階層構造になっているべきかをまず考え(3章)、これを実現する理想的な完全ネットワークとの対応関係をみることによって、道路階層と目標旅行速度を決定する(4章)方法を提案する。

3. トリップの階層構造はどうあるべきか？

(1) トリップの階層構造

トリップの起点から終点までには、アクセス/イグレス、集散、通過といった段階があり、それぞれが異なる道路機能を要する。これを実現する理想的なネットワークを模式化すると、図-2のようになる。ただし、図-2では、起終点の拠点が同等の性質を持ち、アクセス・イグレスでの階層構造は対称形であることを仮定している。

拠点間の移動に迂回が生じないことが理想的であるから、拠点間は(a)のように直線で結ぶものと仮定する。旅行速度は、各階層において目標旅行速度が達成されている状態を想定し、(b)のように階段状に変化する。このとき、階段の段数が階層数、各段の長さが各階層を走行する距離、高さが目標旅行速度をそれぞれ示している。ここで、階層数を k 、トリップ中で階層 i の走行距離(アクセスとイグレスの総和)を x_i とおくと、拠点間距離 X は次式(1)で表せる。

$$X = \sum_{i=1}^k x_i \quad (1)$$

また、階層 i の目標旅行速度を v_i とおくと、拠点間距離 X を連絡するのに要する拠点間旅行時間 T は式(2)で求められる。このときの距離と時間の関係を模式化すると図-2(c)のようになる。従って、目標旅行時間 T_{target} を達成するためには、階層数 k 、目標旅行速度 v_i 、走行距離 x_i の組み合わせを $T \leq T_{\text{target}}$ となるようにすればよい。

$$T = \sum_{i=1}^k \frac{x_i}{v_i} \quad (2)$$

さらに、上記を満たす組み合わせのうち、最も効率的な階層構造を導出するため、建設費用 C_c を式(3)で表し、これを最小化する。 $f(v_i)$ は、階層 i の道路を1単位あたり建設するのに必要な費用を算出する関数である。ここではトラフィック機能向上にかかる費用のみを考慮し、 $f(v_i)$ は v_i に対して増加関数とする。

$$\min C_c = \sum_{i=1}^k f(v_i) \cdot x_i \quad (3)$$

以上のように求められる最も効率的なトリップの階層構造を実現するネットワークを完全ネットワークとする。

(2) 各変数の定義域および境界条件

トリップの階層構造は、道路ネットワークを走行した結果として形成されるものであるため、各変数には現実的に設定可能な定義域と境界条件が存在する。

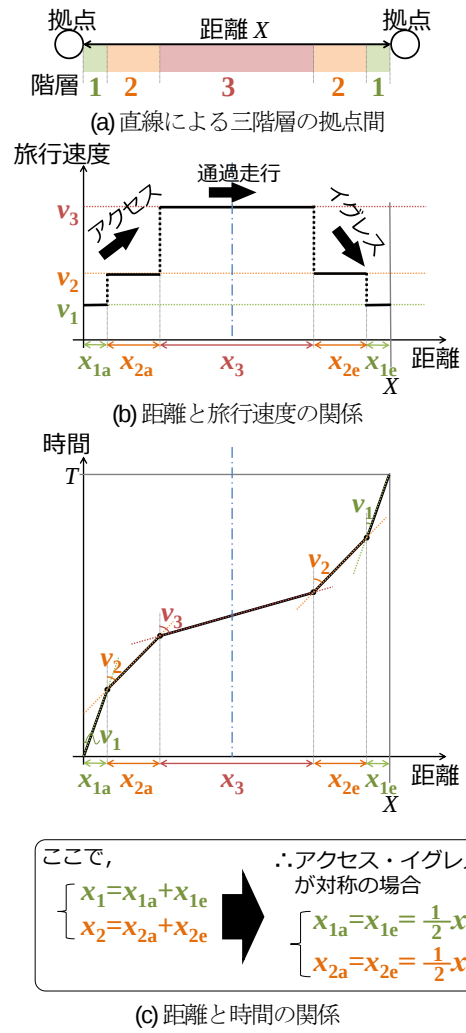


図-2 拠点間トリップの理想的な階層構造の例

a) 階層数 k

階層数 k は、その拠点間を連絡するのに必要な階層型ネットワークの道路階層の数に対応する。起終点に接続する階層は階層1である。最も使用階層の多い長距離トリップを想定しても、生活道路から高速道路まで六階層程度までが現実的と考えられる。

