

都市部強風特性評価のための空気力学的粗度の定量化

Quantification of the aerodynamic roughness

for the estimation of high wind property in the urban area

学籍番号	56831	2007年3月修了	平均風速鉛直分布
氏名	須藤 亘平 (Sudoh, Kouhei)	社会文化環境学専攻	地表面粗度
指導教員	神田 順 教授		レイノルズ応力

1 はじめに

近年、限界状態設計法に代表されるような、安全性に加えて使用性を考える必要性が謳われている。建築物に関わる詳細な荷重評価は、このような使用性の評価のみならず、構造設計における環境負荷削減効率の評価（華表）¹⁾や総費用最小化を考慮した評価、また不動産や保険を交えたリスク評価にとっても必要不可欠なものである。

本研究では、構造設計の一部である耐風設計のうち、設計風速の決定および設計用風荷重の評価に関連する平均風速鉛直分布の評価を扱う。特に、今後も増加し続けるであろう高層建築物の耐風設計を行う場合には、終局限界状態だけでなく、居住性などの使用限界状態に対応した設計を行う必要がある。高層建築物の使用限界状態の設計においては、風による応答評価が重要であり、そこにおいて風向ごとの強風発生頻度や平均風速鉛直分布、また風速の乱れの鉛直分布を適切に評価しなければならない。しかし、それらに多大な影響を与える風向ごとの地表面粗度の評価については明らかにされていない部分が多い。

2 研究の目的

地表面粗度の定量的評価に関する試みは少なく、また既往の地表面粗度評価はそのほとんどが地表面粗度を平面密度および平均容積によって均一化したケースを扱って

おり、地表面粗度の高さのばらつきに関する定量的な評価が必要である。

そこで本研究では、平均風速鉛直分布に影響を及ぼす地表面粗度に関する影響因子を平面密度、建物の平均高さ、建物の高さの標準偏差といった3つのパラメータとして設定し、風洞実験によりランダムで不均質な都市部の建物群などの地表面粗度による平均風速鉛直分布を評価する手法を提案することを目的とする。また、これまでに提案されてきた平均風速鉛直分布に関わる粗度パラメータおよびレイノルズ応力に代表される物理的パラメータの理論的な対応関係を、実験により定量的に評価する。

3 風速及び床面抗力測定実験

本実験では、風洞内の一部（以下、フローテーブル）の粗度形状を前方部分とは別の形状に変化させ、それによる風速および床面に発生する効力の変化を調べた。粗度要素は30mm角の立方体粗度ブロックを最小単位とし、配置形状を千鳥状配置とした。

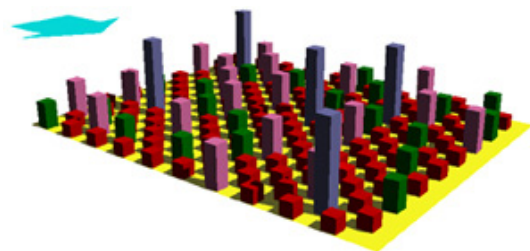


図1 測定ケース例

3.1 測定ケース

測定ケースの粗度パラメータは、平面密度、平均高さ、高さの標準偏差の3つである。測定ケースの例を図1に示す。平面密度は、郊外、中小都市、大都市のモデル化として、それぞれ4%、12%、25%の3種類とした。また、本研究での平均高さおよび高さの標準偏差は、それぞれ面積で積み付けしたものを用いる。平均高さは30mm～65mm、また高さの標準偏差は0mm～40mmの範囲でそれぞれ変化させた。尚、本実験での長さの縮尺は1/200を想定している。これより、本実験の測定ケースの平均高さを実際の高さに換算すると6m～13mとなり、建築物が散在している都市の特徴をよく反映した値だといえる。以下に、粗度パラメータの定義を示す。

・平面密度

$$R_m = \sum_{i=1}^N A_i / A_d$$

・高さの平均値

$$h_{am} = \sum_{i=1}^N H_i A_i / \sum_{i=1}^N A_i$$

・高さの標準偏差

$$\sigma_h = \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i (H_i - h_{am})^2 / \sum_{i=1}^N A_i}$$

