

エアドーム用吊り下げ型照明器具 動きを考慮した重量の考察

マルクス・ファン・デル・ヘイデン

スポーツ会場でますます人気が高まりつつある布製の空気支持型構造を対象に、照明の仕様を定義する場合、急に脱離するリスクを回避するために、LED照明製品の革新的な取り付け方法が必要である。

空気支持方式のドーム構造は、特に1年の大半が悪天候となる地域において、スポーツ会場を覆う手段としてますます人気を高めている。実際、そうした構造の中で長い間、著名なプロや大学のスポーツ競技が行われてきた。しかし今、エアドーム技術は、娯楽スポーツまでをも含む、はるかに幅広い用途に適用できるようになっている。ただし、照明の仕様定義者は、細心の注意をもってそのような施設を照らす照明を選定し、照明器具が布構造に印加する荷重を理解する必要がある(図1)。本稿では、高品質な照明体験が提供できるように、構造的要件を考慮に入れるための指針を示す。

仕様を定義するにはまず、軽量であるとともに、用途に求められる光品質を提供できる照明器具が必要である。例えば、米グリーン・アーク・エナジー・アドバイザーズ社(Green Arc Energy Advisors)は、「Eclipse」という軽量で耐久性に優れたメンテナンスフリーのLED照明器具を提供している。静荷重はわずか17.5lb(約7.9kg)である(図2)。しかも、このLED照明器具は演色性に優れ、フィールドまたは競技面全体にわたる理想的な配光範囲を備え、10万時間を超える有効使用期間を通してエネルギーコストを大幅に削減する。

Eclipseの吊り下げ時の静荷重は、



図1 有名な東京ドームのような空気支持型ドームに照明を取り付ける際には、注意深い考察が必要である。(写真出典: ウィキメディア・コモンズ [Wikimedia Commons] に掲載されている真正という作者の画像。CC BY-SA 4.0の下で使用)

25lb(約11.3kg)という空気支持型構造の標準的な最大吊り下げ静荷重よりはるかに軽いですが、問題は静荷重だけではない。この照明器具には本質的に動きがあり、ドーム内面に固定された当て布に取り付けられる。エアドームに吹き付ける外風によって垂直方向から30°揺れる動きが生じると、照明器具には26.5lb(約12kg)もの動荷重が発生する可能性がある。その動荷重は、(支持する当て布からの)引裂強度の最大しきい値である36lb(約16.3kg)を大きく下回るが、仕様定義者は信頼性を確保するために、そのような応力を計算できなければならない。

本稿では、任意の膨張式構造におい

て、吊り下げ型照明器具の重量と最大しきい値、そして取り付け方法が重要となる理由について考察する。本稿の議論は、照明器具がドームの支持布から脱離して、下にいる人に怪我をさせることがないように、膨張式構造に関わるすべての人々がこの概念を考察しなければならないことを示すものである。

増加の一途をたどるドーム構造

スポーツや娯楽活動をはじめとするさまざまなイベントを支えるエアドーム構造は、米国やカナダ全域に多数存在する。実際、世界最大級のエアドームであるSports KingDomeが、ニューヨーク州イーストフィッシュキルに

2019年下半年に開場する予定である。天井の高さは160フィート(約49m)、フィールド面積はおよそ35万平方フィート(約3万2500m²)に及ぶという。図3は、ニューヨークにあるゴルフ練習施設のドームの外観である。デザインやサイズは一般的にまちまちだが、すべての膨張式構造で、均等に圧力をかけるといふ動作原理は同じである。つまり、内部圧力は構造に印加される外力(特に強風や豪雪)と等しいかそれ以上でなければならない。

エアドームの完全性を維持するには、膨張レベルを状況に応じて調整しなければならない。一般的には、コンピュータ制御の機械システムによって構造の膨張度合いをモニタリングし、それを基に自動調整が行われる。当然ながら、大多数のエアドームが風や積雪荷重などの外力に対応するように設計されており、安全で安定した構造となっている。また、常設的に使用することも、1年のうちのいずれかのシーズンに一時的に使用することも可能だ。膜の部分は、水分や紫外線から保護するためにポリマーでコーティングされた、ファイバークラスやポリエステルなど、耐久性を備えつつも柔軟性の高い合成材料でできているためである。