b) 階層 i の目標旅行速度 v_i

階層 i の目標旅行速度 v_i は、そこで担うべき機能と対応関係にあり、 i が大きい上位階層ほど v_i は大きくなるものとする。また、この値は道路構造・交通運用などを決定する際の目標値であることから、10~100[km/h]程度の範囲内で、10[km/h]刻みに丸めた値となる。

c) 階層 i の走行距離 x_i

階層 i の走行距離 x_i は、ネットワークにおける階層 i の網間隔あるいは網密度を決定する変数である。階層 i がアクセス/イグレスに使用される($i < k$)のとき、 x_i は次の階層に接続するまでに走行しなければならない距離を意味し、この値は階層($i+1$)の間隔 d_{i+1} を左右する。なるべく早く上位の階層に移る経路が理想的であるから、階層($i+1$)まで

の走行距離の和が、 d_{i+1} より小さくなるように網間隔を設定することになる。

d) 境界条件

①階層1の目標旅行速度 v_1 : 階層1は起終点に接続する道路のため、沿道施設から出入を行うアクセス性を担保して、目標旅行速度 v_1 を所与とする。この値は、接続する拠点のレベルに応じて、生活圏中心のような小規模拠点に接続する階層では10~20[km/h]程度、大都市の県庁所在地などの大規模拠点に接続する階層では40[km/h]程度を想定できると考えられる。

②階層間の最大速度差 $dv_{(i,i+1)}$: 急な速度変化を避けるため、階層 i と階層 $(i+1)$ の速度差 $dv_{(i,i+1)} = v_{i+1} - v_i$ には上限を設けるものとする。これにより、 v_i が決まれば v_{i+1} の最大値 v_{i+1max} が決定する。ただし、最大速度差は、階層間の交差形式を考慮して設定する必要がある。例えば、 $v_i=20$ [km/h]の場合、次の階層とは平面交差が一般的であるため、 $dv_{(i,i+1)}=20$ [km/h]、 $v_{i+1max}=20+20=40$ [km/h]程度とするのが妥当であるのに対し、 $v_i=60$ [km/h]の場合、次の階層とは立体交差があり得るため、 $dv_{(i,i+1)}=40$ [km/h]、 $v_{i+1max}=60+40=100$ [km/h]程度まで許容してよいだろう。

③最小走行距離 x_{imin} : 階層 i の網間隔には、これ以上密の状態は実現できない最小値が存在すると考えられる。この最小間隔を設定することにより、階層 i の最小走行距離 x_{imin} を制約することとする。この値は上位階層ほど大きくなり、目標旅行速度 v_i に依存すると考えられるが、現実的な値の設定方法については今後検討が必要である。

(3) 二階層によるトリップの階層構造の例

本節では、最も単純なケースについて、変数の最適な組み合わせを導出する方法を検討する。今回は、図-2のようにトリップ階層構造が左右対称で、かつ二階層のみで接続されている場合を考える。トリップ階層構造が左右対称であることから、これ以降は距離-時間関係の前半部分のみを模式化して示すこととする。このとき、拠点間距離 X 、拠点間旅行時間 T 、階層 i の走行距離 x_i はすべて2分の1となることに注意されたい。