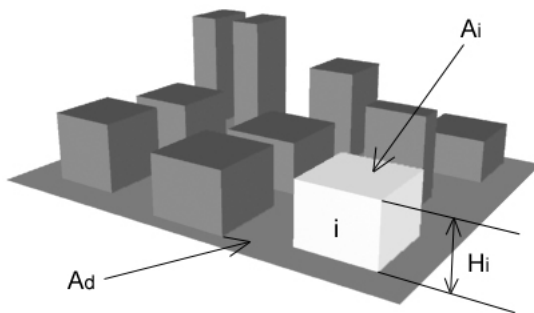


図2 変数の定義

3.2 実験結果

効力測定装置により測定されるフロートテーブル全体の効力 F から、フロートテーブル全体の平均せん断力 τ_w が式(1)により求まる。また、床面抗力の比較には式(2)で表される床面抗力係数 C_D を用いる。

図3に抗力係数 C_D と高さの平均値 h_{am}

および高さの標準偏差 σ_h の関係を平面密度 R_m ごとに示す。

$$\tau_w = \frac{F}{NS} + F_{surface0} \left(1 - \frac{S_0}{NS}\right) \frac{1}{S_0} \quad (1)$$

$$C_D = \tau_w / \frac{1}{2} \rho U_0^2 \quad (2)$$

N : フロートテーブル上の粗度要素の個数

S_0 : フロートテーブルの面積

S : 千鳥状配置における粗度要素1個あたりの床面積

$F_{surface0}$: 粗度要素を設置しない場合の床面効力

ρ : 空気密度 (=1.225[kg/m³])

U_0 : 基準高さでの平均風速

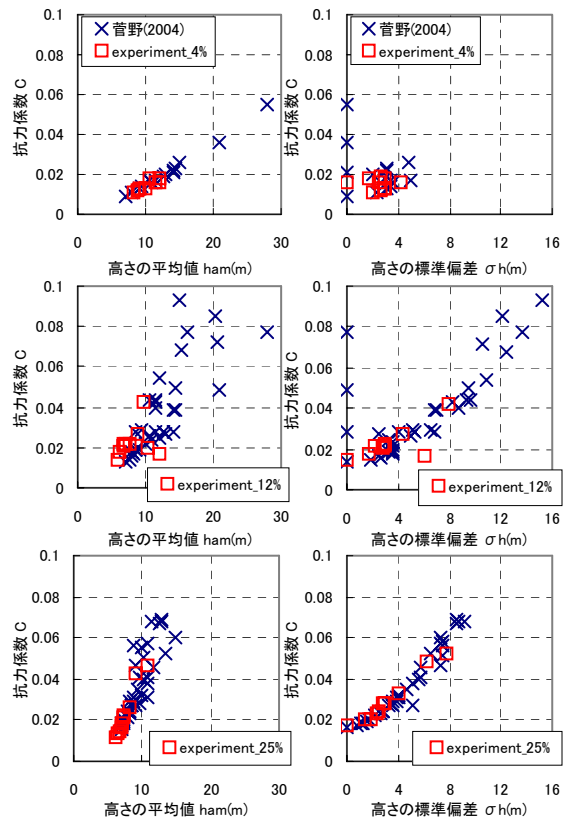


図3 粗度パラメータと抗力係数の関係

測定値の妥当性に関しては、菅野²⁾による同様の実験での値と比較することにより、確認することが出来た。

高さの平均値 h_{am} は、平面密度 $R_m = 4\%$ および 25% では抗力と強い相関関係を見

せることが分かり、高さの平均値をパラメータに抗力を導くことが出来そうである。しかし、平面密度 $R_m = 12\%$ の場合には、傾向的に抗力は高さの平均値に対して単調増加するが、値のばらつきが大きく、高さの平均値が抗力決定の主要なパラメータになっているとは言い難い。しかし、この値のばらつきの範囲は、平面密度 4% の場合の値と 25% の場合の値との間に納まるといった傾向がある。高さの標準偏差 σ_h は、高さの平均値とはまた別の関係性を示し、平面密度 $R_m = 4\%$ では抗力との相関をグラフより読み取ることは出来ないが、平面密度 $R_m = 12\%$ および 25% の場合において、指数近似により抗力との強い相関関係があることが分かった。

