リユース材で構成された張弦クレセント構造の力学性状に関する研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE STATIC CHARACTERISTICS
OF STRING CRESCENT STRUCTURE MADE FROM REUSABLE PARTS田 中 晃*
Akira TANAKA

I proposed Crescent System and String Crescent Structure (SCS). Crescent System secures a reuse function, and SCS is the structure that stabilized Crescent System. I made the models of SCS of the cantilever and did an experiment and analysis. This purpose is to clarify the influence of Crescent part shape and the prestress on structural behavior of SCS. I show consideration based on the result below.

- 1) The stress transmission mechanism between Crescent Parts was estimated, and this mechanism was demonstrated by the experiment and the analysis.
- 2) I analyzed a stress, rigidly and the geometric element, and I was able to estimate the proper value of Minor arc angle.
- 3) Crescent part shape influences the rigidity of SCS. A mechanical role of arms is only the reduction of deformation.
- 4) A mechanical role of the prestress of the strings is prevention of deformation by slide, and improvement of structural performance of SCS.
- 5) The experimental value accorded with the analysis value in "Load-displacement" and "Load-tension of the string".

Keywords: Reuse, Stress transmission mechanism, Contact, Separating, Sliding, Prestress,

リユース, 応力伝達メカニズム, 接触, 離間, 滑り, 初期張力

1. はじめに

「リユースシステム」は建材のスクラップ化および熱処理等に伴う発生CO₂の低減等が期待される。しかし、解体後の建材は電炉メーカーへのリサイクルや、構造材以外の用途に再利用される事が多く¹⁾、リサイクルに依存しない建材のリユース率の向上が課題となる。本論のリユースシステムは、原料から建材に製造する前に予めリユース可能な建材を設計しておく事を前提としており、用途は、仮設空間、風雪に晒されない屋内展示施設、入れ代わりの激しい大型商業施設内の店舗等である。既往のリユースシステムは、「組立性」「分解性」「反復性」を付加し、組立プロセスを簡略化したものが多いが、今後は、リユース率を高める為に使用建材の種類数を抑えながら様々な構造形状へ再利用できる「転用性」をも考慮された組立プロセスの導入が必要となる。

リユースシステムは、部材の生産・組立・解体・収納・運搬等の工夫により、「(1)組立式」「(2)可動式」「(3)非接着式」といったリユースシステムの接合方式が発生する。「(1)組立式」の例として、災害時の応急仮設住宅²⁾等があげられ、プレハブ住宅の構法を簡略化する事で、簡単な組立プロセスを可能にしている。「(2)可動式」は展開構造の接合等に使われており、この1例として斎藤公男らによる「張弦シザーズ構造³⁾」があげられる。これは、ピボット周辺の曲げモーメント発生回避により「構造の大規模化」と「リユース」との両立を図り、ピボット位置の調整により構造形状の変更を

可能にしている。「(3)非接着式」は接着および結合箇所を極限に減らした「接着によらない応力伝達機構」の接合であり、その1例としてリユースシステムへの適用を意図した「要素非接着型構造⁴⁾」が山口謙太郎により提唱されている。実施例として伊東豊雄らによるSudare⁵⁾があげられ、事前にワイヤーで押出形材をつなぎ合わせておき、ワイヤーを緊張させただけで曲面形状屋根が安定する。異なった形状の構造への転用も意図しているが、異なった形状の押出形材との取替が必要となる。以上取り上げた既往のリユースシステムの最大の特徴は、軽量性と組立プロセスにおける迅速性と簡易性であるが、共通課題として「構成部材の種類を最小限に抑える」と「梁形状や板形状等、異なった形状の構造物との間で転用できる」との両立を満たしていない事があげられる。

本論では、その共通課題の解決を目的に、三日月形状部品(以下、略称:C部品)とアーム材との組合せによるクレセントシステムを提案する。次に、クレセントシステムに弦材を取り付けて安定化させた「張弦クレセント構造」(String Crescent Structure, 以下略称:SCS)を提案する。さらに、SCSの形状を片持梁に絞り、C部品の基本形状、基本形状内に中空部を設けた中空形材、アーム材の有無等による構造挙動の変化を検討した。最後に、初期張力(Prestress 以下、略称:PS)量に応じたSCSの構造挙動の実験的および解析的検討を経て、SCSの力学性状およびリユースシステムへの実用性の考察を行った。

* 筑波技術大学産業技術学部産業情報学科 専任講師・博士(工学)

Lect., Faculty of Industrial Technology, Tsukuba University of Technology, Dr.Eng.

