

設計風速に及ぼす局所地形の影響評価

Evaluation of the Effect of Micro-Topography on Design Wind Velocity

近 藤 宏 二
土 谷 学
眞 田 早 敏

要 約

山、谷、崖等の局所地形の周りでは、風向や風速が大きく変化する。このような場所に構造物を建設する場合は、その影響を事前に把握する必要があるが、局所地形周りの流れは、剥離、逆流等を含む非常に複雑な流れであり、風洞実験で風向・風速を精度良く測定するのは容易でない。本論文では、風向・風速を精度良く測定できるスプリットフィルムプローブを用い、傾斜角を数種類変化させた上り勾配の崖周りの風速を測定し、平均風速および変動風速の増幅特性を明らかにした。

目 次

- I. はじめに
- II. 風洞実験
- III. 実験結果
- IV. まとめ

I. はじめに

山、谷、崖等の局所地形周辺の流れは、剥離、再付着、逆流等を含む非常に複雑な流れであり、風向や風速が大きく変化する。このような場所に構造物を建設する場合、設計風速に及ぼす地形の影響を考慮する必要がある。地形の影響評価に関しては、数多くの研究が行われており、各国の規基準や指針に評価式が示されている。しかし、ほとんどの情報は平均風速が増加する場合のものであり、平均風速が減少する場合や乱れの増減率に関する情報は極めて少ない。また、地形形状のパラメータに関しても十分ではなく、設計風速を規定するための十分な情報が与えられているとはいえない。そこで本研究では、日本の平野部で数多く見られる数 10m~100m 程度の比較的小規模な小山、段丘、造成地、窪地等を対象とし、それを単純化した 24 種類の 2 次元の丘、崖、谷に関する風洞実験を実施し、平均風速

と変動風速の増幅特性を調査した^{1),2)}。本論文では、その内、最も基本的な形状である上り勾配の崖に関して、平均風速と変動風速の増加率を報告する。

II. 風洞実験

風洞実験は、鹿島技術研究所の可視化風洞（測定胴：幅 2.0m、高さ 1.2m）を用い、地形模型（幅 700mm）の両端には、2次元流れを確保するために風上側を長楕円形とした 2次元端板（高さ 1200mm、長さ 3250mm、厚さ 10mm）を設置している（Fig.1）。端板で囲まれた部分に対する模型（ $H=60\text{mm}$ ）の閉塞率は 5% である。座標は流れ方向を x 座標、高さ方向を z 座標に取り、 x 座標は崖の上端をゼロ、 z 座標は各位置の地表面をゼロとした。以下では、座標を模型高さ H で無次元化して示す。本実験で測定した地形は、基準平地および傾斜角 7.5° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° の 5 種類の上り勾配の崖であり、地表面から $z/H=0.125$ 、 0.25 、 0.375 、 0.5 、 0.625 、 0.75 、 0.875 、 1.0 、 1.25 、 1.5 、 1.75 、 2.0 、 2.5 、 3.0 、 3.5 、 4.0 の 16 レベルの測定を行った。Fig.2 に地形形状と座標の関係を示す。ただし、 z 座標は崖の形状によって異なるので、ここでは、基準平地の地表面をゼロとした座標軸を示した。図中に▼で示した位置は、風洞実験結果の表示位置である。

