

縦断勾配が速度に与える影響 に関する実証分析

近田 博之¹・邢 健²

¹正会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）（〒460-0003 名古屋市中区錦1-8-11）

E-mail: h.konda.a@c-nexco-hen.jp

²正会員 （株）高速道路総合技術研究所（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）

E-mail: xing@ri-nexco.co.jp

旅行速度はトラフィック機能が卓越した都市間高速道路の交通性能を示す代表的な指標のひとつである。性能照査型道路計画設計を都市間高速道路で適用するためには、区間旅行速度の推定が不可欠であり、道路交通環境別に速度性能曲線を整備する必要がある。しかし道路幾何構造が車両の旅行速度に与える影響が十分解明されていないなど、速度性能曲線を整備する上で取り組むべき課題を多い。

そこで本稿では、縦断勾配による走行速度への影響に着目し、全車両を把握可能な車両感知器の地点速度を使い、縦断勾配や勾配区間長が車両感知器で観測される地点速度に与える影響を分析し、性能照査型道路の計画設計手法への適用のための基礎資料を提供することを目的とする。

Key Words : speed, heavy vehicles, intercity expressway, traffic flow, road planning and design

1. はじめに

旅行速度はトラフィック機能が卓越した都市間高速道路の交通性能を表す指標のひとつである。性能照査型道路計画設計を都市間高速道路に適用するにあたっては、交通状態別の旅行速度（速度性能曲線）を整備することが不可欠である。旅行速度はフローティング調査やプローブデータで観測できるが、サンプル数が乏しいために交通状態別に速度性能曲線を整備することは現状困難である。一方で車両感知器で得られる速度データは、地点速度であるもののサンプル数は豊富にあるため、車両感知器の地点速度を旅行速度に変換できれば、交通状態別の速度性能曲線を整備することが可能である。しかし、急な縦断勾配が車両走行速度に影響を与えることは知られているが、定量化の検証は十分でないのが現状である。

そこで本稿では、車両感知器の地点速度データを旅行速度に変換する上で重要な要素である縦断勾配と速度の関係について分析し、性能照査型道路の計画設計手法への適用のための基礎資料とすることを目的とする。

2. 既往研究のレビュー

内海・浜岡・中村¹⁾は、往復分離2車線自専道につい

て、大型車混入率、降雨量、冬期路面、付加車線、縦断勾配が車両感知器データから得られる85percentile速度に与える影響を分析し、15分間交通流率、大型車混入率、降雨量を説明変数とする速度性能曲線を定式化した。

洪・大口²⁾は、多車線高速道路について、車両感知器のデータを使い、道路条件（平面・縦断線形、規制速度、車線数）、交通条件（交通量、大型車混入率）、降雨条件（降雨量）が85percentile速度と車線選択率に与える影響を考慮し、車線ごとの速度推定モデルと車線選択率推定モデルを構築した。また、平面・縦断線形については、観測地点だけでなく上流の影響を考慮できる新たな道路線形指標（有効平面曲率、有効縦断勾配）を理論的な手法を用いて提案している。

このように、都市間高速道路の速度性能曲線に関する研究は既になされており、理論的な手法を用いて交通状態別の速度性能曲線は整備されている。一方で、道路線形条件とりわけ縦断勾配と速度の関係について実証的な分析や検証が十分できていない。

3. 分析概要

(1) 分析方法

本稿では、中日本高速道路株から貸与して頂いた車両

感知器データ（5分）と道路線形データを用いて、縦断勾配が速度に与える影響について分析する。車両感知器データは、感知器エラーと渋滞や事故などの影響を排除するため、QV図のプロット状況を確認した上で片側断面速度が70km/h以下のデータを除外した。速度データは片側断面の速度とし、交通量を20台/5分毎、大型車混入率を10%毎、昼夜（昼間：8時~16時、夜間：20時~翌4時）のカテゴリ毎の15percentile値と85percentile値をとした。本稿では、既往研究と同じ85percentile速度だけでなく、速度のレンジを確認するため15percentile速度についても整理している。なお、速度データは各カテゴリのサンプル数が20以上であることを条件とした。

