

氏 名 寺 崎 浩
 授 与 学 位 博士 (工学)
 学位授与年月日 平成27年3月25日
 学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
 研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 都市・建築学専攻
 学 位 論 文 題 目 風外力を受ける高層建物の外装材疲労損傷評価に関する研究
 指 導 教 員 東北大学教授 植松 康
 論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 植松 康 東北大学教授 持田 灯
 東北大学教授 木村 祥裕

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

建築物は弱風から台風などの強風時を含め、常に風外力にさらされており、風外力は地震外力に比べて作用時間が極端に長いという特徴がある。そのため、設計荷重に対して耐力設計された部材の風荷重による疲労損傷破壊防止は、設計上重要な検討項目であるが、構造骨組に比較して外装材の疲労設計はほとんど検討されていないのが現状である。今のところ、外装材が疲労破壊するトラブルは顕在化していないが、竣工以来長期間経過してきている超高層ビルの存在や、昨今の建築物の高層化および長寿命化の傾向を考えると、品質確保の一環として疲労破壊を確実に防ぐこと、疲労破壊に至らないまでも建物供用期間中に蓄積する累積疲労損傷率を適切に評価することが設計上重要となる。本章では、外装材の疲労損傷に関する既往論文の概要をまとめた結果から、日本に多数存在する高層建物の外装材の疲労損傷についての研究例は多く見られないため、高層建物を本研究の検討対象とした(図1)。本研究では、風洞実験結果に基づいて疲労損傷率を詳細に検討し、風向・風速変化を考慮可能とした詳細な疲労損傷率評価法および設計に用いる簡便な疲労損傷率算法を提案することを目的とする。

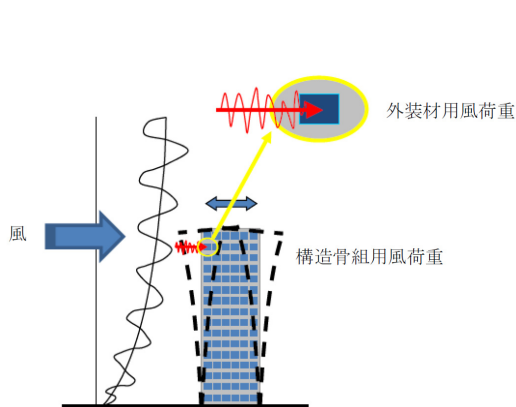


図1 風外力を受ける高層建物の例

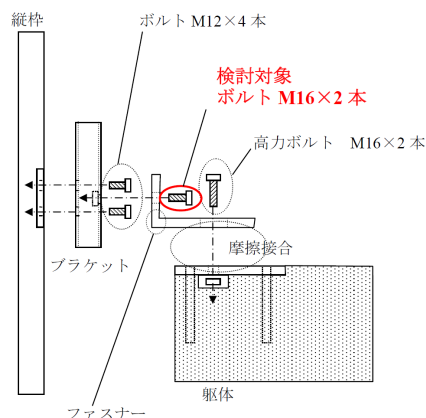


図2 疲労検討対象部位とした帳壁(C.W.)緊結部の概要

第2章 疲労評価対象

代表的な超高層建物として高さ 200m、塔状比 4 のオフィスビルを想定した。帳壁には幅 1.8m×高さ 4.8m のカーテンウォール(以下、C.W.)を仮定した。C.W.本体部材と応力伝達経路部材の中では緊結部ボルトが応力的に最も厳しい部位となることから、本研究では C.W.の緊結部ボルトを疲労検討対象部位とした(図 2)。外装材設計用風速は、平成 12 年建設省告示第 1454 号で与えられる基準風速 V_0 を採用し、帳壁の設計用風荷重は建設省告示第 1458 号により算定する。疲労検討対象の強度区分 4.6 のボルトについて、疲労設計に用いる基本疲労強度および疲労曲線は、建築や機械に関連する規・基準では与えられていない。そのため、本論文では疲労設計指針に示される直応力を受ける高力ボルトの値を準用した。

