ケーブルのレインバイブレーション Rain-wind induced vibration of cables

松 本 勝*
Masaru MATSUMOTO

最近、斜張橋の斜めケーブルが風雨時に時には激しい振動を示し、内外の話題を集めていることは周知のことである。これに類似の振動については、過去にカナダや日本において送電線が風雨時に振動を生じ、レインダンシングとかレインバイブレーションとか呼ばれているということであるが、詳細については知られていないようである。この振動は、その発現時に雨を伴っている場合が多いことからレインバイブレーション (rain vibrationあるいはrain-wind induced vibration) と呼ばれているが、その振動の激しさから、斜めケーブル定着点のケーブル疲労の問題やケーブル被覆材の破損、あるいは人間に対する不安感という点から、早急な対応が迫られている。このような背景のもと、我が国の斜張橋ケーブルの振動の有無の実態とその特性を調査するために、昭和63年より、(財)国土開発技術研究センターにより「斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討委員会」(委員長 横山功一氏)が構成され、約一年間調査研究が実施された。

ところで樋上¹⁾はこの問題について名港西大橋(中央スパン405m斜張橋)において、レインバイブレーションの様子を詳細に観察すると共に、実物ケーブル被覆ポリエチレン管(PE管)の部分模型を用いて人工降雨下での風洞実験で類似の振動の再現に成功している。それ以降、我国の他のいくつかの斜張橋においても同様のケーブル振動が観測されたことから、その振動の発生メカニズムの解明と有効な振動制御法に関し、いくつかの研究機関において研究が実施されその成果が報告されている。しかしながらこの振動発生メカニズムに対する解釈あるいは説明も研究者あるいは研究

機関により種々違っており、その振動の複雑さ、デリケートさを物語っているといえる。

現在までに我が国の斜張橋でレインバイブレーションと考えられるケーブル振動を示した数は5橋にのぼっており、そのいくつかについては、加速度計などを取り付け、かなり詳しくその振動挙動が測定されている。このような実物斜張橋のケーブル振動観測結果は前記の「斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討委員会」によってとりまとめられ、ケーブルのレインバイブレーションについて次に示すいくつかの特徴が明らかにされた。

- ・PE管被覆ケーブルに生じ、そのケーブル径は150mmから200mmで生じ易い。
- ・海岸に近い河口や湾岸の斜張橋に限られており、いずれも水面までの桁下空間は大きい。
- ・風速が6 m/sから18m/sの範囲で生じる限定的振動である。
- ・降雨時に生じ、時として霧雨状態でも発生したケースも報告されている。
- ・ケーブル振動の振動数は0.6~3.0Hzの範囲にある。
- ・振動が生じたときの風向は、橋軸直角方向よりある角度だけずれており、また、多くの場合、斜張橋タワーの下流に位置するケーブルが振動し易い。但しタワー上流側ケーブルも振動したケースも報告されている。
- ・ケーブルの振動はケーブル鉛直面内から少し離れた面内での振動も報告されている。

* 京都大学工学部土木工学教室
Dept. of civil Eng., Kyoto University
(平成2年1月18日 受理)