2. クレセントシステムの提案

2.1 クレセントシステムの構成

本論のリユースシステムの条件を明らかにする為に、異なった形状の構造への転用を考慮したリユースシステムの課題を以下に示す。

- ①異なった形状の建材の導入を最小限に済ませる。
- ②ボルトの取付または取外しの地組のプロセスを最小限に済ませる。

上記①に関しては、異なった形状の構造へ再利用する場合、使用部材の寸法変更に伴う再加工が必要となる。再加工できない場合は、建材搬入や不要な建材が繰り返し発生し、リユース率が低下する。上記②は、事前に工場等でボルト接合等を済ませる事で、地組工事のプロセスやその所要時間を低減する事を意図する。

上記の課題を解決し、「使用部材の種類を最小限に抑える」「異なった形状の構造物に転用できる」の両立を図る手段として、C部品とアーム材とを組合せたクレセントシステムを提案する (Fig.1(a))。クレセントシステムは、アーム材による「可動式」接合とC部品による「非接着式」接合との組み合わせによるハイブリッド接合が用いられている。C部品間の回転運動を容易にする為に、C部品の両底面にアーム材を平行状態に取り付け、ボルトで固定する。この連結作業の繰り返しにより、蛇形状のクレセントシステムが形成される。C部品はアルミ押出形材であり、骨梁からのヒントによる三日月形状が用いられる (Fig.1(b))。これは、優弧部と劣弧部からなる「①側面材」と、中心点に設けられた「②貫通穴」と、中心点から放射状に伸びた「③縦材」と、縦材に対して直角に同心弧状に配置された「④横材」によって構成される。「①側面材」はC部品の優弧部と隣接するC部品の劣弧部との応力伝達を可能にする。「②貫通穴」はボルトを介してC部品とアーム材を連結させる。「③縦材」は側面材への補強によりC部品の力学性能を向上させる。「④横材」は縦材の座屈防止が期待される。「①側面材」の形状は力学的検討の結果に基づくが、詳細について3.4で述べる。さらに、側面材に膜材や弦材等を取り付ける事が想定されるが、側面材形状が曲面であり、これにあわせた形状の金物が必要となり、接合コストの抑制が課題となる。この解決手段として、普遍的な接合金具を取り付けられるように側面材の2箇所に「⑤扁平部」を設ける (Fig.2)。

(a) Crescent System Parts (b) Crescent Part Shape

Fig.1 Crescent System

(a) Metal fittings (b)Strings (c)Two Crescent parts

Fig.2 The joining method of Crescent parts

優弧部と劣弧部 (以下、優劣弧部) との接触面には滑りや離間を許容する非接着式接合が用いられる。ボルトを使わずに接触させるだけなので組立プロセスにおける迅速性と簡易性の確保が期待できる。

クレセントシステムの概要図を Fig.3 に示す。一般的な煉瓦等と比べてC部品は滑り落ちやすい形状を有する為、組積工事における落下事故のリスクが高い。この防止策として、事前にC部品の連結材を取り付ける。特にアーム材との組合せは、クレーンや人力による吊りによって、簾のような展開および折畳を容易にし、現場での地組の所要時間の短縮や安全性向上を意図している。以上、アーム材の生産的な役割を述べたが、力学的な役割に関しては4.5で述べる。クレセントシステムに数種類だけの部材の導入で様々な形状へ組み立てられる。C部品とアーム材との配置に様々なタイプが考えられ、これらに応じて「単層式」「複層式」「多段式」とに分類できる。「単層式」は最も簡易な構成が見られる。「複層式」は、複数のC部品を積層に積み上げて作られたユニットがアーム材で連結される。「多段式」は「複層式」のユニットが階段形状に連結され

Fig.3 Development of Crescent systems

る。「多段式」はコンパクトに折り畳めるが、部材配置が複雑で剛性が劣る。これに対して、「単層式」は簡易性と剛性に優れており、建築構造への実用性が高い(Fig. 4)。

	Single Layer Type	Multistage Type
Folding	Bamboo screen shape	Spiral shape
Development
Other feature	Simple Structure Rigidity of the stable structure (High)	Complex Structure Rigidity of the stable structure (Less)