風速測定には、逆流を含む 2次元面内の風向・風速が測定可能なトリプルスプリットプローブ（Fig.3³⁾）を用い、1kHz サンプリング

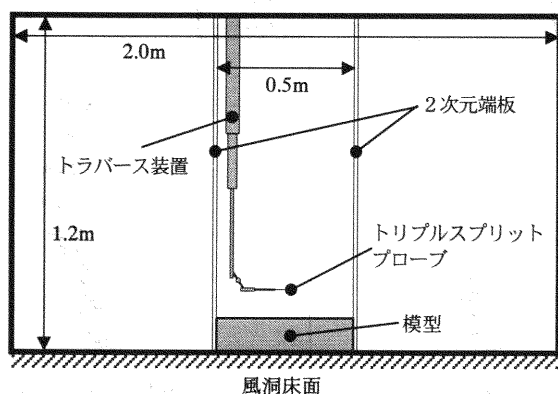


Fig.1 General Description of Wind Tunnel test

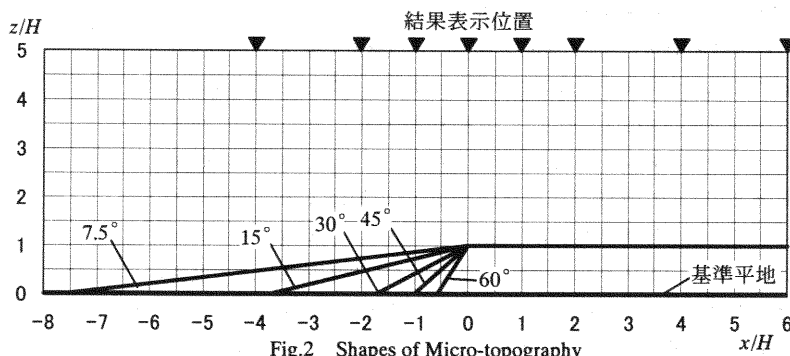


Fig.2 Shapes of Micro-topography

キーワード：設計風速、局所地形、風洞実験、トリプルスプリットプローブ、平均風速、変動風速、風速増加率

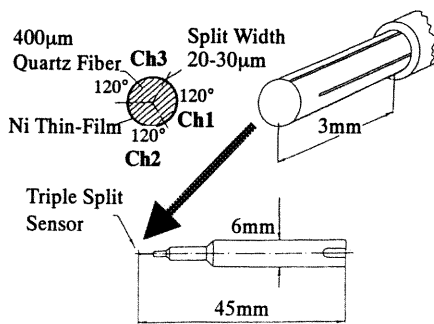


Fig.3 General Description of Triple-split Probe ³⁾

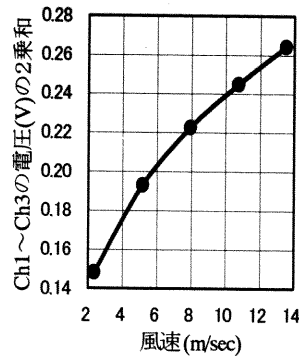


Fig.4 Relationship between Wind Velocity and Voltage

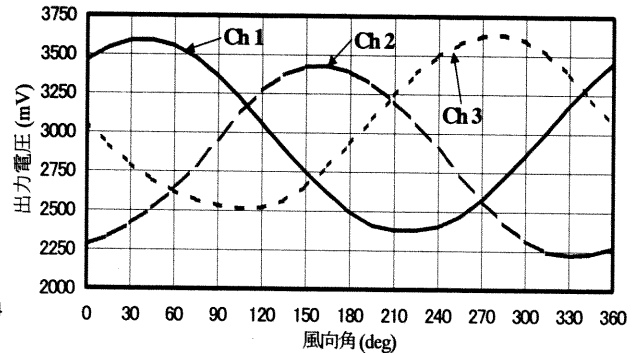


Fig.5 Relationship between Wind Direction and Voltage

で約 32 秒間の測定を行った。トリプルスプリットプローブのキャリブレーション結果として、風速—電圧特性および風向—電圧特性の一例を Fig.4, Fig.5 に示す。本実験では、これらの曲線を多項式近似した ³⁾。風洞実験気流は、Fig.6 に示す平均風速の鉛直勾配のべき指数 $\alpha=1/7$ の乱流境界層である。

III. 実験結果

局所地形の影響は、地形がない状態の風速に対する増加率で表すのが一般的である。そこで本実験では、地形がない状態の基準平地と局所地形周りの風速を測定し、両者の比から風速増加率を求めた。Fig.7に風速増加率 (topographic multiplier)の計算手順を示す。このとき、風速増加率を求める風速成分は、平均成分に関しては、 u 成分と w 成分のベクトル合成値を、変動成分に関しては、 u 成分を対象とした。

1. 基準平地上の風速の流れ方向変化

本実験では、スパーヤー、ソー、ラフネスブロックを用いて実験気流を作成した。しかし、ラフネスブロックの設置は、2次元端板の風上2mまでであり、それより風下側は滑面の状態としたため、地表面付近の風速の回復が懸念される。Fig.8は基準平地における流れ方向の風速変化を平均風速と変動風速それぞれについて $-4 \leq x/H \leq 8$ の範囲で示したものである。平均風速の場合、 $z/H \leq 1.5$ の高さで風速が徐々に回復しているが、 $x/H=0$ を基準とした場合の変化の割合は $\pm 3\%$ 程度と小さい。変動風速の場合、 $z/H \leq 1.8$ の高さで乱れが徐々に減少し、 $z/H > 1.8$ の高さでは逆に乱れが増加する傾向にあるが、 $x/H=0$ を基準とした場合の変化の割合は $\pm 10\%$ 程度である。このように基準平地上の風速は平均成分、変動成分とも流れ方向に若干変化するが、Fig.7に示したとおり局所地形による風速増加率は、同じ x 座標位置で測定した基準平地の風速を基準として計算するので、流れ方向の風速変化が増加率に及ぼす影響は小さいと判断される。