それでもエアドームはさまざまな風速にさらされ、モニタリングシステムによって印加圧力が調整されるとはいつても、上下に動いたり揺れたりといった現象が必然的に生じる。従って、照明器具のように内部に吊り下げられた部品にも、ある程度の動きが生じるのは避けられない。もちろん、それは自然なことであり、予期される現象である。しかし、照明器具が重すぎると、強風によって照明器具が動いた場合に当て布やDリングなどの支持材にかかる応力に完全に対応できず、問題が生



図2 比較的軽量なLED照明器具である「Eclipse」は、エアドームから安全に吊り下げることができる。(写真提供:グリーン・アーク・エナジー・アドバイザーズ社)

じる可能性がある。それによって照明器具が激しく揺れ、破損したり当て布から脱離したりする危険性が生じたり、コート面やフィールドに落下したりする恐れもある。

ドームの照明

エアドーム内に取り付けられた当て布に重い照明器具を吊り下げることが、エアドームの所有者らは問題視し、LEDを採用する照明器具への移行を検討し始めている。ドームや照明器具メーカーの間のあいまいな部分をなくすことを目的に、ニューヨーク市を拠点とするグリーン・アーク・エナジー・アドバイザーズ社は、米アルゴンヌ国立研究所(Argonne National Laboratory)の元研究フェローで物理学者のO・セッパー博士(O. Sepper)に、吊り下げ型照明器具が動く場合の実際の影響の解析を依頼した。エアドームは静的な構造ではないため、風を受けて絶えず動くことによって、支持材に負荷を与える動きが生成される。それは、固定の鉄骨建築物では本質的に生じない現象である。先端の高さが60フィート(約18m)以上の大きなドームの場合、中心から任意の方向に5フィート(約

1.5m)以上動くのは珍しいことではない。風速20mph(約32km/h)を超える持続風や突風が吹き荒れる厳しい天候下では、それに応じてドームの動きも増幅される。

一般的に、多くの既存ドームで使われる当て布は、直径8~10インチ(約20~25cm)で、ドームの膜に化学接着または熱融着される。そうした標準的な接着方法において、稼働時の最大推奨静荷重は約25lbで、引裂強度は最大36lbである。そのしきい値(36lb)を超えると、当て布が破損し、最終的には照明器具がドーム内に落下する恐れがある。

グリーン・アーク・エナジー・アドバイザーズ社の上級副社長を務めるガイ・アルバート・デ・シメイ氏(Guy Albert de Chimay)は、次のように説明した。「解析を依頼した結果、最大許容重量が36lbであることが確認できた。つまり、吊り下げ可能な器具の静荷重は最大25lbということになる。これは、照明器具が動く場合に、振り子に似た原理が働くためである。照明器具が動くとき、弧の最下点、つまり最も低い点で、その運動エネルギーは最大となり、荷重は25lbの静荷重を超えて、最大でそ

の150%にまで達する。その荷重が吊り下げケーブルにかかり、当て布の引張力を増加させることになる。引張力は最大で25lbの150%となり、36lbという推奨しきい値を大きく上回る可能性がある」。

法的責任を問われる可能性

当て布の接着品質、当て布やドームの使用年数も、この限界値に大きく影響を与える可能性がある。また、多くのドームがそれぞれ何度か改修されていることを考えると、当て布の使用年数、接着品質、ドームの使用年数は同一ではないかもしれない。デ・シメイ氏によると、「実際に、重量が28～32lb(約12.7～14.5kg)の誘導式照明器具の設置によって、当て布が破損した事例が複数存在する」という。

