

複合炭素繊維補強コンクリート造 円筒殻の損傷評価に関する基礎的研究

真下和彦

Fundamental Study of Damage Assessment of Concrete Cylindrical Shells Reinforced with Composite Carbon Fiber.

by

Kazuhiko MASHITA

1. まえがき

1. 序論

本研究の主目的は静的及び動的の荷重を受ける複合炭素繊維補強コンクリート造屋根形円筒殻の破壊形態及び損傷程度の相互関係を動特性の観点から実験的に究明することである。複合炭素繊維補強コンクリート(CCFRC)造は、コンクリート造内部に炭素短繊維を混入し、コンクリート外表面に炭素繊維シートの接着補強を施すことにより、複合炭素繊維補強としたものである。また、炭素繊維シート補強コンクリート(CFSRC)造は通常の鉄筋コンクリート造シェルに炭素繊維シートを補強したものである。既往の研究により、これらの炭素繊維シートを部分的に補強したものは、シェル破壊範囲の縮小化等に対して有効であることが確認されている¹⁾。この研究を踏まえ、新たに実験供試体の全面に炭素繊維シートによる補強を行い、検討を行った。検討には破壊実験前後で自由振動実験を行い、シェルの損傷度合いに対応する振動特性の変化を特定した。

実験は小型実験供試体を作製し、シェル面中央部への動的または静的荷重による破壊実験を行なった。また、破壊形態の程度を定量的に求める指標として、破壊実験前後に固有振動数及び減衰定数を求め、比較検討を行った。

以上より、複合炭素繊維補強コンクリート造シェルを対象とした破壊実験と、実験前後に行なった自由振動実験結果に基づき、シート補強範囲の相違と対応したシェルの破壊形態に基づく振動特性の変化を究明した。以上より、複合炭素繊維補強されたコンクリート造円筒殻の損傷状況を、自由振動実験の結果から明らかにした。

2. 実験の概要

CFSRC 造及び CCFRC 造シェルの中央部に点荷重を受けた場合の破壊形態を検討する為、実験供試体を作製し、破壊実験を行った。実験供試体の寸法は、水平投影面に於いて母線方向 400mm、指導線方向 400mm の正方形とし、設計板厚を 8mm、ライズ・スパン比を 1/5 とした。境界条件は、隅角部に炭素短繊維補強コンクリ

ート造ブロックを配し、空隙にセメントペーストを流し込み、シェル端部アーチの水平スラストを拘束したピン支持状態を設定した。コンクリートの調合は、鉄筋コンクリートに於いてセメント対骨材の重量比を 1 対 2、水セメント比を 40% とした。鉄筋は直径 1.6mm を使用し、X・Y 方向に 10mm 間隔に配筋した。炭素短繊維コンクリートに於いてはシェル面内配筋を施さず、炭素短繊維(K661)をセメント重量比に対して 4%、その添加剤としてメチルセルロース 0.25% 混入した。炭素繊維シート(TR3110MS)は一層の平織りを採用しており、シートをエポキシ系樹脂でコンクリート面に接着している。また、円筒シェルの設計では通常縁梁をつけることが一般的であるが、本研究ではシェル端部アーチの水平スラストをピン支持により拘束しその他の境界部分の補剛を一切付加せず、出来る限りシェルの剛性のみで耐力評価並びに損傷評価を行うモデルを設定した。破壊実験は静的荷重及び動的荷重により載荷を行った。両荷重共、シェル面への荷重載荷は、鋼製ボルト M12 を介して行った。静的荷重は、油圧式万能試験機を使用し、ロードセルを介してシェル面中央に載荷した。実験はシェルが破壊に至るまで行った。動的荷重は、シェル面中央部に二種の鋼製円盤を 1,000mm の高さから自由落下させて載荷した。この二種は重量落下モデル(質量 12.38kg)、及び軽量落下モデル(質量 4.75kg)を採用した。これらの落下モデルは、本研究に於いて便宜上、予備実験に於ける結果から、シェルの破壊形態を考慮して設定したものである。尚、前者を H Model、後者を L Model で表記する。補強範囲については Fig.2 に示す 4 種類を選定した。即ち、シェル上面全面シート補強モデル(T Model)、シェル下面全面シート補強モデル(B Model)、シェル両面全面シート補強モデル(A Model)、及びシート無補強モデル(N Model)の 4 種類である。シェルモデル名は 3 文字より構成する。最初の文字は荷重載荷状態を示し、静荷重、重量落下荷重、及び軽量落下荷重をそれぞれ C, H, 及び L で表記した。2 文字目はコンクリート材料種別を示しており、炭素短繊維補強コンクリート及び鉄筋補強コンクリートをそれぞれ F 及び R で示した。最後の 3 番目の文字はシート補強形態種別を示しており、Fig.2 の説明で記述した通り、シート無補強、シェル上面全面シート補強、シェル下面全面シート補強、及びシェル両面全面シート補強の場合を、それぞれ、N, T, B, 及び A で示した。