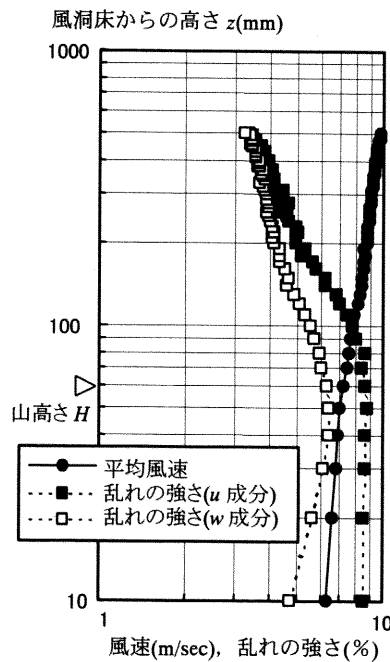


Fig.6 Vertical Profiles of Mean and Fluctuating Wind Velocities

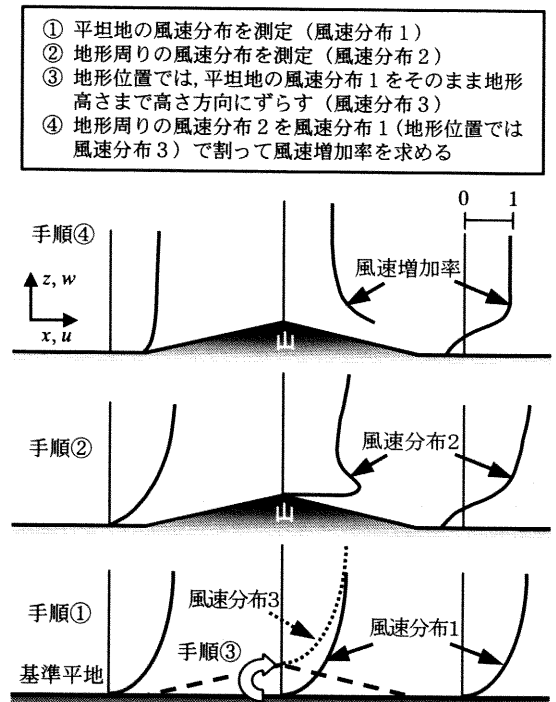


Fig.7 Calculation Procedure of Topographic Multiplier

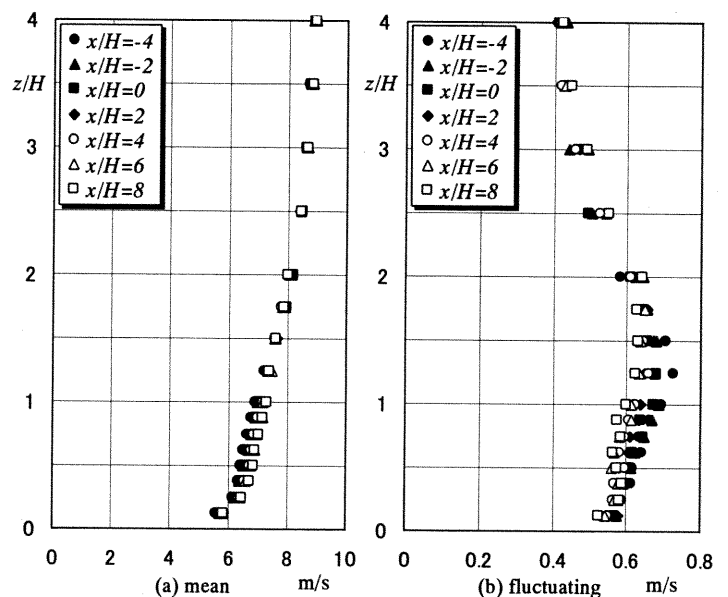


Fig.8 Variation of Velocity Profiles in Along Wind Direction

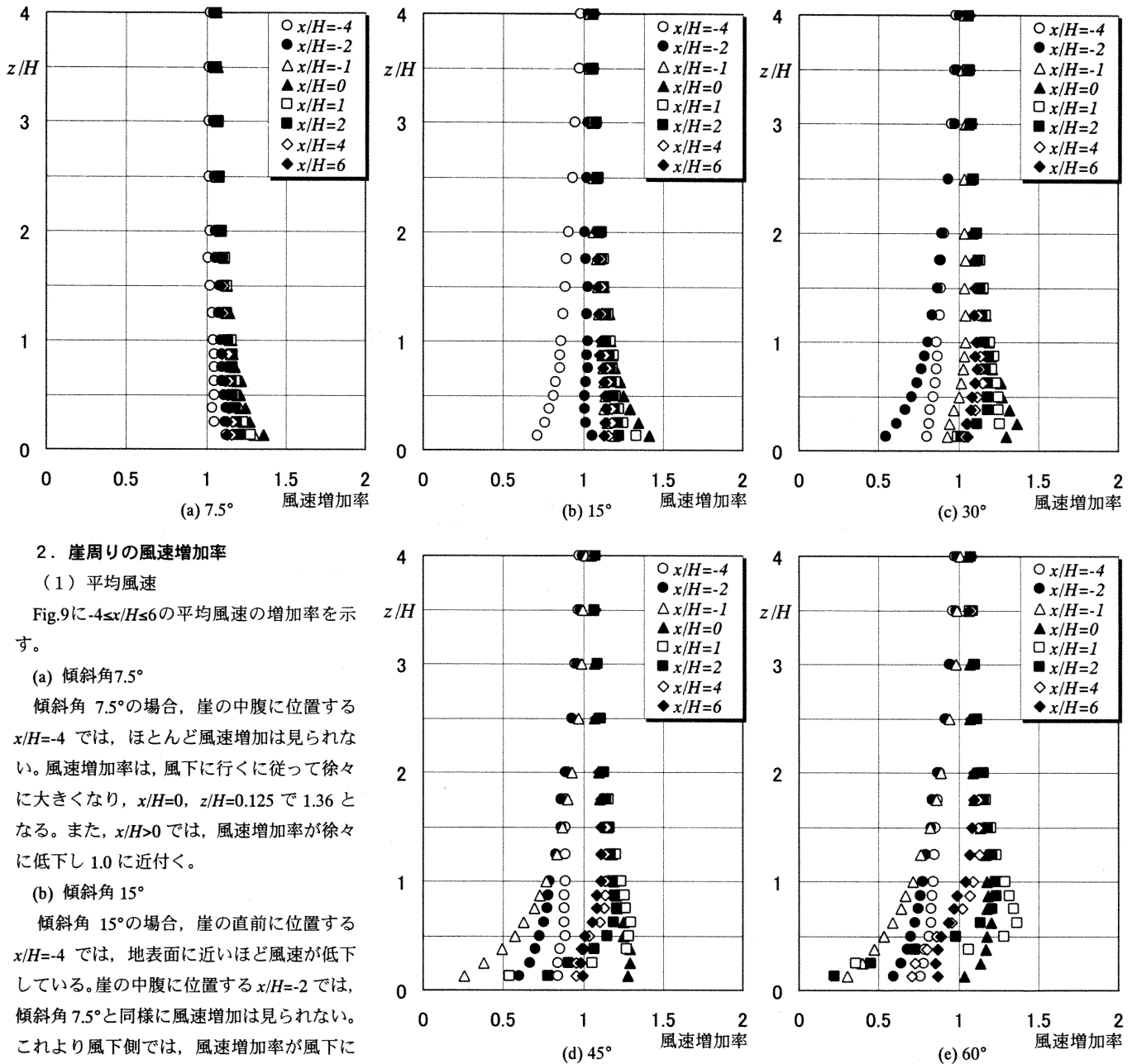


Fig.9 Comparisons of Topographic Multiplier of Mean Wind Velocity

2. 崖周りの風速増加率

(1) 平均風速

Fig.9に $-4 \leq x/H \leq 6$ の平均風速の増加率を示す。

(a) 傾斜角 7.5°

傾斜角 7.5°の場合、崖の中腹に位置する $x/H=-4$ では、ほとんど風速増加は見られない。風速増加率は、風下に行くに従って徐々に大きくなり、 $x/H=0$, $z/H=0.125$ で 1.36 となる。また、 $x/H>0$ では、風速増加率が徐々に低下し 1.0 に近づく。

(b) 傾斜角 15°

傾斜角 15°の場合、崖の直前に位置する $x/H=-4$ では、地表面に近いほど風速が低下している。崖の中腹に位置する $x/H=-2$ では、傾斜角 7.5°と同様に風速増加は見られない。これより風下側では、風速増加率が風下に行くに従って徐々に大きくなり、 $x/H=0$, $z/H=0.125$ で 1.42 となる。また、 $x/H>0$ では、傾斜角 7.5°と同様、風速増加率が徐々に低下し 1.0 に近づく。

(c) 傾斜角 30°

傾斜角 30°の場合、崖の風上側に位置する $x/H=-4$, -2 では、地表面に近いほど風速が低下しており、低下の割合は崖の直前の $x/H=-2$ の方が大きい。崖の中腹に位置する $x/H=-1$ では、傾斜角 7.5°, 15°と同様に風速増加は見られない。風速増加率は、 $x/H=0$, $z/H=0.25$ で 1.37 となり、 $x/H>0$ では、風速増加率が徐々に低下し 1.0 に近づく。