(2) 分析条件

a) 分析対象箇所

分析対象箇所は、データが収集できた名古屋支社管内の名神高速道路（24地点）と中央自動車道（34地点）および八王子支社管内の中央自動車道（5地点）の計63地点である。選定した63地点は、縦断勾配が3%を超える起伏が大きい規制速度80km/h区間であり、分合流が速度に与える影響を排除するために前後1km内にIC、JCT、SA、PAなどの施設がない単路部であること、自動速度取締装置が前後1km内にないことを選定条件とした。

b) 分析対象期間

分析対象期間は、2012.1.1~2012.12.31の1年間とした。なお、特異な期間である交通混雑期（年末年始、ゴールデンウィーク、お盆）と名神集中工事期間（5月中旬~5月下旬）は分析対象期間から除外している。

4. 縦断勾配が速度に与える影響

本章では、縦断勾配と速度の関係についてマクロ的な分析と、坂路長を固定し縦断勾配が速度に与える影響と縦断勾配を固定し坂路長が速度に与える影響について分

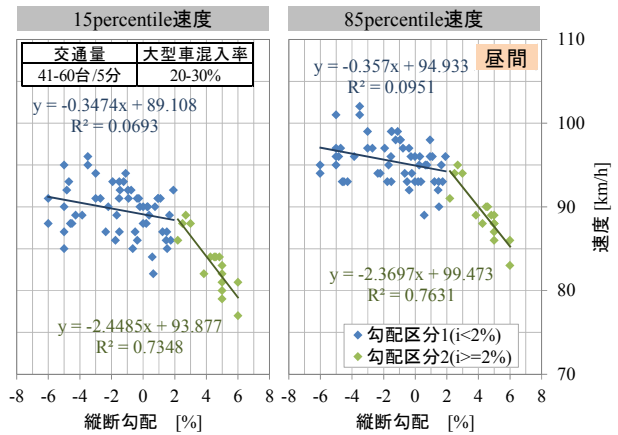


図-1 縦断勾配と速度の関係（昼間）

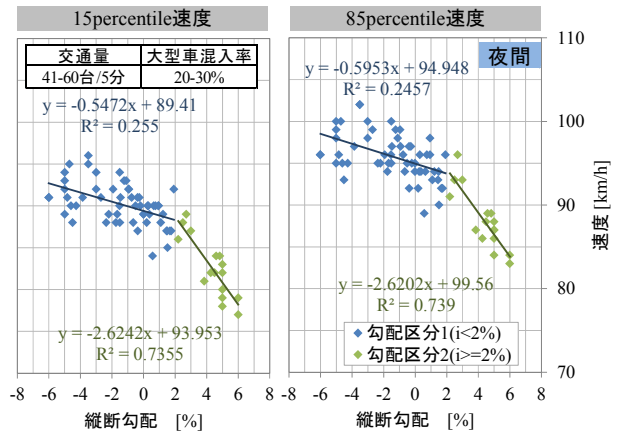


図-2 縦断勾配と速度の関係（夜間）

表-1 縦断勾配と速度の関係（全カテゴリ）

交通量 (台/5分)	大型車 混入率 (%)	昼間（9時~16時）				夜間（20時~翌4時）			
		15percentile速度		85percentile速度		15percentile速度		85percentile速度	
		i < 2%	i ≥ 2%	i < 2%	i ≥ 2%	i < 2%	i ≥ 2%	i < 2%	i ≥ 2%
41-60	0-10%	-0.2922	-2.0564 **	-0.4268 *	-2.3084 **	-0.4930 **	-2.4713 **	-0.3911 *	-2.5183 **
	10-20%	-0.2861	-2.4854 **	-0.3757 *	-2.0826 **	-0.5468 **	-2.4130 **	-0.5348 **	-2.6906 **
	20-30%	-0.3474 *	-2.4485 **	-0.3570 *	-2.3697 **	-0.5472 **	-2.6242 **	-0.5953 **	-2.6202 **
	30-40%	-0.3602 *	-2.7518 **	-0.4298 **	-2.5296 **	-0.5814 **	-2.9020 **	-0.5937 **	-2.7494 **
	40-50%	-0.3850	-2.6583 *	-0.4761 *	-1.8087 *	-0.5616 **	-2.9478 **	-0.6108 **	-2.8368 **
	50-60%	-0.0922		-0.3657		-0.5582 **	-2.6805 **	-0.6321 **	-3.0209 **
	60-70%					-0.6424 **	-2.7770 **	-0.7054 **	-2.6081 **
	70-80%					-0.6237 **	-2.7784 **	-0.6909 **	-2.7650 **
	80-90%					-0.6532 **	-2.8554 **	-0.7098 **	-2.7186 **
	90-100%					-0.5828 **	-2.7102 **	-0.6696 **	-2.6214 *
81-100	0-10%	-0.4101 **	-1.9803 **	-0.4633 **	-2.0674 **	-0.6143 **	-2.6218 **		