Fig.4 Comparisons with two different Crescent Systems

2.2 SCS の提案

単層式クレセントシステムは不安定な構造物であり、これを安定させる為に、各扁平部間に平行かつ連続した弦材を配置した SCS を提案する(Fig. 5)。各部材の役割として、C 部品は骨、弦材は関節の安定に寄与する靱帯⁶⁾(Fig. 6)に相当する。さらに、C 部品間のがたつきを防止し、C 部品間の応力伝達の安定性を高める為に、弦材に PS 導入する事を前提とする。C 部品やアーム材の寸法を変えずに、異なった寸法の弦材の取替だけで SCS 全体形状を変えられる。以下、SCS の形状を片持梁に絞り、力学的検討を行う。

3. SCS の応力伝達メカニズムと C 部品の基本形状

3.1 C 部品の基本形状の決定要素

C 部品の基本形状は、半径 r が同一である優弧と劣弧に囲まれた三日月形状である(Fig. 7)。AB 間距離 L_J や劣弧の角度 ν の数値によって、三日月形状の「欠け」が変化する。アルミ材の押出加工のコンテナ径(最大外接円)235mm に基づき⁷⁾、半径 r を 100mm とする。回転運動の自由度および SCS の安定性確保の考慮上、角度 ν を 20~110° とし、この範囲における距離 L_J を算定する為に次式を用いる。

$$L_J = 2\left\{r - r(1 - \cos \frac{\nu}{2})\right\} \dots (1)$$

A: 優弧の中心点 B: 劣弧の中心点
 L_J : AB 間距離 r : C 部品の半径
 ν : 劣弧の角度

「欠け」の大きさは、梁のスパンあたりの接合部数、断面力を受けた SCS の応力状態や剛性等へ影響を与える。これを考慮した適正な角度 ν の決定を試みる為に、解析的検討を行う。

3.2 SCS の C 部品間の応力伝達メカニズムの推定

側面材の優劣弧部間の接触面には非接着式接合が用いられている。

非接着式接合の定義の範囲は「摩擦抵抗によりせん断方向の安定状態を確保する接合⁸⁾」だけでなく、「支圧抵抗を形成させる事で、離間を部分的に発生させたにも関わらず安定状態を失わない接合」をも含む。なお、摩擦が接合部に及ぼす力学的な影響を推定する事が難しい為、本論では、接触と離間の発生のみを考慮する。外力 P の作用方向は「底面の垂直力」と「側面の垂直力」が考えられるが、外力の作用方向によって SCS の変形が異なる(Fig. 8)。底面の垂直力の場合、C 部品間にせん断力方向の滑りが生じ、アーム材が破損し SCS 全体の可動性が損失する可能性がある。これに対して、側面の垂直力の場合、C 部品間に回転方向の滑りが生じ、弦材が力学的役割を発揮する。この条件下のアーム材は、SCS の中立軸に近い位置に配置されるので、発生応力負担が小さく済ませられ、可動性が損失しにくい事が予想される。このような観点にたち、以下、実験および解析の荷重条件を側面の垂直力に絞る。

Fig.8 Deformation of SCS

C 部品間の接合部の妥当性等を検討する前に、応力伝達メカニズムを Fig. 9 に示す。弦材の PS 導入により接触面に支圧力を発生させたモデルとし、アーム材の存在を無視した応力伝達メカニズムの推定を行う。せん断力の伝達メカニズムにおいて、接触面の離間発生前では、接触側の支圧力が増加し、離間側の支圧力が低減するが、弦材の軸力は発生しない。接触面の離間発生後では、離間側の支圧力が消失する。これに伴って、接触面積が縮小し、接触側の支圧力が増大する。同時に、接触面の離間の進行を抑える為に、平行する 2 弦材に張力が発生する。曲げモーメントの伝達メカニズムにおいて、張力消失前では、2 弦材の発生軸力が接触面での回転方向滑りや発生支圧量を抑える。張力消失後では、弦材張力(引張側)および

Fig.9 Stress transfer mechanism in Joint between Crescent parts

方が変形角比が増加する事が明らかとなった。ここから理解できる事は、剛性確保が純粋に期待される角度 ν は 110° であるが、接合コストの抑制も考慮すると、角度 ν $40\sim60^\circ$ が適正となる。