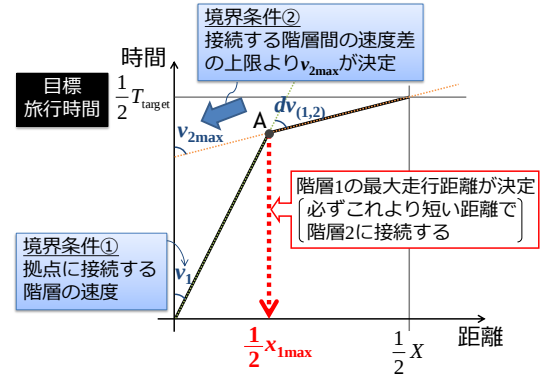
a) 最適化の範囲

3.(1)で示した拠点間距離(式(1))および旅行時間(式(2))の計算式から、拠点間旅行時間が目標値と等しいとき、次式(4)が成立する。

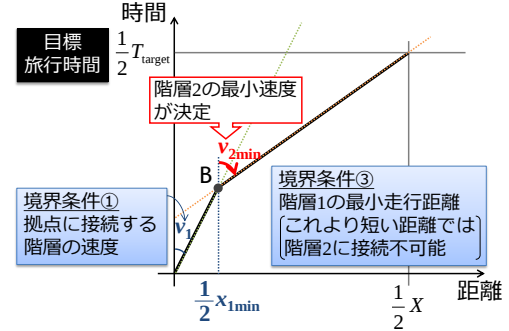
$$T_{\text{target}} = \frac{x_1}{v_1} + \frac{(X - x_1)}{v_2} \quad (4)$$

また、3.(2)d)に記述した境界条件を二階層の場合に適用すると、以下の通りとなる。

境界条件①: 階層1の目標旅行速度 v_1 は所与。



(a) 最大速度による境界点



(b) 最小間隔による境界点

図-3 階層1・2の組み合わせの境界条件と旅行時間の関係

境界条件②: 階層1と階層2の最大速度差 $dv_{(1,2)}$ より、階層2の目標旅行速度 v_2 の最大値 v_{2max} が所与。

境界条件③: 階層2の最小間隔から、階層1の最小走行距離 x_{imin} が所与。

まず、境界条件①を式(4)に代入することで、変数は x_1 、 v_2 のみとなり、この2変数の組み合わせを最適化する問題に帰着する。さらに境界条件②と③をそれぞれ重ね合わせるにより、2変数がとるべき最大値・最小値の境界点を以下のように求めることができる。

境界点A: 境界条件①・②を重ね合わせると、図-3(a)に示す点Aで階層1から階層2に移行することとなり、式(5)のように階層1の最大走行距離 x_{1max} が決定する。これは、階層2の延長が短い代わりに、その走行性能を最高水準とした場合の階層構造を示している。

$$x_{1max} = \frac{v_1(v_{2max}T_{\text{target}} - X)}{v_{2max} - v_1} \quad (5)$$

境界点B: 境界条件①・③を重ね合わせると、階層1から階層2への移行は図-3(b)に示す点Bで起こり、式(6)のように階層2の最小目標旅行速度 v_{2min} が求まる。これは、図-3(a)とは対照的に、階層2の性能を低くする代わりに、その延長を最も長くした場合の階層構造である。

$$v_{2\min} = \frac{v_1(X - x_{1\min})}{v_1 T_{\text{target}} - x_{1\min}} \quad (6)$$

この境界点A, Bを同一のグラフ上に描いたものが図-4(a)であり, このときの x_1 と v_2 の関係を描くと図-4(b)のようになる. ここに示したAからBの範囲内で, 建設費用(式(3))が最小となる x_1 と v_2 の組み合わせを導出することになり, 非線形の最適化問題となるものと考えられる.

本例では, 拠点間を二階層で接続することを想定したが, 同様にして上位階層を積み上げていくことで, 三階層以上の階層構造の最適化も行い, 各階層数での最適解による建設費用を比較することで, 何階層が最も効率的かが求められると考えられる.

b) ネットワーク性能目標との関係

これまででは, 目標拠点間旅行時間が既に与えられているものとして, これを達成するための階層構造のあり方についての検討を行ったが, この逆の作業として, 各階層において実現し得る最高目標旅行速度 $v_{\max}$ と最小道路間隔による最小走行距離 $x_{1\min}$ を仮定すれば, 図-5の要領で, 実現し得る最短の拠点間旅行時間 $T_{\min}$ は式(7)のようになる. これにより, 拠点間連絡性能目標 T_{target} の下限値を求めることが可能である.