	10-20%	-0.4276 **	-2.3568 **	-0.4337 **	-2.1334 **	-0.6254 **	-2.4402 **	-0.5657 **	-2.7968 **
	20-30%	-0.4829 **	-2.5115 **	-0.4501 **	-2.3451 **	-0.5481 **	-2.6865 **	-0.5396 **	-2.4505 **
	30-40%	-0.4520 **	-2.2266 **	-0.4692 **	-2.0960 **	-0.5384 **	-2.4579 **	-0.6167 **	-1.8949 **
	40-50%	-0.4124 *	-2.2684 **	-0.4117 **	-1.1849	-0.6228 **	-2.3780 **	-0.6460 **	-2.3977 **
	50-60%	-0.7398 **		-0.7279 **		-0.6327 **	-1.9105 **	-0.6806 **	-1.9333 **
	60-70%					-0.6537 **		-0.6482 **	
	70-80%					-0.7384 **		-0.8574 **	
	80-90%					-0.5543 *		-0.7521 **	
	90-100%					-0.5543		-0.7340 **	
121-140	0-10%	-0.4862 **	-2.2452 **	-0.5083 **	-2.1184 **	-0.6817 *		-0.7835 **	
	10-20%	-0.5823 **	-2.3307 **	-0.5549 **	-2.3849 **	-0.9303 **		-0.6635 **	
	20-30%	-0.5778 **	-1.4782 **	-0.5158 **	-1.0595 *	-0.9812 **		-1.0713 **	
	30-40%	-0.7261 **		-0.6865 **		-0.9856 **		-0.9813 **	
	40-50%	-0.7403 **		-0.8705 **		-0.7125			
	50-60%							-1.0875 **	
	60-70%					-0.9817 *		-1.2654 **	
	70-80%					-0.7446		-1.1809 **	
	80-90%					-0.7314 **		-0.9403 **	
	90-100%								
161-180	0-10%	-0.6813 **	-2.1583 **	-0.6808 **	-2.0357 **				
	10-20%	-0.5987 **	-2.3178 **	-0.5052 **	-2.0802 *	-1.2910 **		-1.1658 **	
	20-30%	-0.6499		-0.6998					

*有意水準5%で有意, **有意水準1%で有意

析する。

(1) 縦断勾配と速度の関係

本節では、前章で述べた全 63 地点を分析対象とする。

図-1 と図-2 は、63 地点の車両感知器の縦断勾配と速度の関係を示しており、「1プロット=1 感知器」である。集計条件は交通量が 41-60 台/5 分、大型車混入率が 20-30%となっており、各々15percentile 値と 85percentile 値に分けてグラフ化した。また、図-1 は昼間、図-2 は夜間のデータを使っている。

図-1 と図-2 をみると、縦断勾配 2%を境界にプロットの右下がりの度合いが異なっており、さらに「NEXCO 設計要領」³⁾にある 20t 普通トラックの車両走行性能パラメータを使うと、縦断勾配 2%では殆ど速度低下しないことを考慮し、縦断勾配 2%未満（青）と縦断勾配 2%以上（緑）に区分し線形回帰した。

