

審査の結果の要旨

論文題目

Numerical study of wind-induced vibration and aerodynamic suppression of bridge cables

(橋梁ケーブルの自励振動と空力制振に関する数値予測)

氏名 李天

吊り橋と斜張橋で広く使用されているケーブルは、構造減衰比が低いために、風による振動がしばしば発生する。例えば、渦放出の周波数はケーブルの固有周波数と一致する時に渦励振が発生し、また風下側のケーブルは、風上側のケーブルの後流の影響を受け、ウェークギャロッピングが発生する。これらの風による振動は自励振動であり、橋梁ケーブルの疲労寿命に大きな影響を与える。これまで風洞実験により振動振幅の予測が行われてきたが、振動するケーブルの空気力計測の制約から現象の解明が不十分である。一方、数値流体解析は、振動振幅だけではなく、振動するケーブルの空気力および流れのパターンも同時に調べることができるため、現象の解明に役に立つ。

ケーブルの渦励振およびウェークギャロッピングを抑制するために、機械式ダンパーによる振動制御およびヘリカルワイヤーによる空力制振が考えられる。機械式ダンパーに比べ、ヘリカルワイヤーによる空力制振は、橋桁とケーブル間距離の制約を受けないため、機械式ダンパーの取り付け困難な場所にも使用できるメリットがあるが、ヘリカルワイヤーによる空力制御のメカニズムが解明されていないため、ヘリカルワイヤーの半径および間隔を適切に選択することは難しいと言われている。

そこで、本研究では、まず円形断面を持つケーブルの渦励振およびウェークギャロッピングを解析するための3次元数値モデルを提案した。次に1自由度および2自由度の単一円柱の渦励振を解析し、さまざまな解析条件が数値流体解析の予測精度に与える影響を実験結果と比較することにより検証した。そして、並列円柱の風下側にある円柱のウェークギャロッピングを解析し、円柱の質量比と間隔比がウェークギャロッピングに与える影響を明らかにした。最後に、数値強制加振試験により、円柱に対してヘリカルワイヤーの制振効果およびそのメカニズムを明らかにした。

第1章では、橋梁ケーブルの風による振動を紹介すると共に、風上側の円柱の渦励振および風下側の円柱のウェークギャロッピングに関する既往研究をまとめ、本研究の目的および概要を述べた。

第2章では、本研究で用いる3次元数値モデルを提案した。流体運動の支配方程式、数値解法、計算領域、メッシュについて述べると共に、円柱の振動方程式および流体と構造の連成解析手法について説明した。

第3章では、単一円柱の渦励振に関する数値流体解析を行った。スパン長と側面境界条件が空気力の予測精度に対する影響を調べると共に、数値流体解析の予測精度を実験により検証した。水中および空気中の単一の円柱の振動および流体力については、1自由度と2自由度を持つ円柱に対して2次元と3次元数値流体解析を実施した。その結果、渦励振の最大振幅は、2次元k- ω モデルにより過小評価されるのに対して、3次元LESモデルにより高い精度で予測されることを明らかにした。

第4章では、並列円柱の質量比と間隔比がウェークギャロッピングに与える影響を系統的に調べた。流直角方向に振動する場合の発振速度は、並列円柱の質量比と間隔比の増加に伴い増加することを明らかにした。また、並列円柱のウェークギャロッピングの発振流速を予測するために、空力剛性に着目したモデルを提案し、質量比と揚力勾配を関数とする予測式を導出した。提案した発振流速モデルを用いることにより、並列円柱の質量比と間隔比が並列円柱のウェークギャロッピングに与える影響を定量的に評価することに成功した。

第5章では、ヘリカルワイヤによる円柱の渦励振及びウェークギャロッピングに対する抑制効果を定量的に評価した。径間比 $p/D=8$ および直径比 $d/D=0.1$ の4本のヘリカルワイヤを用いることにより、円柱の渦励振及びウェークギャロッピングが抑制されることを示した。ヘリカルワイヤによる効果の一つは、円柱のスパン方向の流れ場の3次元性の増大および揚力のスパン方向相関の減少に伴う揚力係数の減少により説明された。さらに、ヘリカルワイヤを有する円柱の空力減衰を数値強制振動試験により解析した。その結果、ヘリカルワイヤを有しない円柱の空力減衰が負であり、システム全体の減衰も負になるため、渦励振とウェークギャロッピングが発生する。一方、ヘリカルワイヤを有する円柱の空力減衰が正であり、システム全体の減衰も正になるため、渦励振およびギャロッピングが抑制されることが分かった。

第6章では、本研究から得られた結論をまとめている。

本研究から得られた成果は、橋梁ケーブルの渦励振及びウェークギャロッピングを数値流体解析により精度よく求める新しい手法を提案するとともに、ヘリカルワイヤによる渦励振及びウェークギャロッピングの抑制メカニズムを解明するものである。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。