一方ケーブル模型を用いた一連の風洞実験による調査報告によれば次のような特性が明らかにされている。

- ・有雨時において風下に伴ってケーブルが下り勾配となるような姿勢（例えば $\beta \approx 45^\circ$, $\alpha \approx 45^\circ$ ）でケーブル上下面に水路が形成され、それによってケーブルが10m/s～15m/sの風速域で空力的に不安定傾向を示す¹⁾。特に上面の水路がより重要な役割を果たすものと指摘されている。また、 $\beta \approx 45^\circ$, $\alpha \approx 45^\circ$ の状態で上面にのみ水路に類似の人工的な僅かの突起を設けた場合にも空力的に不安定となることが明らかにされている²⁾。
- ・傾斜ケーブル（例えば $\beta \approx 45^\circ$, $\alpha \approx 45^\circ$ ）に人工降雨を与えた場合、その降雨量により応答特性が変化する。すなわち小雨の場合はある風速域で生じる限定的な振動になるのに対し、多雨状態では、ある風速で応答が生じ、以降風速の増加と共に振動が大きくなるいわゆる発散振動となる³⁾。
- ・ケーブル上面の水路がケーブルの振動に応じて非定常的にその位置を変化させることによってケーブルが空力的に不安定になり得ること⁴⁾。
- ・傾斜ケーブルそのものが雨の有無に無関係に空力的に不安定である。これはケーブル背面にケーブル軸に沿う強い流れ——軸方向の流れ——に起因するものと考えられる。つまり軸方向流れの存在はあたかも円柱背面のスプリッター板を挿入したことと同じ役割を演じ、ギャロッピング現象を発現させているものと考えられる⁵⁾。
- ・気流に含まれる乱れは無雨時ではケーブル振動を安定化するのに対し、上面に水路が存在する場合には、乱流中においても空力的に不安定となる。

以上の斜めケーブルの空力不安定振動諸特性から次のことが言えよう。すなわち、“斜めケーブル”は気流に対し、円柱が斜めの状態にあることによって、空気

力学的に不安定となる。この空力不安定現象は乱流中では安定化されるものの雨によって形成される水路（リブレット）により再び空力的に不安定となる。なお、空力振動がある風速域で（10～20m/s）で限定されるのは、ある勾配をもつケーブル表面上で、この風速域において特に上面で水路（リブレット）が空力的に不安定となる位置に形成され、それより低風速あるいは高風速域では水路が空力的に安定となる位置にずれるか壊されるかによるものと判断される。

なお、著者らが最近行った実験によれば、 $\beta = 0^\circ$ の円柱（つまり円柱に風が直角に作用）の場合でも、ある位置に人工リブレットを設置すると空力振動が生じ、その他の位置ではむしろ空力的に安定化する。このような空力的に不安定となる人工リブレットの位置は水平偏角 β によって変化することが明らかとなった。一方、 $\beta = 0^\circ$ の円柱において、円柱背後に人工的に軸方向流れを与えても、レインバイブレーションと類似の空力不安定振動が生じることが明らかにされている。

この2つの事実から、斜めケーブルのレインバイブレーションの発生メカニズムとして、

①斜めケーブル背後の二次的な軸方向流れ

②水路による突起物の存在

が独立して存在するものと判断される。一様流や弱乱流中（乱れ強度約5%）では振動が発散型であったものが、強い乱流（乱れ強度12%程度）では限定振動的になる。

今後有効な制振方法の開発、検討のためには、これらの基本的特性の他に、応答に及ぼすレイノルズ数の効果、雨量、ケーブルの姿勢、ケーブル表面状態、乱流特性、スクルトン数等の影響についての検討などが残されており、この方向の継続した研究が望まれる。

参考文献

- 1) 樋上琇一, “斜張橋ケーブルのRain Vibration” 日本風工学会誌第27号, 1986.
- 2) 松本 勝, 白石成人, 北沢正彦, 金 潤石, 辻井正人, “風雨条件下のケーブル振動現象に関する考察”, 第10回風工学会シンポジウム論文集, 1988.
- 3) K. Ohshima, M. Nanjo : “Aerodynamic stability of the cables of a cable-stayed bridge subject to rain(a case study of the Ajigawa bridge)”,

Proceeding of US-Japan Joint Seminar on Natural Resources, 1987.

- 4) 小西俊之, 山口宏樹, " 斜張橋ケーブルの Rain Vibration発生機構に関する解析的研究", 第43回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-331, 昭和63年.
- 5) 松本 勝, 白石成人, 北沢正彦, 辻井正人, 平井滋登, " 傾斜円柱の空力振動特性" 第10回風工学シンポジウム論文集, 1988.