(d) 傾斜角 45°

傾斜角 45°の場合、崖の風上側の $x/H=-4$, -2 , -1 では、地表面に近いほど風速が低下しており、低下の割合は崖直前の $x/H=-1$ が最も大きい。図には示していないが、他の傾斜角と同様に崖の中腹で風速増加率が 1.0 に近づき、それより風下側では、風速が増加し $x/H=1$, $z/H=0.625$ で 1.30 となる。また、 $0 < x/H < 4$ の地表面付近は、崖による

剥離流の剥離泡の中に入るため風速が急激に小さくなり風速増加率が 1.0 を下回る。

(e) 傾斜角 60°

傾斜角 60°の場合、傾斜角 45°とほぼ同様の傾向を示しており、風速増加率は、 $x/H=0.5$, $z/H=0.625$ で 1.37 である。 $x/H>0$ の地表面付近は、崖による剥離流の剥離泡の中に入るため風速が急激に小さくなり、傾斜角 45°と同様、風速増加率が 1.0 を下回る。

参考として傾斜角 15°及び 45°の風速増加率を Table 1 に示す各国基準・指針による予測値と比較して Fig.10, Fig.11 に示す。Fig.10 の傾斜角 15°の場合、AS(draft) (図中●) と ASCE (図中□) はほぼ同じ値であり実験結果に最も近い。一方、NBC (図中▲), ISO (図中■), AIJ (図中△) は大きめの評価となっている。特に AIJ は分布形状が実験結果や他の予測式と異なっている。一方、Fig.11 の傾斜

角 45° の場合, $x/H=0$ では AS(draft) (図中●), NBC (図中▲), ASCE (図中□) が実験結果と近い値となっている。しかし, $x/H=1$, $x/H=4$ では, AS(draft), NBC, ASCE とともに本実験結果と異なった予測値を与えている。これは, 剥離泡内部の風速分布を正しく評価できていないためと考えられる。これに対して, AIJ (図中△) は, 風速増加率は大きめであるが, 鉛直方向の分布形状は, 比較的良く再現されている。なお, いずれの予測式も風速増加率が 1.0 を下回る場合は, 規定していない。