4 平均風速鉛直分布の評価

平均風速鉛直分布を評価する式には、式 (3), (4) に示す対数則とべき指数則がある。

・対数則
$$U(z) = \frac{1}{k} u_* \log \frac{z}{z_0} \quad (3)$$

・べき指数則
$$U(z) = U_G (z/z_G)^\alpha \quad (4)$$

u_* : 摩擦速度 k : カルマン定数 (=0.4) z_0 : 粗度長

α : べき指数 z_G : 傾度風高さ U_G : 傾度風風速

実験で得られた平均風速鉛直分布より、鉛直分布係数である粗度長 z_0 およびべき指数 α の算定を行った。結果を図 4 に示す。鉛直分布係数は粗度パラメータに対し、どちらも同じ傾向を示した。それぞれ同じ風速のプロファイルに対しての鉛直分布係数なので、これは当然の結果であるが、不確

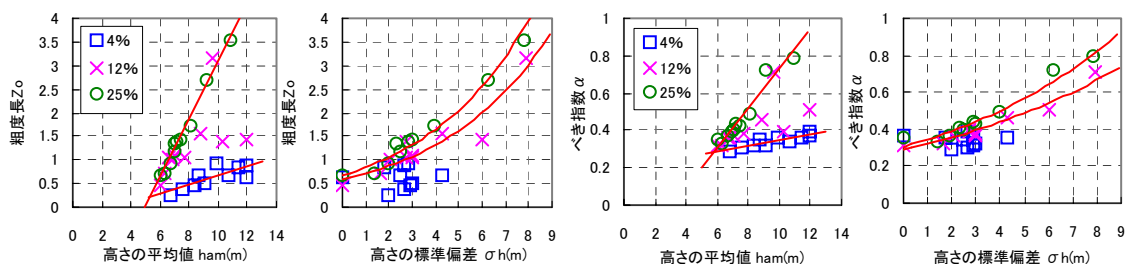


図 4 鉛直分布係数と粗度パラメータの関係

定性が問題となる対数則およびべき指数則の両方について適切な評価を行うことが出来たということを表している。また、粗度パラメータに対する相関関係は抗力係数に対する評価と一致した。

5 抗力係数と鉛直分布係数の関係

抗力係数と地表面と自然風の間を生じるせん断力 τ_0 、ならびに摩擦速度は、定義として以下のような関係式で結ばれている。

$$\tau_0 = C_D \cdot (1/2 \cdot \rho U_0^2) \quad (5)$$

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad (6)$$

また、鉛直分布係数の粗度長 z_0 とべき指数 α の結びつきについては、崔ら³⁾により式 (7) が提案されている。

$$1/\alpha = \{\log(50/z_0)\}^{-1} \quad (7)$$

これら (5) ~ (7) 式と (3), (4) 式より、各鉛直分布係数と抗力係数の関係性を次のように導くことが出来、測定値での対応も確認することが出来た (図 5)。