図-1 の 15percentile 速度と 85percentile 速度をみると、縦断勾配 2%未満の傾きは-0.3 程度（-0.3474 と-0.3570）であるが、縦断勾配 2%以上の傾きは-2.4 程度（-2.4485 と-2.3697）になっており、縦断勾配 2%以上は 2%未満に比べ傾きが大きい。このことから縦断勾配 2%以上は、速度が顕著に低下するといえる。

図-1 と図-2 で昼夜の比較をすると、縦断勾配 2%以上の場合において、夜間の傾き（-2.6242 と-2.6202）は、昼間の傾き（-2.4485 と-2.3697）に比べ大きく、夜間は昼間に比べ速度低下が顕著といえる。これはドライバーが夜間の暗い中の走行により縦断勾配の変化に気づかず、アクセルワークをせずに運転したことが一因と推察される。

表 1 は、図-1 と図-2 と同様の分析を交通量と大型車混入率のカテゴリ別に、回帰式の傾きを集計した結果である。表 1 の各カテゴリの回帰式の傾きをみると、縦断勾配 2%未満（-1.2910~-0.4930）は統計的に有意になるものの、縦断勾配 2%以上（-1.9105~-3.0209）に比べ回帰式の傾きは小さく、どのカテゴリにおいても図-1 と図-2 の結果と同じ傾向がみられた。このことから、2%未満の縦断勾配では車両走行速度への影響が小さく、縦断勾配 2%以上になると、速度低下が顕著になるといえる。また、同一勾配における速度のばらつきは勾配区間長が影響要因の一つと考えられる。なお、表中の空白は「サンプルが無い」もしくは「線形回帰のサンプル数が 10 以上確保できなかった」カテゴリである。

(2) 同じ坂路長の縦断勾配が速度に与える影響

本節では前記 63 地点の車両感知器のうち、図-3 に示す 5 地点を分析対象とする。図-3 では、分析対象の 5 地点の車両感知器の設置位置を縦断図上に示している。図-3 をみると、車両感知器は-5.00%~+5.00%の縦断勾配区間で、図中の寸法線で示す坂路長（縦断勾配の変化点か