(2) 接触面付近の圧縮応力度

Unit Qの「角度 ν -最大圧縮応力度」をFig. 14(a)に示す。張力消失の有無に関わらず、接触面付近に発生する最大圧縮応力度に差異が認められない。角度 ν が 20° から 60° へと大きくなるにつれ、最大圧縮応力度 σ_q が抑制されていくが、角度 $\nu=60^\circ$ を超えると最大圧縮応力度 σ_q が増加気味の傾向が見られる。Unit Mの「角度 ν -最大圧縮応力度」をFig. 14(b)に示す。M1とM2との比較により、張力消失後の方が最大圧縮応力度が増加する事が明らかとなった。角度 $\nu=60^\circ$ を下回ると、最大圧縮応力度が抑制される傾向が見られる。以上をまとめると、角度 ν が小さい時はせん断力による圧縮応力度、角度 ν が大きい時は曲げモーメントによる圧縮応力度の発生量が大きく、両者による圧縮応力度を抑える観点にたてば、適正な角度 ν は $40\sim60^\circ$ となる。接触面付近の圧縮応力度の低減は「めり込み」によるC部品の破損防止につながる事が期待される。

(3) 弦材の軸力

Unit Qの「角度 ν -弦材軸力」をFig. 15(a)に示す。張力消失の有無に関わらず、両者の差異が認められず、角度 $\nu=90^\circ$ の時、弦材の発生張力が最小値に抑えられる。Unit Mの「角度 ν -弦材軸力」をFig. 15(b)に示す。張力消失を考慮したM2の場合、角度 ν の数値に関わらず、発生軸力量に変化が見られない。M1の場合、角度 $\nu=40^\circ$ では引張力が、角度 $\nu=90^\circ$ では圧縮力が強く作用する。張力消失等の回避への観点にたてば、角度 $\nu=90^\circ$ によるC部品の形状を用いる事は得策ではなく、適正な角度 ν は $40\sim60^\circ$ となる。

以上の変形角比、C部品の圧縮応力度および弦材の軸力を抑え、SCSの構造性能の向上を図る為に、適正な角度 ν を $40\sim60^\circ$ とする。さらに、4章で述べる縦材の配置形状をも考慮し、以下、角度 ν を

Fig.13 Angle of Minor arc - Ratio of distortion angle

Fig.14 Angle of Minor arc - Max. Compressive stress

Fig.15 Angle of Minor arc - Axial force

60° に指定する事にする。

(4) 一点集中荷重状態の SCS の構造性能の比較

基本形状の違い(角度 $\nu=20^\circ, 60^\circ, 100^\circ$)による3種類のC部品を取り上げ、Fig. 16に示す1点集中荷重状態のSCSを対象に解析的検討を行った。張力消失の有無に関わらず、(a)と比べて、(b)(c)の方が水平変位量が抑えられる。(b)(c)の比較上、C部品の最大圧

Fig.16 Comparison of the performance

縮応力度では(b)の方が抑えられる。以上、接合部数、応力状態、剛性に対する角度 ν の影響を検討した結果、適正な角度 $\nu=60^\circ$ である事を結論付けられる。

4. C 部品の中空形状の決定とアーム材の役割

4.1 C 部品の中空形状

SCS の軽量化の手段として、基本形状内に中空部を配置させる。C 部品の構成材の一つ「縦材」の本数および配置形状が SCS 全体の軽量性や曲げ剛性に与える影響を及ぼす可能性があり、これを明らかにする為に実験かつ解析的検討を行う。

4.2 実験解析概要

C 部品の中心部から放射状に伸びる縦材の本数の違いによって、12 本の Model A と 2 本の Model B といった 2 種類の C 部品を用いる (Fig. 17(a))。両者に側面材の外径寸法 (半径 $r=100\text{mm}$) と C 部品の重量 (300g) を設定し、この共通点から C 部品における側面材と縦材等の厚さを算定し、Model A には 3mm, Model B には 7mm を指定した。C 部品の材料のアルミ合金が前提であるが、本論では各材の最適な寸法が決まっていず、高価なアルミ合金の使用は得策ではなく、この代替材としてエポキシ樹脂を用いる。エポキシ樹脂製の C 部品の作成方法は次の通りとなる。熱積層式 3D プリンタ (積層厚 $=0.2\text{mm}$, 造形材料: PLA) で C 部品の型枠を造形し、この型枠内にスリーポンド社の 2 液性エポキシ樹脂 (主剤 TB2022 : 硬化剤 TB2105C $=2:1$) を流し込み、エポキシ樹脂が固化した後、型枠を剥がして C 部品を完成させる。室温等の養生環境や 2 液の調合比率の誤差等によって、エポキシ樹脂のヤング係数が変化する事が考えられる。これを確認する為に、年度毎に単純梁形状のエポキシ樹脂製試験体を製作し、2 点载荷実験を行った。この結果としての材料諸元を Fig18 に示す。