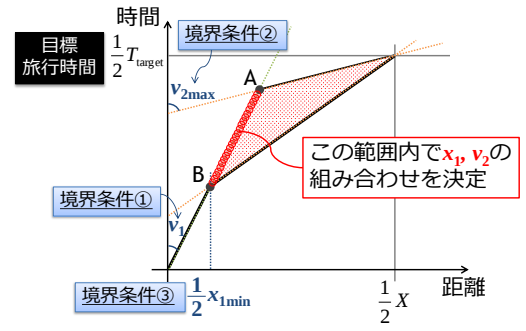
$$T_{\min} = \frac{x_{1\min}}{v_1} + \frac{X - x_{1\min}}{v_{2\max}} \quad (7)$$

4. 実ネットワークへの適用

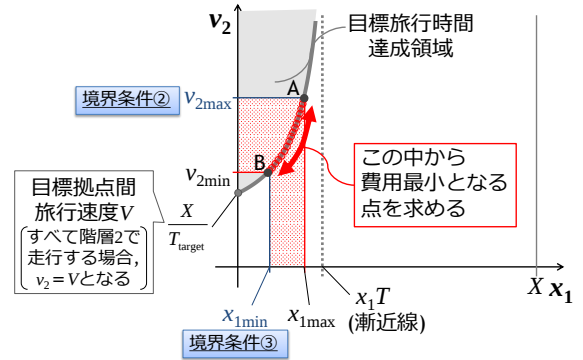
前章では, トリップの階層構造を最適化する完全ネットワークを用いて, 必要な道路階層数と目標旅行速度を導出する方法について検討した. しかしこれは, 3.(1)で述べた通り拠点間の直線連結を前提としており, 費用制約や地形制約の存在する実ネットワークにおいてこれを実現することは不可能である. その結果, 理想と現実の間には図-6のようなギャップが生じる.

図-6は, 理想的には上図のように階層1と階層2の二階層で直線的に連絡するネットワークが, 現実と対応させた場合には下図のようになり, 階層2に接続するのに迂回が生じてしまった例を示している. このとき, たとえ階層1, 階層2の目標旅行速度 v_1, v_2 が達成されようとも, 総走行距離が X ではないため, 階層1, 階層2の走行距離 x_1, x_2 の理想状態が保たれず, 従って目標旅行時間も満足されないことになってしまう.

このため, 実ネットワークへの適用の際には, 完全



(a) 時間-距離関係



(b) x_1 と v_2 の関係

図-4 最適化の範囲

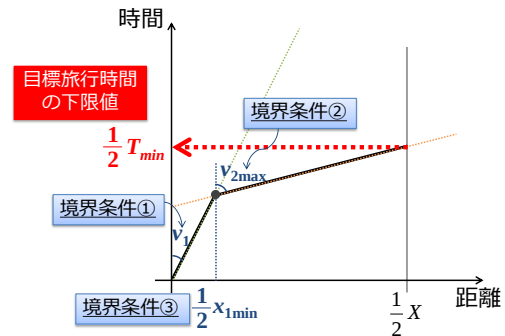


図-5 目標旅行時間の下限値の導出

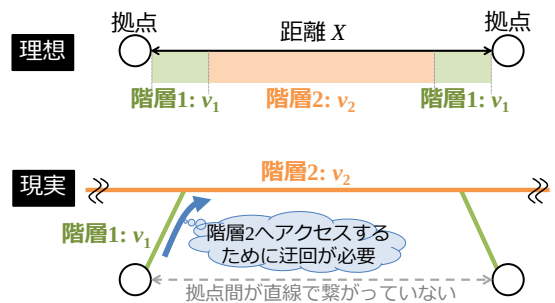


図-6 理想と現実のギャップの典型例

ネットワークと現実の道路配置のギャップにより生じる拠点間旅行時間の差をチェックし, これを埋めるための対策を行う必要がある. 例えば, 図-7(a)は, 階層2の目標旅行速度 v_2 を, 該当区間のみ増大させることで対処している. また, 階層2の目標旅行速度の増大に限界がある場合には, (b)のように階層の設定自体を見直し, それに伴って階層区分が変更された区間において, 新たな

目標旅行速度を達成するための交差形式変更やアクセス制限などを行う方法もあり得よう。どのような対策を行うかは、地域特性や沿道状況などを考慮した上で柔軟に検討することが望ましい。