(2) 変動風速

Fig.12 に $-4 \leq x/H \leq 6$ の変動風速の増加率を示す。

(a) 傾斜角 7.5°

傾斜角 7.5° の場合, いずれの位置でも変動風速の増減

はほとんど見られない。

(b) 傾斜角 15°

傾斜角 15° の場合, 崖の直前に位置する $x/H=4$ では, 上空の

Table 1 Standards and Recommendations which Provide Topographic Multiplier

制定機関	名称	制定年	対象地形	略称	記号
Standards Australia / New Zealand	(draft) Australian / New Zealand Standard	1999	2次元尾根, 崖, 3次元丘	AS (draft)	●
NRC Canada	NBC 1995	1995	2次元尾根, 崖, 谷, 3次元丘	NBC	▲
ISO	International Standard (ISO/DIS 4354)	1997	2次元尾根, 崖, 谷, 3次元丘	ISO	■
日本建築学会	建築物荷重指針・同解説	1993	2次元崖	AIJ	△
ASCE	ASCE Standard (ASCE-7-95)	1996	2次元尾根, 崖, 3次元丘	ASCE	□

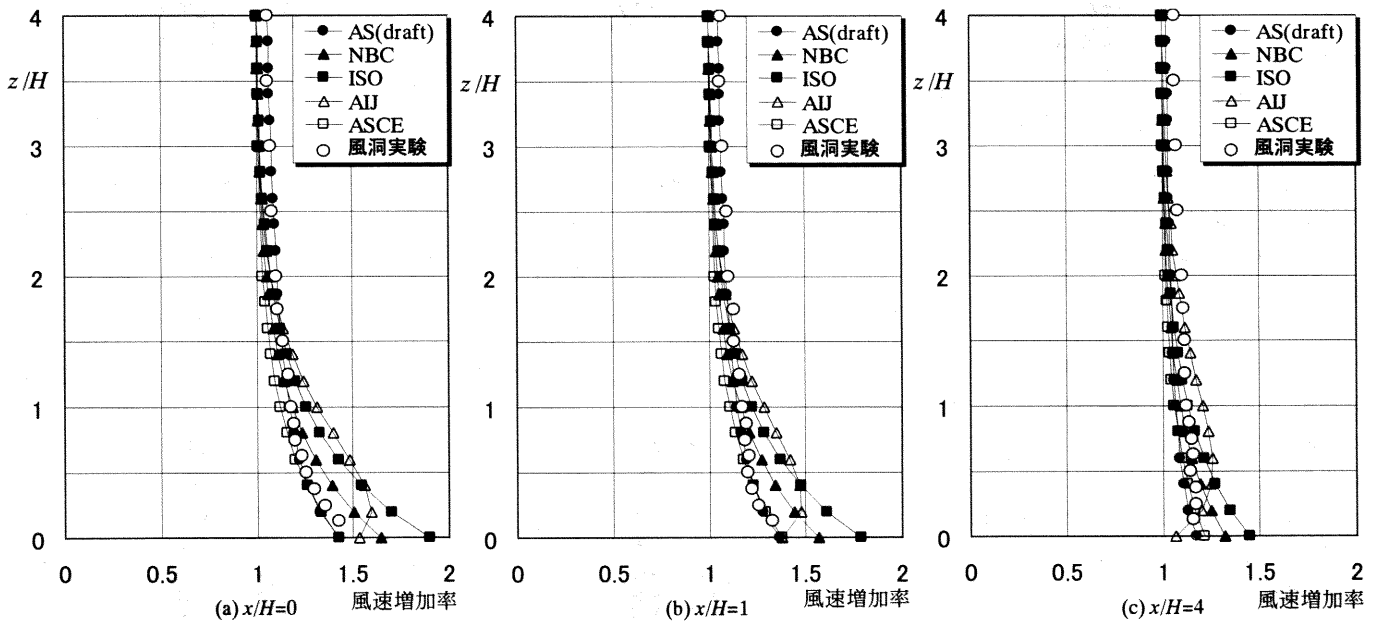


Fig.10 Comparisons of Topographic Multiplier between Wind Tunnel Test Results and Predicted Values by Standards and Recommendations (15° Slope)