C 部品の個数を 3 ユニットとし、エポキシ樹脂製の半円形状の支持部品の上に積み上げ、弦材の取付による安定化を図った (Fig. 17)。弦材の PS の存在が SCS 全体の曲げ剛性の変化の原因となり、C 部品

の形状の違いによる構造挙動の比較が純粋に行えない可能性があり、この対策として、「接合部に隙間やルーズホールを設けない」「PS 導入を行わない」を前提にステンレス合金 SUS304 の帯形材 (10mm $\times$ 0.3mm) の長さ (ボルト穴間距離 $=151\text{mm}$) が指定された弦材を用いる (Fig. 17(c))。荷重条件は、载荷 1 点の水平方向の集中荷重 (最大荷重 $P=83\text{N}$) とする。载荷ケーブル端部に分銅を载荷すると、同時に水平方向の張力が発生し、その張力が C 部品の最上ユニットの接合金具に作用する集中荷重となる (Fig. 17(b))。

4.3 数値解析概要

Fig. 19 に解析モデルを示す。これは、3.3 で述べた接触要素パラメータおよび Fig. 18 に示す材料諸元による C 部品の 2D モデルと、ヤング係数 ($E=1.95 \times 10^5 \text{N/mm}^2$) および断面積 (3mm^2) による弦材 (トラス要素) とに構成されている。トラス要素には、弦材の座屈応力度 (オイラー式による座屈応力度 $\sigma_{cr}=-0.63\text{N/mm}^2$) が考慮されている。

4.4 実験および解析結果

载荷点付近の水平変位量に関する実験および解析の結果を Fig. 20 に示す。実験の結果、荷重 $P=20\text{N}$ に達するまでに、Model A と Model B にそれぞれ 2mm, 7mm の水平変位量が発生した。この原因として、側面材の優劣弧部との接触面に隙間が存在した為に、接触面の初期滑りが生じた事があげられる。初期滑り後の変位増分量において、実験と解析と両方とも Model A の方が剛性が大きく、C 部

Fig.18 Specifications of epoxy for Crescent part

Fig.17 Outlines of Experiment

Fig.19 Analysis Model

品の縦材本数が、SCS の剛性に影響を及ぼす事が確認された。初期滑り後の試験材の変位増分量において、Model A では実験値と解析値とほぼ一致した。これに対して、Model B では実験の方が荷重増分量が抑制された。この原因としては次のように推定される。摩擦力無の解析モデルと比べて、試験材では C 部品間の摩擦が発生し、滑りが抑制される。Fig. 21 に荷重 P=83N 時の SCS の変形を示す。両者とも圧縮側の弦材に座屈が生じたにも関わらず、SCS 全体の安定性が失われなかった。なお、ModelB の方が弦材の座屈変形が大きく、C 部品の形状の選択が座屈に及ぼす影響がある事を確認できた。応力度に関しては、Model A と Model B 両方とも、C 部材間の不安定な応力伝達状態をもたらしており、データの定量化が困難であった為、本論では各部材のひずみ測定結果を取り上げない。

Fig.20 Load-Displacement Fig.21 Deformation of SCS

4.5 アーム材の力学的な役割

安定状態の SCS におけるアーム材の役割は、応力負担等力学的な役割を有する事が考えられる。この条件として、アーム材のボルト穴がボルトに接触する必要がある (Fig. 22(a))。Fig. 17 に示す Model A にアーム材を取り付けて 1 点集中荷重による載荷実験を行ったが、ルーズホールが存在の為、アーム材の力学的な効果が明確ではなかった。そこでルーズホールを設けない条件に、Fig. 19 に示す Model A の解析モデルにアーム材のトラス要素を追加して解析検討を行った (Fig. 22(b))。アーム材の有無による SCS の解析結果を Fig. 23 に示す。アーム材有の方が変形を抑えられるが、C 部品および弦材の発生応力に差異は見られなかった。これにより、アーム材は、ボルトとの接触後の SCS の変形抑制のみ寄与する事が伺える。これ以外に考えられるアーム材の力学的役割は下の通りであり、より詳細なアーム材の力学的検討が今後の課題となる。

