

最近における耐風構造の研究について*

石 崎 潑 雄

1. ま え が き

地上構造物を安全に保つために考えねばならない非常時外力としては地震、風、雪の3つの自然力が主である。これらのうち雪による外力は主として垂直方向、即ち重力の作用方向と同じ方向に作用し、しかも静的な力であるから、その作用の性質は常時、作用する固定荷重や積載荷重と同様である。これに対し、地震力と風力は、水平方向の力の成分が支配的でしかも動的な力であり、構造物に対する力の作用の仕方が複雑である。従来から建築物を安全にする上において、これら両者がきわめて重要視され、わが国における建築物の構造設計のすべては、この二つの外力に対する設計であるといっても過言ではない。構造設計では、地震力と風力を適当に評価しこれらに対し建物が安全となるように構造部材を配置しその断面をきめるのが普通である。従って、建築物を安全に保つ上で、地震と風とのいずれが重要であるかをきめるわけにはいかないが、従来はどちらかといえば、地震力が重要視されてきた。地震が重要視されてきた一つの理由としては、大地震は突然やってくるというような恐怖感にもとづく問題もあるかと思うが、建築構造技術者にとっては、別の大きな理由があった。

すなわち、地震力も風力も前述のように水平力が支配的であり、通常は水平力しか考えない。しかもこれらをまず適当な大きさの静的な力として仮定する。地震力と風力とは、その性質が根本的に違っている点も多けれども、このような設計の第一段階においては、便宜上、これら両者の力を比較することができる。この比較において、従来のわが国の主な建物にとっては、地震力が風力に対してはるかに支配的であった。風力が大きく問題となるのは、工場や体育館のような一部の鉄骨構造物や、煙突とか鉄塔の類に限られていた。しかし、ごく最近になってこの事情が変わってきた。事情が変わった第一の理由は超高層建築物の出現である。

最近各国において、いわゆる超高層建築物が陸続と建てられるようになってきている。このような建物が多く造られるようになったのは、構造材料の進歩、構造手法や耐震構造法の発展にもとづく。周知のように米国における超高層建物は、けっして新しいものではなく、有名なニューヨークの Empire State Building の建てられたのは 1931年、Rockefeller Center は 1933年である。

しかし、その後、第二次世界大戦等で一時、高層建物の建設も中絶状態となり、戦後はまた別の新しい高層建物の時代となった。わが国では、昭和38年に建築基準法が改正されて、はじめて高層建物が建てられるようになり、その最初のものが東京の三井霞ヶ関ビル（1964年）である。

戦前は米国のみに限られていた高層建物が、戦後世界各国に建設されるようになったのは、戦前の、すなわち古い高層建物と、最近の高層建物とは構造法が根本的に異なるためである。古い高層建物は、いわば重量が重く不経済であった。戦前の高層建物と、最近の高層建物の単位容積当たりの重量を比較すれば、前者は前者の 1/2 以下である。建物が高くなればなるほど、相対的に大きな風力が作用し、耐風設計の問題が重要となることはいうまでもないが、さらに最近の建物は重量が軽いために、風の問題が重要性を増してきているのである。わが国で、目下最高の建物は京王プラザホテル（高さ 170m）であるが、前述のような、きわめて単純な方法で設計上の地震力と風力の大きさを比較するとほぼ同程度の大きさである。部分的には地震力が大きいし、他の部分では、風力の方が大きい。これ以上高い建物が出現すれば、風力が支配的になると

* 昭和 46 年度防災研究所研究発表講演会特別講演（1972 年 2 月 15 日）

考えられる。また風が重要になった理由として高層建物その他の外壁の構造技術上の進歩が挙げられる。最近の建物の外壁はほとんどカーテンウォール工法に拠っており、また板ガラスの製造技術の進歩から大きなガラス面が用いられるようになってきた。建物の構造体が安全であっても、これらの壁面が危険であってはならない。窓に用いられる板ガラスの耐風設計が行なわれるようになったのは、ごく最近の事であるが、そのためには、窓面に作用する風力が正しく評価されなければならない。このほか、テレビ塔のような高い鉄塔類が多く建てられるようになったこと、テント類のような膜構造や吊り構造が発展してきたこと等が挙げられる。これらの構造物にとっては、風力の問題がきわめて重要である。以上のような事情から、風力に関する研究は最近世界的に盛んになってきた。この研究に先鞭をつけたのは、英国、フランス、カナダ、日本でありきわめて最近、米国およびオーストラリアにおいて、その研究が活発化してきた。風力の問題は、大規模な建築物、高い構造物の建てられる地域にとって、特に重要となるから、以上のいわゆる先進国といわれる国々において、その研究が活発に行なわれていることは当然である。世界的に見れば、わが国のように、台風その他の強風の襲う地域と、あまり風の強くない地域があるけれども、風がまったく吹かないという地点はない。従って、経済の発展とともに、多くの建設が行なわれる地域においては、風の問題が世界的に共通の重要課題なのである。