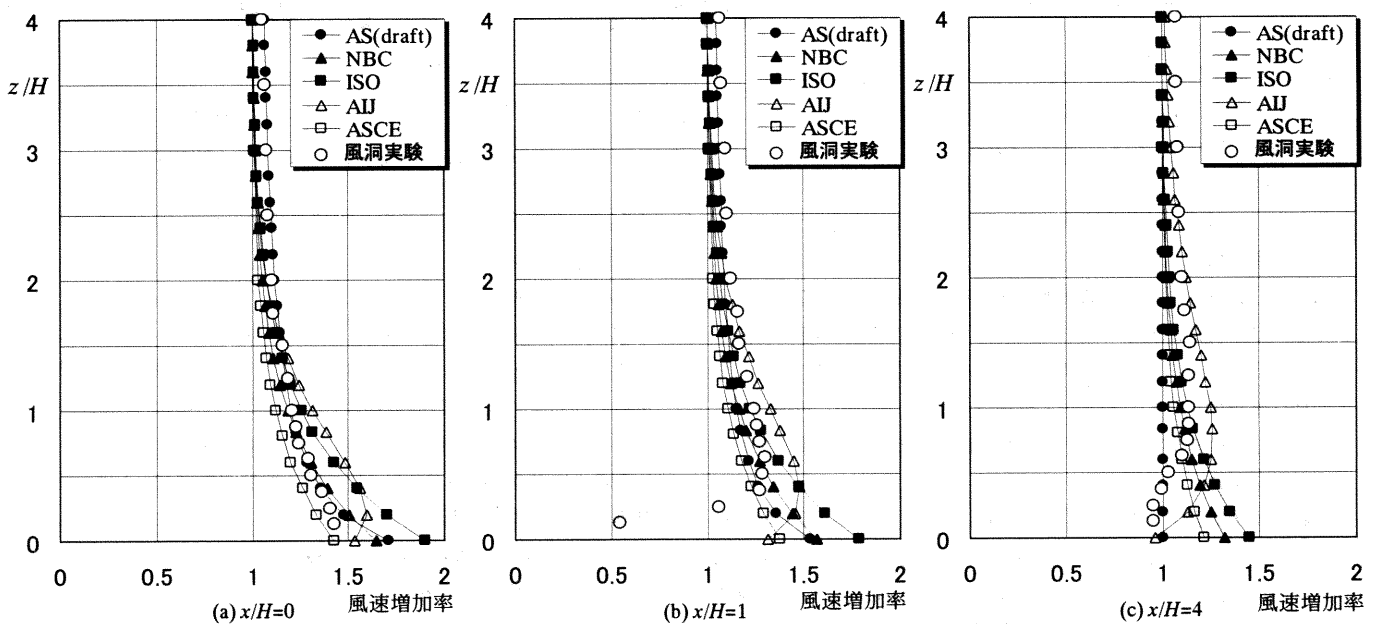


Fig.11 Comparisons of Topographic Multiplier between Wind Tunnel Test Results and Predicted Values by Standards and Recommendations (45° Slope)

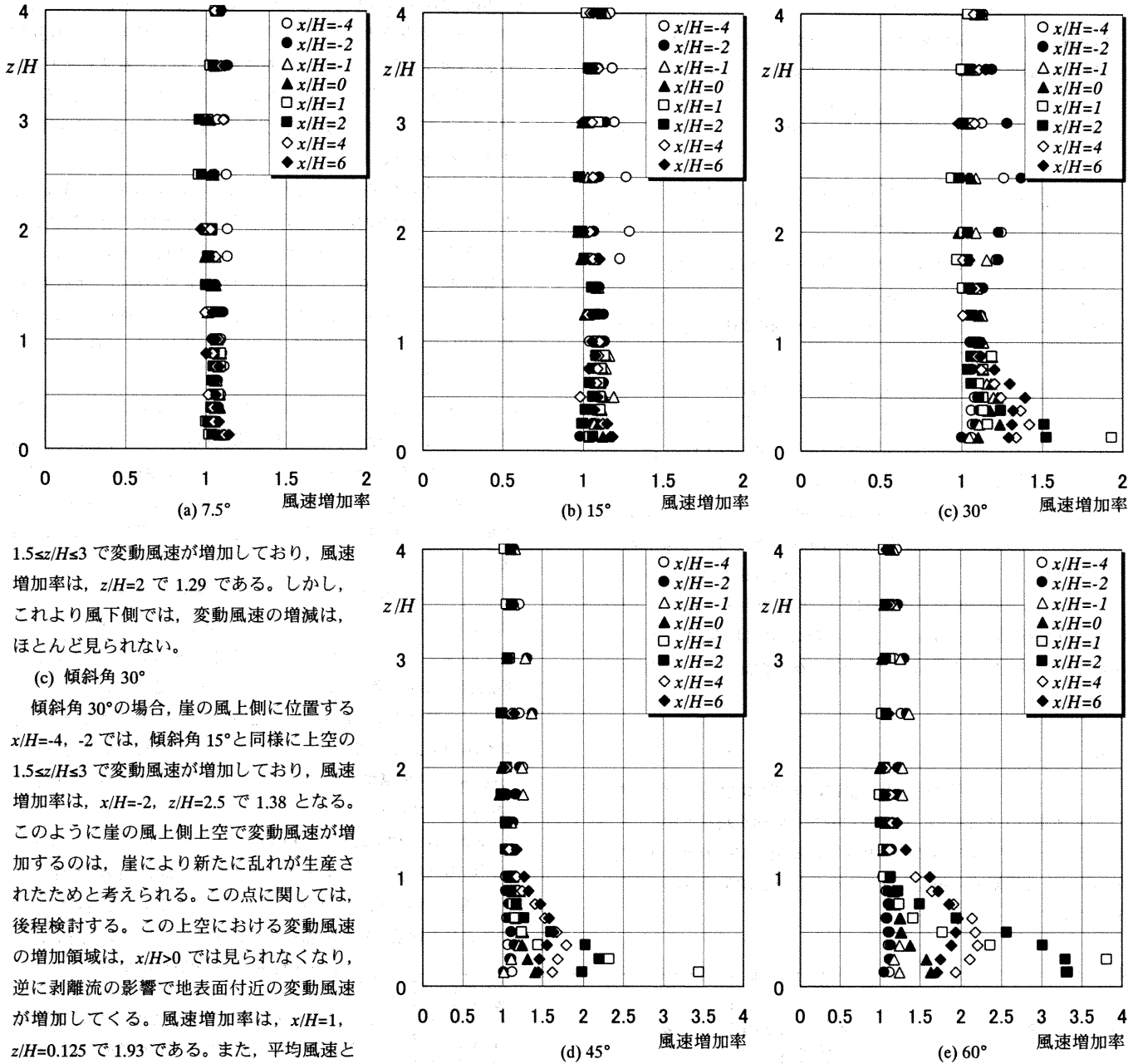


Fig.12 Comparisons of Topographic Multiplier of Fluctuating Wind Velocity

1.5 $\leq z/H \leq 3$ で変動風速が増加しており、風速増加率は、 $z/H=2$ で 1.29 である。しかし、これより風下側では、変動風速の増減は、ほとんど見られない。