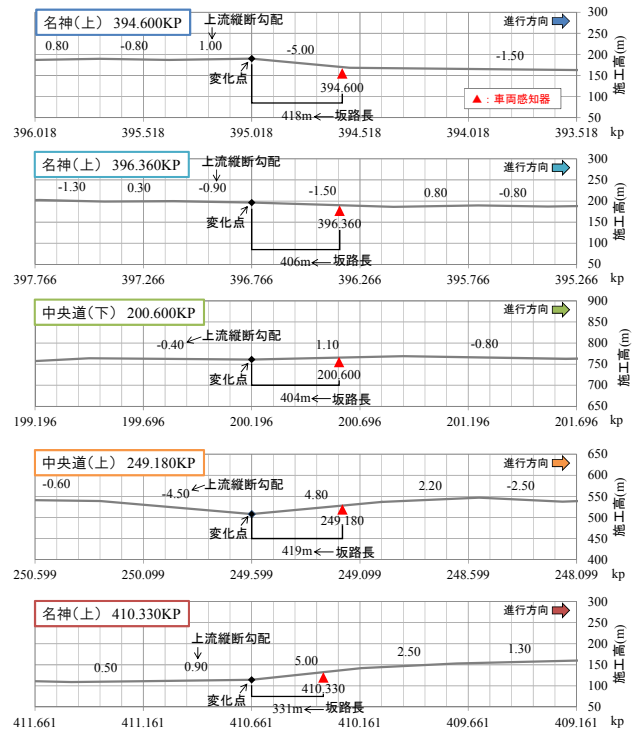


図-3 分析対象箇所（同一坂路長における縦断勾配の影響）

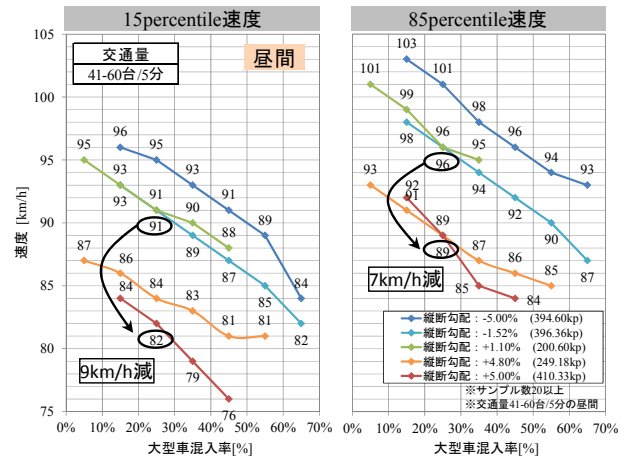


図-4 大型車混入率別にみる縦断勾配と速度の関係

ら車両感知器までの距離）が概ね 300-400m の位置に設置されている。また、中央道（上り）の 249.18kp 以外は、車両感知器が設置されている縦断勾配区間の上流側の縦断勾配（上流縦断勾配）が±1%以内となっている。

図-4 は、交通量が 41-60 台/5 分、昼間のデータを使い、縦断勾配が異なる 5 地点の 15percentile 速度と 85percentile 速度を大型車混入率 10%毎に描いたものである。

15percentile 速度のグラフをみると、大型車混入率が 20~30%において、縦断勾配が-5.00%（青）では 95km/h、縦断勾配が-1.52%（水色）と+1.10%（緑）では 91km/h、縦断勾配が+4.80%（橙）では 84km/h、+5.00%（赤）では 82km/h となっている。85percentile 速度においても、縦断勾配が-5.00%では 101km/h、縦断勾配が-1.52%と+1.10%では 96km/h、縦断勾配が+4.80%と+5.00%では 89km/h とな

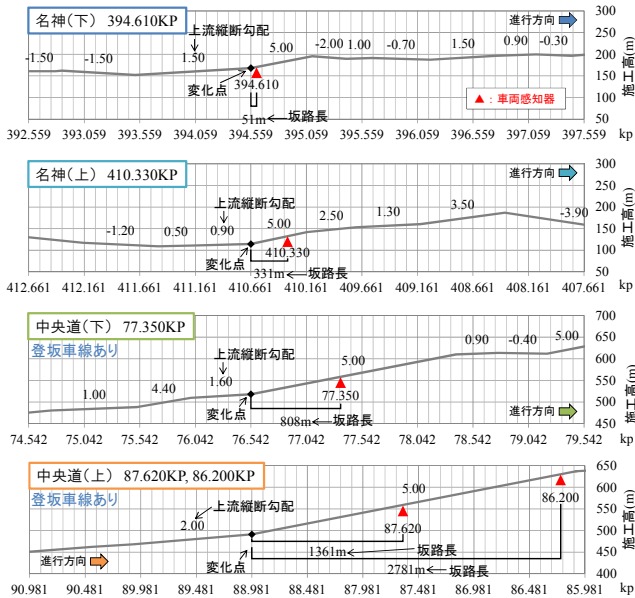


図-5 分析対象箇所（同一縦断勾配における坂路長の影響）

っており、下り坂では速度が高くなるが、上り坂では速度が低下していることがわかる。

また、85percentile 速度のグラフをみると、大型車混入率の増加に伴う速度低下量は全地点でほぼ同じ傾きであることから、縦断勾配の違いによる速度低下の度合いは、大型車混入率の変化で左右されないことを示唆している。

一方で 15percentile 速度のグラフをみると、+5.00（赤）は他の地点に比べ右下がりの傾向が強く、速度低下の度合いが大きい。また、大型車混入率 20~30%の-1.52%（水色）と+5.00%（赤）の差をみると、15percentile 速度の場合が 9km/h であるのに対し、85percentile 速度の場合は 7km/h の差となっている。これは 85percentile 速度を高速車（乗用車）、15percentile 速度を低速車（大型車）とみなすと、低速車（大型車）は急な上り坂の影響を受け易いことを示した結果と推察される。