第3章 風洞実験による疲労評価用風圧の時刻歴

検討対象とする高層建物の帳壁に作用する風外力の時刻歴のデータとして使用した幅(B):幅(D):幅(H)=1:1:4 の 3 次元角柱模型による変動風圧実験の概要を示し、実験結果として外圧統計値の壁面分布と代表点の風向による変化の性状を示した。風圧模型は縮尺率 1/500 で作成し、476 点の風圧計測点を壁面に配置した。実験気流は地表面粗度区分Ⅲを目標として作成した境界層乱流である。多点同時変動風圧計を用いた風圧の計測条件は、サンプリング周波数 1,000Hz、データ個数 32,768 個とした。計測した外圧時刻歴は、チュービングシステムの応答特性補正後、実 POD 解析により基準モード時刻歴に変換して各計測点間の風圧変動の相関関係を保ちながらナイキスト振動数まで補正(外挿)した。ピーク値の評価時間を実大 0.24 秒相当とした最小ピーク外圧係数の実験値は-3.20 であり、平均化時間を 1 秒とした場合は-2.88 であった。建設省告示第 1454 号や日本建築学会 建築物荷重指針の帳壁端部における最小ピーク外圧係数-3.0 は評価時間を 0.5~1 秒として定められた値であることを考慮すると、本実験では告示等のベースになった実験と同程度の値が得られていると考えられる。

第4章 風圧の時刻歴から評価した疲労損傷率

風圧実験で得られた時刻歴を用いて、検討対象の帳壁緊結部ボルトの 10 分間疲労損傷率の分布性状およびその値を検討した結果、以下の知見を得た。検討にあたっては、帳壁に作用する風力の方向(符号)と、検討部材に発生する応力の方向(符号)を対応させる変数 C_{DR} を導入した。角柱状建物の場合、帳壁の緊結部に疲労損傷率が大きくなるのは、風向に対して側壁面となる壁面であり、風上壁面、風下壁面ではあまり疲労は蓄積しない。最大の疲労損傷率となる部位では、稀に発生する極端に大きなスパイク状の応力振幅の影響が大きく、この取扱いに関しては今後さらなる検討が必要である。打ち切り応力(疲労限)以下の振幅は算定した疲労損傷率にほとんど寄与しておらず、算定上有効な応力振幅はある程度大きな振幅で、その数はカルマン渦の発生回数に概ね対応していた。修正 Goodman 法を用いて応力振幅の平均値が疲労損傷に及ぼす影響を検討した結果、応力波形の正負を逆転させたケース間では疲労損傷率に 100 倍程度

の差が生じることが分かった。また、疲労損傷率に及ぼす風速の影響に関する検討においても平均値成分の影響は大きく、疲労損傷率を算定する際に平均成分を適切に評価することが重要であることが示された。

第5章 詳細な外装材疲労損傷率評価法の提案

本章では変動風圧実験で得られた変動外圧時刻歴を用いて、帳壁緊結部のボルトにおける実大 10 分間相当の疲労損傷率の特徴を検討し、帳壁内で疲労損傷率が大きくなる部位の代表的な 3 点について、疲労損傷率の近似式を用いたモデル化を検討した。疲労損傷率の算定には無次元化した応力係数を導入した。設計風速時 10 分間に作用する応力サイクル数は 500～1,000 程度の値となるが、モデル化においては、疲労損傷率の値に影響する振幅が大きな応力サイクル数の目安として、カルマン渦の発生回数約 60 回を用いた。この近似用応力サイクル数に基づいて、応力振幅およびその平均値を風洞実験による風力係数から近似する式と係数を提案し、モデル化の基本となる設計風速における全風向中最大の 10 分間疲労損傷率の近似値 d_{10} の算定方法を示した。外力の平均成分が疲労損傷率に与える影響は大きく、同一波形の正負を逆転させた場合、疲労損傷率に 400 倍以上の差が見られるケースもあり、疲労損傷率の風速・風向による変化にも平均成分は大きく影響することを示した。モデル化にあたっては代表点や条件毎に異なった係数を設定した。疲労損傷率の近似値 d_{10} の風向による変化は風力係数の時刻歴の変動成分に基づいた係数で近似し、風速による変化は、設計風速と検討風速の風速比に基づいた係数で近似した。本章のモデル化は非常に多くの簡略化と仮定条件に基づいているが、風向・風速を考慮した疲労損傷率の近似値を用いることにより、実験値に基づく場合に近い精度で疲労損傷率を検討可能と思われる。ただし、検討に用いる設計風速がそれぞれの近似値に与える影響や、別実験の統計値の適用など、汎用的な設計手法として本章における手法を展開するためにはさらなる検討が必要である。