$$1/\alpha = k \sqrt{2/C_D} + \log(50/z_G) \quad (8)$$

$$z_0 = z_G \left\{ \exp(k \sqrt{2/C_D}) \right\}^{-1} \quad (9)$$

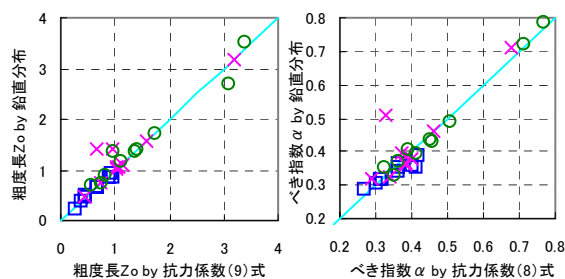


図 5 抗力係数と鉛直分布係数の対応

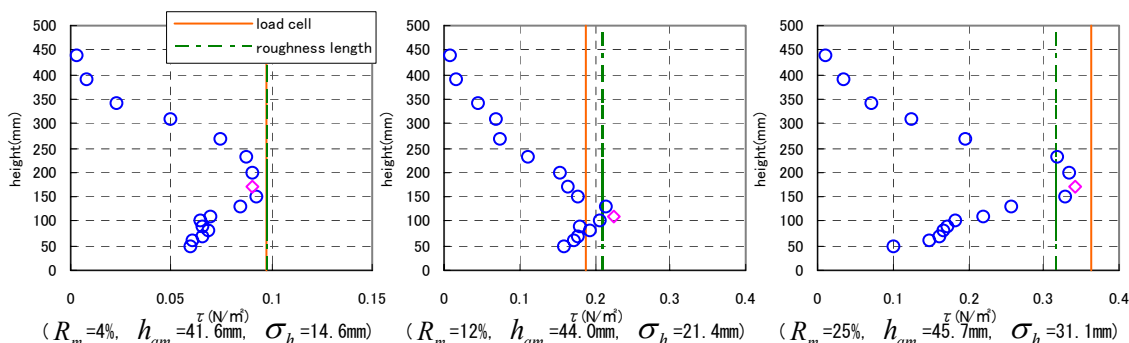


図7 レイノルズ応力の算定結果

6 レイノルズ応力

理論的に、摩擦速度は応力一定層におけるレイノルズ応力 τ と地表面せん断力 τ_0 との間で次の式の関係が成り立つとされる。

$$\rho \cdot u_*'^2 = \tau_0 \approx \tau = -\overline{\rho u' w'} \quad (10)$$

u', w' : 主流方向および鉛直方向の風速変動成分

レイノルズ応力の算定結果の例を図7に示す。これより、粗度形状の高さが一定ではなくランダムな場合には、レイノルズ応力が高さに対して一定となる応力一定層はほとんど存在しないことが分かる。しかし、レイノルズ応力の分布がとるピークの値に着目すると、その値は抗力測定装置にて測定された抗力、および式(3)から得られる摩擦速度より求めた抗力の値と良い対応を見せていると判断できる(図8)。

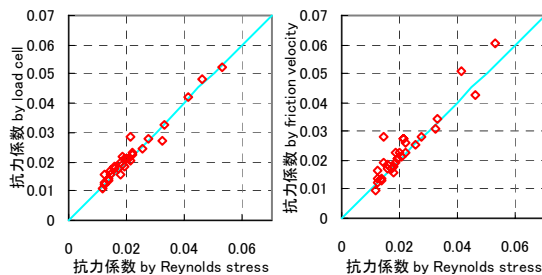


図8 効力とレイノルズ応力の対応

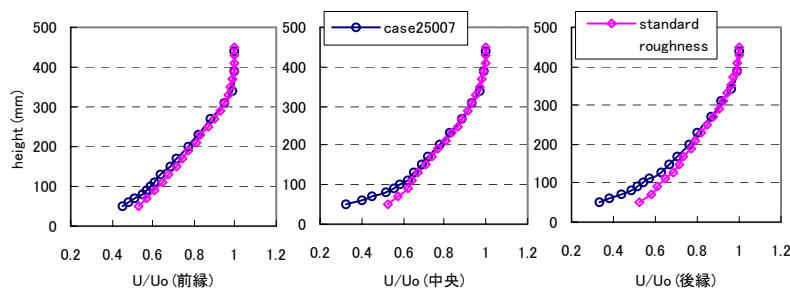


図9 内部境界層高さの変化

7 内部境界層の発達

平均風速鉛直分布を評価する上で重要な内部境界層高さ z_G は、平均風速鉛直分布をプロットテーブル上の粗度形状が前方部分と等しい状態の場合の分布と比較することにより求められた(図9)。そして、吹走距離 x に対して以下の評価式を得た(図10)。

$$z_G/z_0 = 1.221(x/z_0)^{0.625} \quad (11)$$

この評価式は、自然風を対象とした既往の提案式と良い対応を示す(図10)。

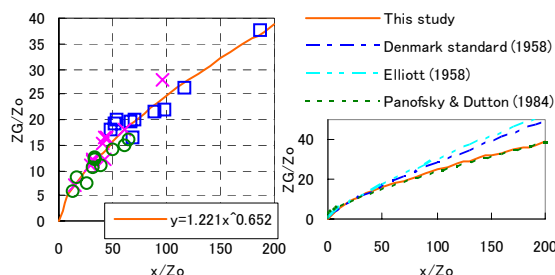


図10 内部境界層高さの評価式

8 まとめ

本研究では、都市の不均質な地表面粗度における平均風速鉛直分布の定量的な評価を風洞実験により行い、平均風速鉛直分布と粗度パラメータ及び物理的パラメータの理論的な対応関係を定量的に明らかにした。

参考文献

- 1) 華表良介:「構造種別間の環境負荷削減効率の比較」日本建築学会大会学術講演梗概集構造I, 2003, 9, pp39-40
- 2) 菅野宏紀:「地理情報システムに基づく平均風速鉛直分布の評価」2004 東京大学修士論文
- 3) 崔恒, 神田順:「風荷重評価のための平均風速と乱れの強さの鉛直分布特性」日本風工学会誌第45号 23-43 (1990)