図-4 において、縦断勾配がほぼ同じである+4.80%（橙）と+5.00%（赤）の線をみると、85percentile 速度では、ほぼ同じ値となっているが、15percentile 速度では速度に差がみられる。図-3 をみると、+4.80%の上流縦断勾配は-4.50%の下り坂、+5.00%の上流縦断勾配は+0.90%の平坦部となっており、上流縦断勾配の違いが速度差の一因と考えられる。例えば前記と同様に 15percentile 速度を低速車（大型車）とみなすと、低速車である大型車は急な下り坂では大型車のリミッターが効かないため、図-3 の 249.18kp（-4.50%→+4.80%）では、他の 4 箇所より高い速度で上り坂区間に進入したものと推察できる。

(3) 同じ縦断勾配の坂路長が速度に与える影響

本節の分析対象は前記 63 地点のうち図-5 に示す 5 地点である。本節では縦断勾配が 2%以上になると速度低下が顕著になることを踏まえ、縦断勾配だけでなく、坂路長を考慮して分析する。ここでは、平坦部から縦断勾

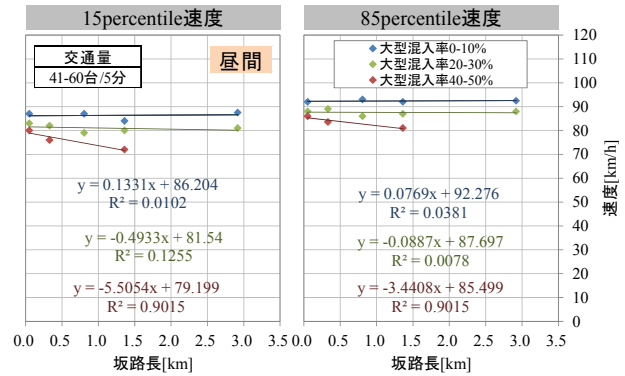


図-6 坂路長と速度の関係（昼間）

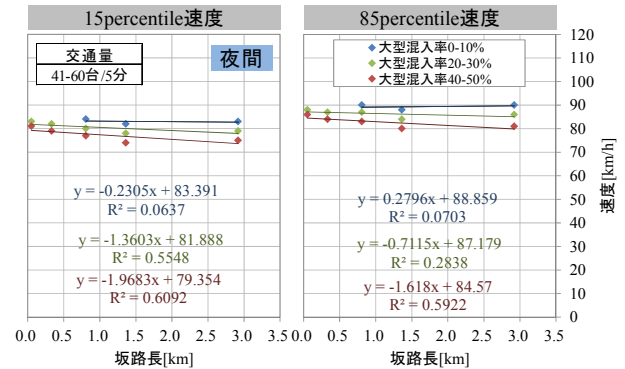


図-7 坂路長と速度の関係（夜間）

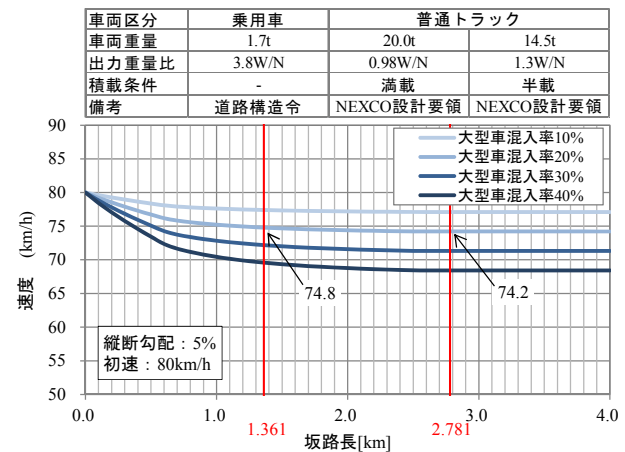


図-8 車両の登坂走行性能を考慮した坂路長と速度の関係（推定値）

配 5%になる箇所を抽出し、坂路長が走行速度に与える影響を確認する。

図-5 では、そのために選定した 5 地点の車両感知器を縦断図上に示してある。分析対象箇所の坂路長は 51m, 331m, 808m, 1,361m, 2,781m となっており、1,361m と 2,781m の車両感知器は、同じ縦断勾配区間上に設置されている。