(c) 傾斜角 30°

傾斜角 30° の場合、崖の風上側に位置する $x/H=-4, -2$ では、傾斜角 15° と同様に上空の 1.5 $\leq z/H \leq 3$ で変動風速が増加しており、風速増加率は、 $x/H=-2, z/H=2.5$ で 1.38 となる。このように崖の風上側上空で変動風速が増加するのは、崖により新たに乱れが生産されたためと考えられる。この点に関しては、後程検討する。この上空における変動風速の増加領域は、 $x/H>0$ では見られなくなり、逆に剥離流の影響で地表面付近の変動風速が増加してくる。風速増加率は、 $x/H=1, z/H=0.125$ で 1.93 である。また、平均風速と異なり、風下側の $x/H=6, z/H=0.5$ でも風速増加率が 1.39 と比較的大きな値を示しており、かなり風下側まで変動風速の増加を考慮する必要があることが分かる。

(d) 傾斜角 45°

傾斜角 45° の場合、傾斜角 30° と傾向が類似しており、風速増加率は、崖の風上側の $x/H=-2, z/H=2.5$ で 1.37 となる。

上空における増加領域は、 $x/H>0$ では見られなくなり、逆に剥離流の影響で地表面付近の変動風速が増加してくる。風速増加率は $x/H=1, z/H=0.125$ で 3.45 とかなり大きい。また、傾斜角 30° と同様、風下側の $x/H=6, z/H=0.5$ でも風速増加率が 1.63 と大きな値を示している。

(e) 傾斜角 60°

傾斜角 60° は、傾斜角 30°、45° と傾向が類似しており、崖の風上側に位置する $x/H=-1, z/H=2.5$ で風速増加率が 1.36 となる。 $x/H>0$ では、

剥離流の影響で地表面付近の風速増加率が大きくなり、 $x/H=1, z/H=0.25$ で 3.82 となっている。また、風下側の $x/H=6, z/H=0.625$ でも風速増加率が 1.97 とかなり大きな値を示しており、傾斜角 30°、45° と同様に、変動風速の増加がかなり風下側まで及んでいる。

(f) 乱れの生産

以上に示した変動風速の増減の傾向を検証するために、乱流エネルギーの生産項 P_k の分布を検討する。 P_k は(1)式で表される。

$$P_k = -\langle u_i' u_j' \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \quad (1)$$

ここで、 $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均、 f' : 変数 f の変動成分、

u_i : 速度ベクトルの i 成分、 x_i : i 方向の座標、

$i=1$ (主流 x 方向、 u 成分)、 $i=2$ (主流直交水平 y 方向、 v 成分)

分), $i=3$ (主流直交鉛直 z 方向, w 成分)

本実験では, 2次元端板内の流れを対象としているので, (2)式の関係が近似的に成り立つとして(1)式を変形すると(3)式が得られる。

$$\langle v \rangle \approx 0, -\langle u'v' \rangle = -\langle v'w' \rangle \approx 0, \frac{\partial \langle f \rangle}{\partial y} \approx 0 \quad (2)$$

$$P_k = -\langle u'u' \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} - \langle u'w' \rangle \left(\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} + \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial x} \right) - \langle w'w' \rangle \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial z} \quad (3)$$

(3)式で求めた乱れの生産項 P_k を基準平地と傾斜角 45° とで比較して Fig.13 に示す。ただし, 傾斜角 45° の斜面上に位置する $x/H=-1, 0$ に関しては, 風速測定点の x 方向の密度が速度勾配の計算には不十分であるので, ここでは結果を示さなかった。

基準平地の場合, 高さ $z/H=1.5$ 付近と地表面付近で P_k が若干大きくなるが, 高さ方向の変化は比較的小さい。また, 流れ方向の変化も小さい。これに対して, 傾斜角 45° の場合, 崖の風上側の $x/H=-4, x/H=-2$ では, $z/H=1.5$ 付近と地表面付近で P_k が大きくなっている。これに対して, 崖上の $x/H=1 \sim 6$ では, $z/H>1$ の P_k が小さくなり, 逆に $z/H<0.75$ の P_k が大きくなる。特に $x/H=1, 2$ では, P_k は非常に大きな値を示している。これらの傾向は, 変動風速の増加率の傾向と一致している。変動風速の増加率には, 乱れの生産項 P_k だけでなく乱れの散逸等も関係するため, P_k の検討のみでは, 必ずしも十分とはいえないが, 乱れの増加率の傾向は, 概ね把握できているものと考えられる。

IV. まとめ

山, 谷, 崖等の局所地形が設計風速に及ぼす影響を検討するために, 24種類の2次元の山, 崖, 谷に関する風洞実験を実施した。本論文では, その内, 最も基本的な形状である上り勾配の崖に関して, 平均風速と変動風速の増加率を明らかにした。結果の概要を以下にまとめる。