2. 風力の研究の問題点

構造物に対する風力に関する研究は、戦前から行なわれていなかったわけではない。しかし以前は、自然の風を単純に空気の一様な流れと見なし、その大きさを、 $P=CqA$ (C : 風力係数, q : 速度圧, A : 構造物を代表する面積) $q=\frac{1}{2}\rho v^2$ (ρ : 空気密度, v : 風速) で表わすことにより、風洞実験から求めた風力係数 C と、適当に仮定した風速 v とから風力 P を算定した。 P はまったく静的に構造物に加わるものとして、構造物がこれに耐えられるようにすることで事足りりとしていた。

このような設計方法が不十分なものであることはいうまでもないが、この方法を以てしても、一応の風力の評価ができ、しかも、過大な風速 v を与えておけば、ほとんどの構造物は風に対して安全である。これが証拠に、古い耐風設計による高層建物で崩壊したものは世界的に一つもない。しかも、わが国においては、過大な風力を想定しても、多くの構造物は、さほど不経済にならなかった。前述のように、大部分の構造物の水平耐力は地震力によって、きめられたからである。

しかしながら、構造物が大規模化し、軽量化してくるとともに、風力というものをさらに詳細に、また正確に評価する必要に迫られたのである。このために、上述のような単純な耐風設計方法が反省され、この研究促進が世界的な機運となってきた。

構造物を風に対し安全に保つには、外力としての風力を正しく求めることと、構造物がこの外力に対し耐えられる方策を見出すことに帰着する。前者は風の性状を把握することであり、後者は構造物の性状を明らかにすることである。われわれの研究課題は、大きく分けて、この2つである。しかしこの2つの問題がまったく分離されて、おのおの独立に、いかに詳細に明らかにされても、目的を達することはできない。第3の問題として、風と構造物の相互作用を明らかにしなければならないのである。即ち、われわれの課題は大きく分けて次の3つである。

(1) 風の性状 (2) 構造物の性状 (3) 風と構造物の相互作用

さて風の性状といってもいろいろある。構造物の耐風設計上は、どのような風の性質が問題になるかを考えねばならない。これの分類は、相互に関わり合っていることが多いので、列挙することは難かしいが、1例を挙げれば次のようになる。

- (1) 風の強さ、最大風速の値
- (2) 風速の高さ方向分布
- (3) 風速その他に対する地形の影響
- (4) 風の乱れの性質

風と構造物の相互作用についての問題も分類することは難かしいが強いて云えば、次のようにでもなろうかと思う。

- (1) 風圧係数，風力係数で表わされる問題，即ち静的な風力の問題，風洞実験法，規模効果
- (2) 風によって生じる構造物の振動の問題，即ち動的な問題，空力減衰，構造減衰の問題，空力弾性学上の問題

さらにこれらを分ければ，構造物の局部に作用する問題と全体に作用する問題となるし，強風時における室内圧も見逃がせない。

これらに関連して建築物の構造上の問題としては，大きく分けて構造物の強度と振動の問題が挙げられる。

風圧力は本来，動的な力であるから，これは振動の問題と結びつき，強度としては静的な強度を考えたのでは不十分で，動的な強度を調べるのが重要になる。

また，振動によって繰り返し応力を生じることから，構造材料の疲労 *fatigue* が問題となるばかりでなく，風圧力の作用時間の関係上，材料によっては，*static fatigue* の性質が明らかにされなければならない。

構造物の振動性状に関しては，地震工学上の研究が大いに役立つ。振動性状そのものは，本来地震によっても，風力によっても本質的に変わらないからである。ただ外力の加わり方は，大きく違っており，特に自励振動が誘起されることは，地震の場合とまったく異なっている。

以上のように，耐風問題の研究は，従来の学問の研究分野からいえば，いわば，境界領域に属するものであったが，その重要性が次第に認識されるようになり，その国際会議も第1回は英国において1963年に，第2回はカナダにおいて1967年に，第3回は，昨年9月東京において開催された。その提出された論文数も，第2回は23編，第3回は37編に過ぎなかったが，昨年の会議には，百余編が提出されている。論文数が必ずしも研究成果に比例するわけではないけれども，わが国から提出された論文は第1回，1編，第2回，3編，第3回は東京で開かれたこともあるが約50編になっている。このように耐風問題の研究は，最近数十年の間に，本格的に始められたといえるかと思う。