第6章 過去の気象観測データに基づく 50 年間の疲労損傷率

風圧実験結果から算定した風向および風速に対応した 10 分間の疲労損傷率と、1963 年～2012 年の 50 年間の気象観測データを組み合わせ、日本国内 14 地点に建設されたと仮定した高さ 200m の高層ビルの C.W. の緊結部ボルトに、50 年間で蓄積される疲労損傷率の値および疲労損傷率に占める各風向・風速レベルに対する値の割合を検討した。50 年間の疲労損傷率が大きな値となったのは、50 年間の最大風速が設計風速を超えるかまたはその近傍の値となる地点であったが、疲労損傷率の値は小さく、全ケース中の最大値は 0.066 であった。建物が敷地に設置される角度によって外装材の疲労損傷率が、最大 2,000 倍も変化することを確認した。鹿児島における風向方位および風速レベル別に疲労損傷率を検討したところ、疲労損傷率が大きくなる建物配置角度においては、疲労損傷率に占める割合は高風速域による値が支配的であった。実験による全風向中で最大の疲労損傷率を用いた「風向を考慮しない」ケースとした疲労損傷率は、風向を考慮した場合の最大の疲労損傷率に対して 1.11～3.28 倍の値となっており、「風向を考慮しない」評価によりやや安全側の評価が可能となることを示した。(図 3)

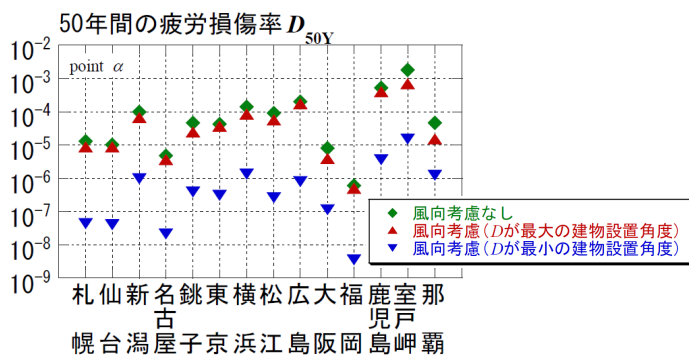


図3 50年間に蓄積する疲労損傷率

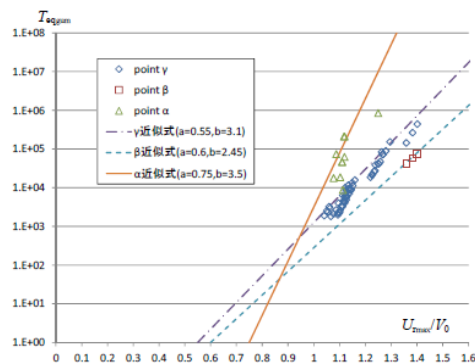


図4 等価作用時間の近似結果

第7章 気象統計値に基づく建物供用期間中の疲労損傷率

気象統計値に基づいて、将来の建物供用期間中に蓄積する疲労損傷率の値およびその蓄積性状を検討した。検討は、第6章の検討結果より「風向考慮なし」を対象とした。風速の発生分布とその作用時間は、Gumbel分布で表される強風域とWeibull分布で表される中弱風域を重ね合わせた分布および作用時間を用い、強風域については台風を代表的な強風として考え、1年あたり3回の強風を考慮して建物供用期間50,100,200年間に蓄積する疲労損傷率について検討した。疲労損傷率が相対的に大きな値となり、疲労損傷発生に注意しなければならないケースは、設計時の安全率が低いケースであった。検討結果から、建物供用期間中に蓄積する疲労損傷率 ≥ 0.5 となるケースにおいては中低風速による疲労損傷率を考慮しなくても、強風域のみを考慮することで疲労損傷率を評価可能であることを示した。