- (1) 弦材の破断時の安全対策
- (2) 弦材方向の引張力とせん断方向の力との同時作用による SCS の不安定化対策

Fig.22 Joint between Arms and Crescent Parts

- (1) に関しては、引張側の弦材が破断した時、同時に SCS が瞬時に分解され、避難時間を与えない突然の破壊現象が危惧される。この破壊の進行を遅らせる手段としてアーム材を予め取り付けしておく。
- (2) に関しては、弦材方向の引張力により、C 部品間接触面全体に離間が生じ、同時に発生したせん断方向の力に抵抗できなくなり、不安定な状態が発生する事が危惧される。この対策として、不測の離間の進行を防ぎ、安定性を維持する為に、アーム材を取付ける。さらに、アーム材のルーズホールの大きさの上限を設け、アーム材および弦材の剛性を確保する必要がある。

5. PS 導入を考慮した SCS の構造挙動

5.1 SCS の PS 導入の役割

4 章の載荷実験では、長さ指定の弦材を用いた結果、初期滑りによる変形が生じる事が明らかとなった。この解決手段として、C 部品間の隙間等を防止し、構造挙動の安定性を確保する為に、PS 導入を行う。これによる PS 効果を把握する為に、実験解析的検討を行う。

5.2 実験解析概要

C 部品の形状および材料諸元は Fig. 17 で示した通りである。弦材の接合金具には弦材貫通穴を設けたアルミ合金の T 形材を用い、C 部品扁平部にボルトで取り付けた (Fig. 24(b))。載荷条件に関しては 4.2 に示したものと同様とする。最大荷重 P=90N 時の SCS の弦材張力量を 500N と仮定し、ストランドケーブル ($\phi 1.5$) の引張実験 (最大引張力 800N) を行った。その結果から、Fig. 25 の材料諸元に示すヤング係数の算定を行った。ストランドケーブル支持部および PS 導入装置を Fig. 24(c) に示す。PS 導入前に、全ての接合金具の穴をストランドケーブルを通し、架台の下へ吊り下げた全てのストランドケーブルの先端に目標 PS に応じた重量の分銅を載せる。目標 PS に達した後、全ての接合金具毎に設置されたサーキュラースリーブでストランドケーブルを固定する。以上の作業により得られた PS 導入量 (=10N, 35N, 70N, 100N) 毎の応力・変形の変化を把握する為に実験かつ解析的検討を行った。

Fig.23 Analysis result

Fig.24 Outlines of Experiment

Fig.25 Specifications of Strand Cable

5.3 実験および解析結果

SCSの水平変位量をFig. 26に示す。載荷実験の結果、PS量の増大に伴って水平変位量が抑えられただけでなく、Fig. 20に示す初期滑りによる変形も発生しておらず、変位抑制およびSCSの安定性向上に対するPS効果が確認できた。ただし、弦材の張力消失後の変位増分量は、PS量に関わらず差異は見られなかった。SCSの弦材張力の発生量をFig. 27に示す。PS量に関わらず、弦材の発生張力量の低減は見られていないが、弦材の張力消失時の荷重レベルは増加した。これらの傾向は、解析結果とほぼ一致している。PS=10N時の載荷点付近の弦材(圧縮側)は一度張力消失が発生したものの、荷重P=50Nを超えると再び張力が発生した。この現象は解析結果にも見られており、この原因としてFig. 9に示すせん断力伝達メカニズムと関連づけられる。PS=100Nおよび荷重P=90N時のSCSの最小主応力状態をFig. 28に示す。実験時ひずみ測定点に該当する位置に、PS=100Nおよび荷重P=90N時の解析結果による応力度の印(圧縮: □, 引張: ○, 無応力: △)を書き入れ、それから、△印の部材を全て取り除くと、片持トラスのような応力状態となる。発生応力が大きい主要な部材(1)~(9)を選び、ひずみ測定点毎の断面積を最小主応力度または最大主応力度に乗じて、圧縮応力または引張応力を算定し、実験値と解析値との比較を行った。この結果、軸力の正負は一致したものの、数値のばらつきがみられており、この原因として試験材の初

期不整等が推定される。負方向の軸力(最大圧縮応力)が生じた主要な部材(7)のPS導入効果をFig. 29に示す。PS量に関わらず、部材(7)の発生圧縮応力の低減が見られず、解析値と実験値と一致している。この結果は、Fig. 28に示す主要な部材(1)~(9)においても同様の傾向が見られる。結論として、PSの役割としては、初期滑り防止、SCS