静荷重、重量落下荷重、及び軽量落下荷重の全ての破壊実験の前後にインパクトハンマで加振を行い、自由振動実験を行うこと

によりシェルの基本固有振動数並びに減衰定数を特定した。シェルの支持条件が自由振動実験に及ぼす影響を可能な限り排除し、純粋にシェル自体の自由振動状態を実現することを意図して自由境界の元で振動実験を行った。加振点は、既往の研究及び汎用構造解析コードの結果より振れる方向の振動が主となることから¹⁾、隅角部付近の一点を選定し、各供試体とも同一の箇所とした。計測位置は、加振点と対角線上となる点に設置し、応答加速度波形を計測した。境界条件としては、供試体以外の振動がノイズとして入力されるのを避ける為、鉄骨反力フレームの上に木製のベニヤ板(板厚9mm)を敷き、その上にエアーマット(50mm厚)を用いた防振材を載せ、更にその上に供試体を設置して、自由振動実験を行った。また、荷重載荷により、明確に二つ以上に分割された供試体の自由振動実験は行わなかった。

3. 考察

損傷状態の特徴を大局的に捉える為に、破壊形態を4つのパターンに大別した。パターン1は陥没破壊せずにひび割れが放射状に伸びたものであり、パターン2は載荷点に於いて大きく陥没が確認されたものであり、パターン3は構造体が二つ以上に分割されたものであり、パターン4は目視でのひび割れが確認されないものである。以上を踏まえて、破壊形態による比較を行う。破壊パターン1に於いては、シェル面にひび割れが生じ、剛性が低下することにより引き起こされる固有振動数の減少、並びに、ひび割れ部分の摩擦損失が大きくなることによる減衰定数の増加が特徴的である。代表的なパターン1として、CRN, CFN, HRT, LRNなどが挙げられる。この他に、CFT, LFN, HRAなど多数のモデルが破壊パターン1を示している。破壊パターン2に於いては、抜け落ちた部分にはコンクリートが存在せず、当該部分のひび割れによる摩擦減衰が回避され、その結果、減衰定数の低下を招いたものである。これには、HRNが該当する。その他にも、LRBが同様の傾向を示している。破壊パターン3に於いては、分離した部分の構造体が個別に振動することにより、固有振動数が増加する、または、非常に軽微に減少する傾向が確認されたパターンである。この破壊形態を呈した供試体はCFT, HFTが確認されている。破壊パターン4に於いては、固有振動数及び減衰定数の変化の度合いは僅かであった。これにはHFA, LFB, LFAが該当する。