第8章 簡便な外装材疲労損傷率評価法の提案

帳壁外装材の簡便な疲労損傷評価方法として、設計風速時の10分間疲労損傷率とモデル化した等価作用時間を用いて建物供用期間中における安全側の疲労損傷率を算定する方法を示した。本評価方法は、建物の耐風設計に用いられる再現期間100年および500年の風速値のマップより読み取った値(U_0 および U_{500})と建物供用期間 r 年の情報から、建物供用期間(r 年間)の等価作用時間を近似式で与えることにより、疲労損傷値を算定可能としているのが特徴である。ここでは、第6章および第7章の検討結果より、「風向考慮なし」、Gumbel分布で表される強風域のみを考慮して疲労損傷率と風速の等価作用時間を検討した。検討に用いた建物の供用期間は50年～500年で日本国内32地点におけるパラメトリックタディを実施した。供用期間中に蓄積する強風域の疲労損傷率と設計風速10分間の疲労損傷率の比である強風域の等価作用時間を、供用期間中の最大風速と設計風速の比に対して近似した結果を示した(図4)。

第9章 結論

第1章から第8章で得られた主な結論をまとめた。本研究で提案した外装材の疲労損傷に関わるモデル化および疲労損傷算定法の考え方は、風洞実験等で風外力特性を評価することにより、他の外装材にも適用可能である。

論文審査結果の要旨

現在、建築構造物の耐風設計において外装材の疲労設計はほとんど検討されていない。本研究は、外装材の疲労損傷に着目し、外装材特有の外力等の特徴を考慮し、その疲労損傷評価法を示したものであり、全編9章よりなっている。その中で、外力の有する平均成分が疲労損傷率に与える影響と、疲労検討上有効な風速とその作用時間の特性が明らかにされ、外装材の疲労損傷率算定方法が提案された。

第1章は序論であり、本研究の目的と背景が述べられている。

第2章では、疲労評価対象の概要が述べられている。高さ200mの超高層建物の帳壁(カーテンウォール)を対象として、作用する応力が大きい帳壁緊結部ボルトを疲労検討部位とし、疲労特性としては疲労設計指針で与えられる高力ボルトの特性を準用することが述べられている。

第3章では、疲労評価用の風圧の時刻歴を得るため、角柱状の風圧模型を用いた変動風圧測定を行った。実験の概要とデータ評価方法および実験結果が述べられている。

第4章では、第3章で実施された風洞実験で得られた風圧の時刻歴から単位時間中に蓄積する疲労損傷率を検討した。角柱状建物の場合、疲労損傷率が大きくなるのは、風向に対して側壁面となる壁面であり、風上壁面、風下壁面ではあまり疲労は蓄積しないこと、外力の平均成分が疲労損傷率に与える影響が大きいことを示し、打ち切り応力(疲労限)以下の応力振幅は疲労損傷率にほとんど寄与せず、疲労損傷率の算定上有効な応力振幅はある程度大きな振幅で、その数はカルマン渦の発生回数に概ね対応していることが示されている。

第5章では、第4章で検討した疲労損傷率の詳細なモデル化(近似式)を提案した。無次元化した応力係数を用いて疲労損傷率を算定する方法を示し、一般的な風圧実験結果から風向・風速による変化を考慮可能な疲労損傷率の詳細な近似式を提案した。

第6章では、実験結果に基づいた疲労損傷率と過去50年間の気象観測データを組み合わせて、50年間に蓄積する疲労損傷率を検討した。その結果、建物の設置角度によって疲労損傷率に2000倍もの差が生じることを明らかにし、実験による全風向中で最大の疲労損傷率を用いた「風向を考慮しない」ケースを想定することにより、安全側の評価が可能となることを示した。

第7章では、気象統計値に基づいた建物供用期間中の疲労損傷率を検討した。風速を中低風速域と年3回の台風を考慮した高風速域に分け、パラメトリックスタディの結果から、疲労損傷率が大きくなるケースでは強風域のみを考慮することで疲労損傷を評価可能であることを示した。

第8章では、第6章および第7章で得られた知見に基づき、等価作用時間の概念を導入して、最大風速と設計風速の比に基づく簡便な疲労損傷率評価法を提案した。

第9章は結論で、各章のまとめと共に本研究で提案した疲労損傷に関わるモデル化および疲労損傷算定法の考え方が風洞実験等に基づく検討により、他の外装材にも適用可能であることが述べた。

以上、要するに本論文は、外装材疲労設計のために、高層建物の帳壁を例として外装材に作用する風力特性および疲労損傷率の特性を明らかにして、外装材に蓄積する疲労損傷率を詳細に近似する方法および簡便な疲労評価方法を提案したものであり、今後の建築物の安全性に寄与するものである。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。