

落橋した Tacoma Narrows 橋の架橋地点の地形状況は、その周囲の陸上部分が高くはない谷地で、橋本体は細い海峡上に架かっていた。したがって、そこに吹く風は、従来の観測例からみて、平均流方向の乱れの成分 v について考慮した乱れの強さ $\sqrt{v}/\bar{V}$ ($\bar{V}$ は平均風速) にして 10~13% 程度の乱れを含んでいると考えられる。また、Golden Gate 橋は開けた海面上に架かっているが、そこに吹く風には、測定された風速記録例をみると、乱れの強さ 12, 3% 程度の乱れが認められている。

このように、元来乱れを含む自然風の作用のもとで、例として挙げた上述の二大吊橋は、それぞれ典型的な振動現象を呈したと報告されている。旧 Tacoma Narrows 橋については、存続した 4ヶ月の間に、しばしば鉛直曲げ振動が観測された。きわめて低い風速においては対称 1 次、あるいは 2 次のモードが、風速が高くなるにつれて逆対称 2 次、対称 3 次と徐々に高次のモードが現われ、破壊に至る直前には風速 42 mph (19 m/s) で振動数 0.6 c/s の 84 の節を持つモードが認められていた。そして、この高次の鉛直曲げ振動が、突然逆対称 1 次の揺れ振動に変わり、この振動がしばらくの間続いた後に橋は崩壊した。この揺れ振動の振動数は 14 c/m であったが、振動は必ずしも純揺れではなく、若干の不規則性を有していたようである。

他方、下橋構のない初期の Golden Gate 橋も完成以来、風による振動をしばしば呈していた。この振動の観測は長期にわたって行なわれ、加速度と風速の記録がとられている。通常認められた振動の卓越モードは対称 1 次で、僅かながら揺れ振動を含んでいたが、鉛直曲げ振動が主であった。

たゞ一つの例外として、鉛直曲げと揺れの連成した逆対称 1 次の振動がかなり大きく発生したことがある。振動は 9~11 m/s 以上の風速ではいつも発生し、風速の上昇と共に揺れは増大した。これらの振動はいずれも不規則であった。

旧 Tacoma Narrows 橋の落橋原因究明のため、大規模な風洞実験が F. Farguhamson S. によって行なわれたが、これによつて、低風速では低次の鉛直曲げ振動が現われ、風速の上昇と共に高次の振動モードが認められている。そして、逆対称 1 次の揺れ振動がある風速で発生し、風速の上昇と共にその揺れが増大するという挙動を示している。この風洞実験は一樣な気流の中で行なわれたものであるが、その 117 ーンは実際橋でみられたものとかなり似かよっていることがわかる。鉛直曲げ振動が現れた風速とその振動数からストローハル数 ($St = ND/v$) をおぼえてみると、模型実験の場合には 0.094 となる。一方、実際橋では振動の発生する風速が正確に得られていないわけではなかつた、およそ 0.08~0.11 という値となり、この点においても双方の傾向は一致している。この鉛直曲げ振動はその性質からいわゆる渦励振による振動であるが、この種の振動が乱れた気流においても、以上のような実際橋の例からみても、場合によっては存在し得ることがわかる。

乱れた気流中の渦励振に基づく振動については、B. J. Vickery, D. Sarry S. の研究にもみることができ、それによつて、乱れの強さ 10% 程度の乱れた気流中にかかれた角柱等の作用空気力、あるいは応答の特性をみると、明らかに一樣な気流中の渦の発生による変動揚力スペクトルと同一ような卓越ピークが認められた。そして、その大きさは

は小さくなり振動をおさえる傾向を有しているようではあるが), また応答スペクトルについても渦励振に基づくピークが現われている。

Western Ontario 大学の境界層風洞研究室において著者らが行った研究によれば, 旧 Tacoma Narrows 橋と同じ H 断面の場合, 乱れの強さ 9% 以下では渦励振による鉛直振動が認められた。しかし, 15%, 19% の場合には同じ平均風速領域において卓越した振動は見られず, 規模の小さい不規則振動が認められるのみであった。このとき, 横揺振動については乱れの強さ 15% の場合まで発振が認められている。

旧 Tacoma Narrows 橋を崩壊に導いた横揺れ自由度の自励振動(失速フラッター)については, 大きく乱れた気流の中においても現われるという結果を得ている。ただし, 振中の規則性は乱れの強さが増大するにつれてとらえられている。発振風速については, 乱れが存在することによる影響はほとんどなく, 著者が確率論的に考察した発振風速に及ぼす乱れの効果は微小であるという考えを定性的に裏付けていると思われる。なお, 以上のような横揺れ 1 自由度の失速フラッターの振動傾向は, 正方形断面について観測される曲げ 1 自由度の自励振動(ギャロップING)のそれと極めてよく似ている。M. Novak は乱れた気流中のギャロップING問題について論じたが, 平均風速の鉛直分布, 乱れの強さを考慮した乱流中で, 鉛直におかれた正方形断面を持つ片持梁のギャロップING現象は概ねように激しさを示し, 断面周囲の流況が割合地のように大きく乱れている場合にも現われている。

前述のように, Tacoma Narrows 橋の架橋地点において, 風は乱れを含くんでいたに相違ないが, 以上のような失速フラッター型の自励振動の傾向は, 現実には振動が発生した事実, およびその他の推定条件を考へるようなつづけることであらう。

Golden Gate 橋の場合に見られた鉛直曲げを主とする不規則振動は, G. S. Vincent の研究からわかるとおり, その振巾を風速上昇と共に単調に増大させている。これらの不規則振動がみられたより高い風速で観測された鉛直曲げと横揺れの連成した逆対称 1 次の振動は, その特性から判断して 2 自由度の連成自励振動と考えられる。Western Ontario 大学における著者の研究によると, 一樣な気流においては, ある(限界)風速以上で連成自励振動が発生し, わずかな風速上昇に対し急激な振巾の増大を呈した。これに対して, 乱れのある気流の場合になると, 上述の限界(平均)風速に至るまでに, 鉛直曲げ, および横揺れ振動がともに不規則に現われ, 振巾の RMS が風速のほぼ二乗に比例して増大している。乱れの強さが 10% 程度の場合には, 限界風速附近で連成振動の性状はなおとどまっている。乱れた気流中の振動がこのような性質は実際の橋の示した応答のそれと比べてよく似ていると言えることができる。

鉛直曲げと横揺れの連成した自励振動, すなわち曲げ横揺れフラッターは, 平板において最も顕著に発生する。乱れた気流中では, 上述の Golden Gate 橋の場合より激しい不規則振動が, 鉛直曲げ, および横揺れ振動モードともに乱れについて個別の振動数で認められる。横揺れの振動数は風速の上昇と共に固有振動数から徐々に低下している。これらの特性は平板に作用する非定常空力を加えて考慮した, 調和外力を受ける系の振動解を求めることによって知りうる。すなわち, 振動数応答関数を各風速ごとに求めれば, そのピークでの振動数, あるいは応答の二乗平均を理論的に検証できる。ただし, 乱れの強さが 20% になると風速上昇と共に, 例えは横揺れ振動数の場合, 低下の傾向はあつたが限界風速近くでは期待される値より大きく, 振動としては単純な強制振動の型に近くなり, 上記の仮定が大きく崩れてまると考えられる。