次に構成材料による比較を行う。まず、静的破壊実験に於いて、CRNとCFN及びCRBとCFBの比較を行う。炭素短繊維補強コンクリート造の供試体において、固有振動数の減少および減衰定数の増加が共に軽微であることが示されている。これは炭素短繊維を混入した供試体のひび割れが軽減されると共に、シェルの剛性低下が抑制されたことを示している。また、RC造に於ける静的破壊実験供試体は、破壊パターン2のCRTを除いて、同一の破壊パターンを示した動的破壊の供試体HRT, LRA, LRTに比べ、減衰定数の増加が著しい。これは静的荷重による破壊の特徴を示している。破壊実験後の減衰定数の増加は、主にひび割れによる摩擦によって引き起こされることから、静的の荷重を受けて破壊に至った供試体にはひび割れがより多く存在すると考えられる。次に、動的破壊実験に於いて、LRTとLFTの比較を行う。炭素短繊維補強の供試体LFTにおいて、静的破壊実験供試体(Nモデル)と同様に、固有振動数の減少と減衰定数の増加の抑制効果を確認した。

シート補強形態による比較において、静的破壊実験のCRN, CRB, 及びCRAについて、シート補強モデルNに対してシート補強モデ

ルBのひび割れが低減しているが、シート補強モデルAのひび割れはシート補強モデルBよりもひび割れが増える結果を示した。動的破壊実験のLRN, LRT, 及びLRAにおいて、シート補強モデルN, T, 及びAは、ひび割れ量の差が殆ど確認できない。LFTとLFBとの比較において、LFBは、大幅なひび割れの低減が確認され、固有振動数の変化も殆ど確認されない。軽量落下荷重を受ける複合炭素繊維補強コンクリート造シェルを対象とした場合に、シェル裏面へのシート補強はシェル表面へのシート補強と比較して、優れた耐衝撃性能を示すことが確認された。動的実験に於ける衝撃荷重規模の相違によるHRNとLRNの比較において、LRNはひび割れが拡散され、破壊パターン1を示しているのに対し、HRNでは載荷点で大幅に抜け落ちる破壊パターン2を示している。これまで国内外で主として高層建築を対象とした固有振動数と減衰定数の関係をまとめた参考文献に基づき³⁾、破壊前における供試体毎の固有周期と減衰定数の関係を求めた。シェル構造に関して、上記のような固有周期及び減衰定数を関係づける研究資料は殆ど報告されておらず、今後の資料蓄積が望まれる。上記の高層建築を対象とした参考文献には相応の関係が確認できるが、本研究のシェル構造を対象とした場合には、明確な相関を確認することは困難であることが示された。従って、シェル破壊実験前後に於いて、上記動特性を明らかにする為、本研究では新たに固有振動数と減衰定数の変化に注目し、その相関関係を求めた。ひび割れが放射線状に伸びた破壊パターンを示す供試体において、減衰定数と固有振動数の変化割合は直線関係を示すことが確認された。また、破壊パターン2を示した供試体については、固有振動数の変化に対し減衰定数の変化の割合は少なく、ひび割れによる摩擦減衰の増加が抑制される傾向を確認した。

4. 結論

静的及び動的の荷重を受ける複合炭素繊維補強コンクリート造屋根形円筒殻の破壊形態及び損傷程度の相互関係を固有振動数及び減衰定数に基づく動特性の観点から実験的に検討を行った結果以下の知見を得た。

- (1)ひび割れが周辺に伸びる破壊形態を示した供試体では、最大で減衰定数において133%の増加、固有振動数において13%の減少を確認した。
- (2)載荷点周辺での陥没破壊を示した供試体では、最大で減衰定数において26%の減少が示された。また固有振動数においては最大で9%の減少が示された。
- (3)動的破壊実験と比較して、静的破壊実験におけるRC供試体の減衰定数は、増加傾向にあることを確認した。

参考文献

- 1) 川崎健二郎, 真下和彦, 山口紳一郎, 伊藤由理, 衝撃荷重を受ける複合炭素繊維補強コンクリート造円筒殻の破壊形態, 東海大学紀要工学部, Vol.44, No.1, 2004, pp.29-34
- 2) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, 1993年7月, pp.66-68
- 3) 建築物の減衰, 日本建築学会, 2000年10月, pp.215-216

謝辞

本研究は、2004年度研究教育補助金Aを受給しました、ここに深謝致します。