- (1) 風速増加率の基準となる基準平地上の風速の流れ方向の変化は, $x/H=0$ を基準とした場合, 平均風速で $\pm 3\%$ 程度, 変動風速で $\pm 10\%$ 程度であるが, 同じ x 座標位置で測定した基準平地上の風速を基準として風速増加率を計算していることを考えれば, 基準平地上の流れ方向の風速変化が, 風速増加率に及ぼす影響は, 小さいと判断される。
- (2) 平均風速の増加率は, 全体的な傾向は各傾斜角とも類似しており, x 軸を地形の幅で無次元化すれば比較的近い分布性状となると推定される。この点に関しては, 今後検討を加えたい。崖上端の風下側 $x/H \geq 0$ では, 流れの剥離が起こる場合 (傾斜角 30° 以上) と起こらない場合 (傾斜角 15° 以下) とで風速増加率の傾向が異なるが, いずれの傾斜角とも風速増加率は, 最大で $1.3 \sim 1.4$ 程度である。
- (3) 各国基準, 指針による予測式は, 比較的勾配が緩やかな傾斜角 15° の場合, AS(draft)と ASCE が実験結果と良く対応している。しかし, 急勾配である傾斜角 45° では, 崖上端の $x/H=0$ では, AS(draft), ASCE, NBC が実験結果と近い値を示すものの, 風下側の $x/H=1, x/H=4$ では, いずれも実験結果と異なった結果を与えている。
- (4) 変動風速の増加率は, 勾配が緩やかな傾斜角 $7.5^\circ, 15^\circ$ の場合, 地表面付近ではあまり大きくない。これに対して, 傾斜角が 30° 以上の場合, $x/H>0$ の領域では, 剥離流の影響で地表面付近の変動風速が大幅に増加し, その影響はかなり風下側まで及ぶ。このような領域では, 風の乱れの影響を受けやすい構造物は, 注意が必要である。崖の風上側では, いずれの傾斜角とも上空の $1.5 \leq z/H \leq 3$ の領域で変動風速が増加しており, 1.4 前後の風速増加率となっている。
- (5) 変動風速の増加の傾向を検証するために, 乱れの生産項 P_k の分布を調べた結果, 変動風速とほぼ同様の傾向が確認された。
- (6) 本論文では結果を示さないが, 余弦2乗曲線 $z/H = \cos^2(\pi x/5H)$ で表される斜面を有する崖の場合, 平均風速, 変動風速の増加率とも傾斜角 15° と類似した傾向を示した。

他の形状の地形に関しては, 今後, 順次発表して行きたい。また, 風速増加率のモデル化は, 日本建築学会 風荷重小委員会 設計風速WG 地形SWGの作業の一貫として実施する予定である。

参考文献

- 1) 土谷, 近藤, 眞田; 設計風速に及ぼす局所地形の影響 一種々の形状の地形周りにおける風速増加特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1999.9), pp.119-120.
- 2) 眞田, 近藤, 土谷; 2次元地形周りの風速のパワースペクトル特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1999.9), pp.121-122.
- 3) F. E. Jorgensen; Characteristic and Calibration of Triple-Split Probe for Reversing Flows, DISA Information, No.27, (1982.1), pp.15-22.

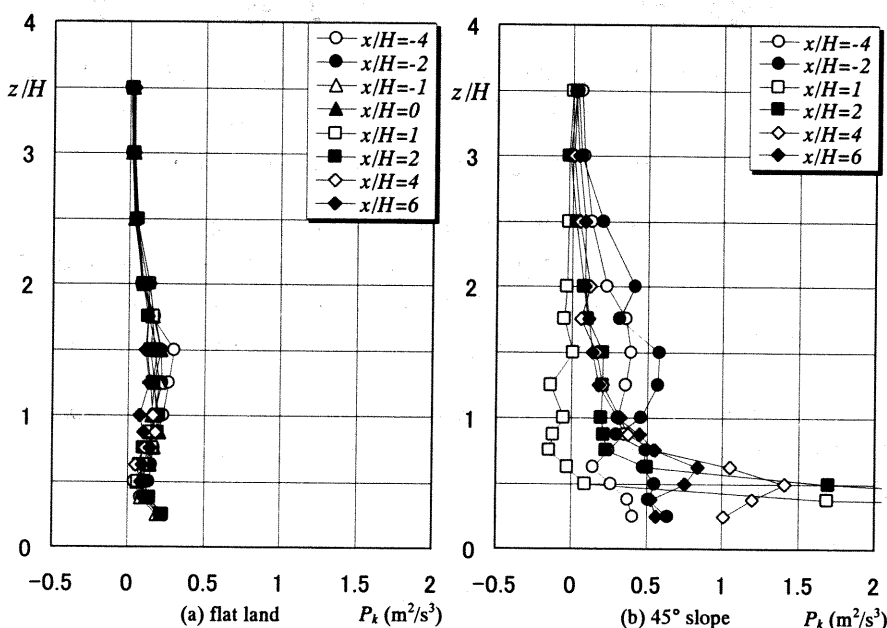


Fig.13 Comparisons of Production Term P_k of Turbulence Kinetic Energy