これは非常に深刻な問題であるため、ドーム設営関係者はそのような照明器具を取り付けることを嫌がるケースが多い。ドームの設置や解体を請け負うプロの設営業者は、そのような照明器具の取り付けに重大な法的責任が伴うことを理解している。「ドーム設営業者は、照明器具の有効重量について、絶対に30lb(約13.6kg)近くにはしたくないと考える」と、デ・シメイ氏は述べた。

重傷の危険性以外にも、所有者の観点からの重要な項目として、ドーム所有者の一般賠償責任保険の適用が無効になる危険性が挙げられる。Dリングの当て布の最大稼働荷重は、ドームの運用マニュアルに一般的に記載されているため、制限値を無視した場合は、法的責任を全面的に問われる恐れがある。「グリーン・アーク社は、穴を通して膜に沿わせたパワーケーブルの力を利用して、エアドーム内に照明器具を吊り下げている。これにより、膜から最大100フィート(約30m)のケーブル



図3 ニューヨークにある1万7000平方フィート(約1579m²)のゴルフ練習施設を覆う空気支持型ドーム。(写真提供:グリーン・アーク・エナジー・アドバイザーズ社)

に対してかなりの大きさの摩擦力が生じ、万一当て布が破れることがあっても、ケーブルがバックアップとして機能し、照明器具の落下が防がれる。これは極めて重要な物理特性であり、照明器具の下でスポーツや活動に従事する人々を守ることを目的としている」とデ・シメイ氏は述べた。

数学的解析

エアドームが風力を受けて動く場合にその内部で実際に生じる現象を明らかにするために、セッパー博士は以下の解析を行い、より大きな視点でこの概念をとらえられるようにした。最も重要な点は、照明器具が揺れる場合にDリングの当て布にかかる荷重は、照明器具の静荷重ではないということである。照明器具が、設置点の真下にある中心から約30°の角度まで揺れるのは、よくあるケースである。セッパー博士によると、揺れる照明器具の有効重量は、以下の式で近似できるという。

$$W=W_0[3-2\cos(\theta)]$$

W_0 は照明器具の実際の重量(19lb[約8.6kg])、 θ は揺れる動きの最大角度である。この近似式では、照明器具を重心に置かれた質点として扱っている。近似式の結果は、Dリングからのケーブル長に依存しないが、 θ はドームの動きとケーブル長に依存する。

例えば、 $W_0=19\text{lb}$ で、最大揺れ角度を30°とすると、弧の最下点における有効重量は、 $W=24\text{lb}$ となる。

次の計算では、照明器具を振り子とみなす。そのためには、正確な質量分布(長さの正確な測定と、照明器具を構成する各要素の重量)が必要である。上の式は、有効重量の上限を示している。

大きな不確か係数は、揺れる動きの角度で、一般的にはドームの動きと照明器具の質量分布に依存する。角度の不確か性に基づく有効重量の増分は、次のように近似される。

$$\Delta W=2W_0 \sin(\theta)\Delta\theta$$

$\Delta\theta$ が5～10°であるとする、すべてのパラメータを同じに保った状態で、

重量の増分は最大3lb(約1.4kg)となる。

最大角度を求めるために、ドームの動きがどのように照明器具の動きに変換されるかについて、仮定を立てる。ドームの動きに対する照明器具の即座の反応に基づく近似を利用すると、結果は次のようになる。

$$\tan(\theta)=k x/L$$

ここで、 x はドームが動いた距離(例:5～6フィート[約1.5～1.8m])、つまり変位で、 L はDリングからのケーブルの長さ(例:8～10フィート[約2.4～3m])である。 k は、速度、抵抗、振動が同期しているかそれとも位相がずれているかなど、多数の変数に依存する実験係数である。グリーン・アーク社は、いくつかの合理的な値を試した。ほとんどの状況において、 k は約1となるはずだが、 $k=0.5$ や $k=2$ となる可能性もある。