3. 最近における研究

以上に列挙した問題のうち，古くから行なわれていたことは，最大風速の値を求めること，風速の高さ方向分布を調べること，および，きわめて単純な風洞実験の程度である。最近大きく取り上げられるようになった問題は風の乱れの性質である。風の乱れの研究に関しては，専ら統計的手法が用いられ，主として風速変動に関する諸性質に関しては，多くの資料が得られている。ただし風圧あるいは速度圧そのものの変動の性質に関しては，やや資料が少ない。風の強さ，最大風速に関しては，各地の気象台や測候所の資料をもとに，一定の再現期間に対する最大風速の値が得られており，これが大いに役立つ。風速の高さ方向の分布に関しても，地上の粗度に応じてほぼその *profile* を求められるようになってきた。地表面粗度によって設計用風速の *profile* の形を変えようとする考え方は，最近の一つの進歩といえよう。ただし風速に対する地形や，地上物の影響に関しては，未だまとまった研究がなく，今後に残された問題が多い。特に，高層建築物の多く建てられる市街地内の風の性状に関する研究は少ない。市街地の風は，複雑であり，今後の研究が望まれる。

風洞実験は，最近ますます多く行なわれるようになり風洞の数も増し，大型化してきている。以前から吊橋の実験用としては，相当に大きなものもあったが，吹出口が横に広い割には，高さが低く，最大風速もあまり出なかった。最近カナダのトロントには縦横10mに及ぶものまで作られている。

さらに，最近の風洞は，所謂境界層風洞といわれる型のものが多く，風洞内で自然風にできるだけ近い風を再現することに，努力が向けられている。以前は，風洞内の風の乱れをいかにして少なくするかが重要であったが，現在は自然風の乱れや *profile* に，いかにして近づけるかが問題となってきている。

風の乱れによる構造物の振動に関しては，以上のような風洞で模型実験を行なったり，あるいは，若干の理論的研究も行なわれているが，理論的取り扱いが，きわめて複雑であり，模型実験では，規模効果の間

題について、今日なお不明な点が多い。

規模効果の問題は、何も動的な問題のみに限らないが、いずれにせよ、模型実験ではあくまで不十分な点が多いので実物の建物に関して測定を行なおうとするのが、最近の世界的傾向である。現在世界の約30の高層ビルにおいて、これらに作用する風圧力やその応答が測定されている。わが国では東京で5、大阪で1の建物について実験が行なわれている。自然風を対象とした実験は、風洞実験と違って、常に行なえるものではないので、実験結果の発表されたものは、まだあまり数は多くないが、いずれ近く多くの成果が挙がるものと期待できる。

風による自励振動に関する研究は、主として、模型実験によって行なわれているが、最近大いに進歩した。以前は、煙突の風による振動が、Karman 渦によるものであることぐらいしか知られていなかったが、煙突のような円形断面でなく四角な断面のものについても、不安定振動を生じることが知られており、その不安定の限界も近似的にはあるが、ほぼ求められるようになってきている。なお、吊橋についても、不安定振動を生じるおそれがあるが、これに関しては、風洞模型実験によって、ほぼ、その性質を握むことができ、新しい吊橋の設計に際しては、必ず風洞実験を行なうことが推奨されている。

4. 今後の問題点

構造物は、今後当分の間、ますます高くなり、大規模化する傾向にある。現在世界的に最も高い構造物は、モスクワのテレビ塔の高さ500m、最も高い建物は、ニューヨークの World Trade Center の高さ約440m、および近く出来るシカゴの Sears Roebuck の475mである。今後どの程度の高さのものまでできるかは、不明であるが、前述のように風力の問題はますます重要性を増すことは間違いない。それとともに、多くの種類の新しい問題が生じてきた。

建物が高層化すると振動が大きな問題となることも前述のとおりであるが、その振動の許容量については、未だ明確に求められていない。また、比較的高度の低いところの風の性質については、次第にわかってきているが高さ500m、600mあたりの風については、まだまだ資料が不足である。

高層ビルのまわりに生じる風の歩行者その他に対する影響も、最近の大きな問題である。その許される風についても明確な規準はないが、オーストラリアにおける、一研究によれば、瞬間的に風速 23m/sec を超えるのが年一回、あるいは、風速 15m/sec を超えるのが、全時間の1%以下といわれている。この規準が、そのままわが国に適用できるかどうかは、わからないが、このようなことも世界的な共通問題となっているのが一般の傾向である。市街地の風について、よくわかっていないことも前述のとおりである。

構造物の強度、とくに疲労強度や、荷重作用時間と強度に関しては、構造物全体についても、また外壁のカーテンウォール等についても不明の点が多い。耐風設計を行なうために、これらが今後に残された大きな課題である。

従来わが国の建物は高さを31mにおさえられていた。現在の大都市で、建物の機能を発揮するために、この高さは、余りに低すぎると思われるが、逆に現状は、高くなり過ぎる傾向にあるようにも思える。高さを限りなく増すことは、経済的にも不可能であり、おのずから、高さの限界があろうとは思いますが、当分の間は、ますます高さを増すことであろう。これについても必ずしも、全面的に賛成ではないが、高層建物をつくるのが、社会的要請であるならば、われわれは、これが安全となるように努力しなければならないと思われる。