5. おわりに

本稿では、拠点間連絡性能である目標旅行時間に基づき、最適な道路階層構造を導出するための理論的手法を提案した。二階層による単純な例では、目標を達成可能な階層別走行距離および目標旅行速度の組み合わせの範囲を特定することができ、この範囲内で建設費用を最小とすることで最適解が求められる可能性があることがわかった。しかし実際に解の導出を行うためには、費用関数の設定や非線形問題に対する最適化手法の検討を行う必要があり、これを今後の課題とする。また、境界条件の妥当性についても慎重に議論する必要がある。

今回は連絡する二拠点が同等の性質を持つ場合を想定し、階層構造が対称に表せると仮定したが、起終点の拠点の規模・重要度が異なる場合には、このような簡略化が不可能であると考えられる。また、複数拠点の各ODに対して完全ネットワークを導出した後に、これをどう組み合わせるかで階層数や配置を最適化するかは大きな課題である。これらについて、段階的に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 中村英樹, 大口敬, 森田緯之, 桑原雅夫, 尾崎晴男: 機能に対応した道路幾何構造設計のための道路階層区分の試案, 土木計画学研究・講演集, Vol. 31, CD-ROM, 2005.

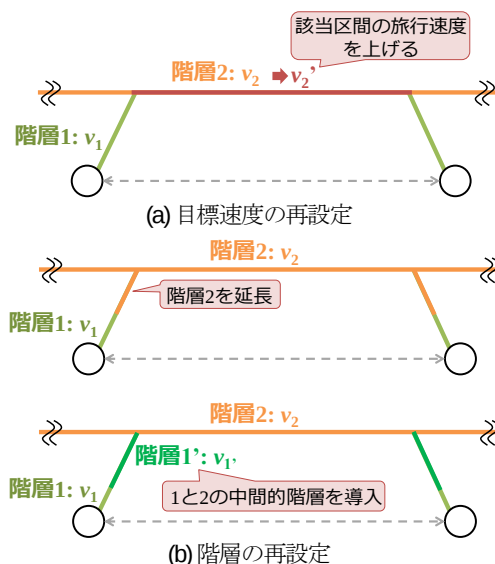


図-7 ギャップを埋めるための対策例

- 2) 下川澄雄, 内海泰輔, 野中康弘, 中村英樹, 大口敬: 道路の階層区分を考慮した性能照査手法の意義と課題, 土木計画学研究・講演集, Vol. 45, CD-ROM, 2012.
- 3) 高橋健一, 松本幹一, 山川英一, 阿部義典: 性能照査型道路設計における交差・出入制限と階層区分道路の実現に向けた課題, 土木計画学研究・講演集, Vol. 43, CD-ROM, 2011.
- 4) 阿部義典, 柳沢敬司, 高橋健一, 渡部数樹: 現状道路の問題点の体系的整理と階層化による問題解決へのアプローチ, 土木計画学研究・講演集, Vol. 45, CD-ROM, 2012.
- 5) 橋本雄太, 小林寛, 山本彰, 上坂克己: 都市間道路のサービス水準の実態と道路階層性評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 45, CD-ROM, 2012.
- 6) 船田尚吾, 長尾慎一郎, 内海泰輔, 手塚誠, 中村英樹: 道路利用者ニーズに基づく道路交通の目標サービス水準設定方法, 土木計画学研究・講演集, Vol. 43, CD-ROM, 2011.
- 7) Forschungsgesellschaft für Straßen -und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung RIN, 2008.

(?)

A Study on the Target Performance Setting and Its Allocation Policy for the Hierarchical Road Network Planning and Design

Azusa GOTO, Hideki NAKAMURA and Miho ASANO

At the planning stage of hierarchical road network, hierarchical road levels and their target travel speeds must be determined so that the target performance of network (i.e., travel time connecting important places) can be achieved. However in Japan, the existing proposal for the target travel speed settings is only based on the empirical background, thus achievement of the network target performance is not guaranteed. Therefore, in this study, the relationship between a movement hierarchy and travel time realized in the hierarchical network is systematically summarized. Based on this relationship, a theoretical methodology to optimize the combination of the number of road levels, travel distances and target travel speeds on individual road levels is discussed. By using this methodology, the ideal network which can achieve the target travel time and simultaneously minimize the construction cost is expected to be obtained. Additionally, some examples are shown in order to adapt the ideal network into the real road allocation.