以上の解析結果をまとめると、次のようになる。

$$W=W_0[3-2\cos(\theta)]$$

$$\tan(\theta)=k x/L$$

上記の解析の実環境における意味を理解できるように、図4と図5に、有効重量と変位の関係と、有効重量と角度の関係のグラフを示す。青色のラインは36lb、赤色のラインは19lbから開始し、変位とともに増加する様子を示している。最大有効重量は、19lbの照明器具の場合で25lb、36lbの場合で48lb(約21.8kg)である。これらの結果は、照明器具の変位がドームの変位に比例するという仮定に基づいている。点線は、起こり得る範囲を示している。推進力(ドーム)が振り子と同調して動く場合に、揺れる動きの振幅が

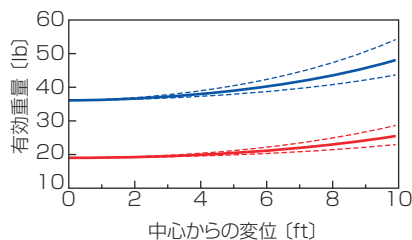


図4 有効重量とエアドームの変位との関係。(写真提供:グリーン・アーク・エナジー・アドバイザーズ社)

著しく増加する可能性がある、共振という現象が存在する。しかし、この増加を抑制する減衰効果も存在する。点線は、そのような効果の一部をとらえている。

解析結果のまとめ

要するに、エアドーム構造の正常稼働時に、Dリングにかかる照明器具の荷重は簡単に50%近く増加する可能性があることを認識することが重要である。ドームの動きに伴って照明器具も動き、その影響は実証可能である。端的に言って、35lb(約15.9kg)の照明器具をドーム内で簡単に支持できるという仮定は、ドームそのものの物理特性に逆らっている。動いているときの照明器具の重量は最大で48lbにも及ぶ可能性がある。実験データしか示していないものの、本稿に示した解析は、より大きな当て布を追加したとしても、フィールドやコート面の上に35lb以上の照明器具を吊り下げるのは賢明ではないという概念の裏付けになるはずである。

グリーン・アーク・エナジー・アドバイザーズ社は、優れた光度、演色性、エネルギー効率はもちろんのこと、エア

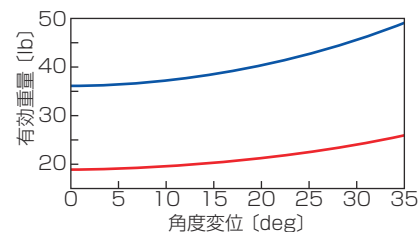


図5 有効重量と垂直方向から最大35°までの角度変位との関係。(写真提供:グリーン・アーク・エナジー・アドバイザーズ社)

ドーム内における安全性、実用性、適合性を明確な目的として、すべてのLED照明器具を適切に設計している。「解析により、重いメタルハライド照明器具が30°揺れると、最大しきい値を上回ることを知ることができた。しかし、当社の独自のLED照明器具は、最大しきい値を大きく下回っている。17.5lbに150%を乗じてはまだ26.4lb(約12kg)なので、最大しきい値にはまったく届かない」とデ・シメイ氏は述べた。

グリーン・アーク社の独自のLED照明器具は、米国の12を超える最大規模の空気支持型ドーム構造に設置されているが、市場に提供されてからの5年間で一度もDリングが故障したことがない。

デ・シメイ氏は最後に、「結局のところ、エアドームのような任意の種類の膨張式構造内における、吊り下げ型照明器具の重量を把握することが極めて重要である。軽量な照明器具を採用し、物理特性を理解しておくことが、器具が破損する危険性を大幅に軽減し、その下で活動する人々に器具が落下した場合に、所有者や運営者が損害賠償責任を問われる可能性を回避することにつながる」と述べた。

著者紹介

マルクス・ファン・デル・ヘイデン(MARCUS VAN DER HEYDEN)は、米グリーン・アーク・エナジー・アドバイザーズ社(Green Arc Energy Advisors)のクリエイティブ・マーケティング・コンサルタント。URL: <http://www.greenarceadv.com/>