図-6 と図-7 は、分析対象の 5 地点の坂路長と速度の関係を示した散布図である。集計条件は交通量が 41-60 台/5 分、大型車混入率は 0-10%、20-30%、40%-50%であり、15percentile 速度と 85percentile 速度に分けている。また、図-6 は昼間、図-7 は夜間のデータを使っている。

図-6 をみると、15percentile 速度と 85percentile 速度ともに、大型車混入率が 0-10%のときは、ほぼ横ばいとなっている。一方で大型車混入率が 20-30%、さらに 40-50%と高くなるにつれて、回帰直線の傾きが若干右下がりになる傾向が強くなっている。これは、急な上り坂の区間において大型車は坂路長が長いほど速度低下することを示しており「道路構造令の運用と解説」⁴⁾などに記載されている登坂性能曲線との概念と一致する。また、図-7 の夜間の結果をみると、昼間と同じ傾向であった。なお、図-6 および図-7 に示す傾きは、有意水準 5%で「有意差無し」であった。

つぎに同じ縦断勾配区間上に設置されている 1,361m と 2,781m の車両感知器の速度をみると、坂路長が長い 2,781m の方が 1,361m に比べ速度が高くなっている。これは、図-8 に示す乗用車と普通トラックの車両走行性能パラメータを基に描かれる大型車混入率別速度が 1,361m と 2,781m の地点で比較すると差は僅かであること、さらに 2,781m 地点は+5.00%区間の終端部の縦断曲線区間（クレスト）であり縦断勾配が緩いことが要因と推察される。なお、図-8 は「NEXCO 設計要領」と「道路構造令の解説と運用」を参考に設定した乗用車と 20t 普通トラック（満載と半載半々）におけるそれぞれの車両重量や走行性能パラメータを用いて算出した坂路長と速度の関係により求めたものである。また計算に当たっては、乗用車の 80km/h 以上への加速は考慮に入っていない。

5. おわりに

本稿で得られた知見を以下にまとめる。

- 縦断勾配を起因とする速度低下は、昼間に比べ

夜間の方が顕著である。

- 縦断勾配が 2%以下では速度への影響は小さいが、2%以上になると、縦断勾配 1%あたり 2km/h 程度速度が低下する。
- 縦断勾配を起因とする速度低下は、乗用車に比べ大型車の方が大きい。
- 大型車は縦断勾配の影響を受けやすい可能性がある。
- 急な上り坂（+5.00%）において、大型車混入率が高いと、坂路長の影響により速度低下する傾向がある。

本稿では、起伏の大きい規制速度 80km/h 区間の高速道路の車両感知器データを収集し、縦断勾配と坂路長が速度に与える影響について分析した。今後は、縦断勾配と坂路長の関係について分析できるように分析対象箇所を増やすとともに、連続的な速度データが得られるプローブデータを活用して分析していきたい。

謝辞：本稿の実施に際して、データの提供など便宜を図っていただいた中日本高速道路株の関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内海 泰輔, 浜岡 秀勝, 中村 英樹：往復分離 2 車線自専道の速度性能曲線の定式化, 土木学会論文集 D3, Vol.67, NO.3, pp.261-269, 2011.
- 2) 洪 性俊, 大口 敬：多車線高速道路における統合型速度推定モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.67, NO.3, pp.244-260, 2011.
- 3) 中日本高速道路株式会社：設計要領 第 4 集 幾何構造編【本線幾何構造設計要領】, 2007.
- 4) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用, 2004.
(2014.4.25 受付)

AN EMPIRICAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF GRADE ON SPEED PERFORMANCE

Hiroyuki KONDA and Jian XING

Travel speed is one of the typical traffic performance indices of intercity expressways. In order to apply the performance based road planning and design procedures to inter-city expressways, it is a prerequisite to estimate sectional travel speed based on the speed performance relationships in different road, traffic and environmental conditions. However, the impact of road alignments on the speed performance has not been well understood and there remains much work to formulate the speed performance relationships. This paper aims to analyze the impact of grade and its length on speed performance based on the observational data obtained from vehicular detectors with an emphasis on relationship between grade and speed. The analysis result will provide useful information in applying the performances based road planning and design procedures.