Fig.26 PS-effect : Displacement

Fig.27 PS-effect : Tension of String

の安定化, 曲げ剛性の向上, 張力消失時の荷重レベルの向上に寄与する事があげられる。

Fig.28 Stress of SCS

Fig.29 PS-effect : Compression of Crescent part

6 まとめ

リユースシステムの一つ, クレセントシステムを提案し, クレセントシステムの安定化を目的に弦材を付加した SCS の構造挙動の検討を行った結果, 次のような知見が得られた。

- (1) せん断伝達メカニズムに関して, C 部品間の離間の進行を抑える為に, 圧縮側の弦材にわずかな張力が発生する事を, 実験および解析により裏付ける事ができた。
- (2) 曲げ伝達メカニズムに関して, C 部品間の回転方向の滑りを抑える為に 2 弦材の軸力が発生し, 圧縮側の弦材の張力消失が発生すると, 引張側の弦材の張力増分量が増大する。
- (3) 変形と C 部品の応力と弦材軸力と, スパンあたりの接合部数とのバランスを検討した結果, 適正な角度 θ を推定できた。

(4) C 部品の中空形状の選択が, SCS の曲げ剛性に影響を与える。

(5) ボルトとの接触後のアーム材の力学的な役割は SCS の変位抑制への寄与である。

(6) PS の役割は, 初期滑りの防止による SCS の安定性, 曲げ剛性および張力消失時の荷重レベルの向上に寄与する。

今後の課題については次の通りとなる。弦材方向の引張力とせん断方向の力が同時に作用すると, C 部品間の離間が大きくなり不安定になる事が危惧される。この対策として, ルーズホールの抑制や剛性の確保を考慮したアーム材等を科学的に検証する。SCS のアーチ形状への適用が考えられるが, C 部品の縦材と隣接する C 部品の縦材との材軸上の幾何学的なずれが発生し, 接触面周辺の応力状態の変化や SCS の剛性低下を及ぼす事が推定される。この対策として縦材と側面材等との適正な剛性比を検討する。PS 導入手順等の選択によって優劣弧部間の摩擦や接触の発生状態が変化し, PS 量の制御の難易度に影響する事が予想され, 適正な PS 導入手法を検討する。これらの課題を解決する事が, クレセントシステムのリユースシステムへの実用性を高める条件のひとつとなる。

参考文献

- 1) Atsushi Ito, Study on Construction of Recycling System of Building Materials in the sight of Market Formation Process, Master's thesis, Dept. of Socio-Cultural Environmental Studies Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo, 2016. 9. 16
- 2) Haruka YOSHIBA, Tsuyoshi SEIKE, et al. : RESEARCH ON REMOVING AND RECONSTRUCTION OF TEMPORARY HOUSES IN FUKUSHIMA, AIJ J. Technol. Des. Vol. 20, No. 44, 33-38, 2014. 2
- 3) Akira TANAKA, Masao SAITOH, et al. : STRUCTURAL BEHAVIOUR OF VAUT ROOF UNDER WIND LOADS CONSIDERING CONSTRUCTION, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 611, pp. 95-102, 2007. 1
- 4) Yasunori MATSUFUJI, et al. : Prestress Distribution in the Wall by Unbond Masonry Construction Method for Sustainable Structure System, of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No. 2, PP. 79-87, 2002. 7
- 5) Toyo ITO, et al. : The building & the construction(建築物と建築方法), JP-A No. 2007-120207
- 6) Kazushi NAKAMURA : A Easy Visual Guide to Movement and Mechanism of Muscles and Joints, SHUWA SYSTEM CO., LTD, ISBN4798025321, pp. 43, 2010
- 7) SankyoTateyama Inc. : Size of extruded material (押出形材製造範囲), available from <http://material.st-grp.co.jp/technology/aluminum/range/index.html>, (accessed 2017. 9. 2)
- 8) Norihide IMAGAWA, Akira OKADA : Timber Companion, Kenchiku Gijyutu, Inc., ISBN4767700485, p. 15, 1997
- 9) Digital manual for AUTODESK SIMULATION MECHANICAL 2017: "Simulation Mechanical Surface Contact Options (Nonlinear)"-"Advanced Tab" : available from <http://help.autodesk.com/view/ASMECH/2017/ENU/?guid=GUID-489F3645-31BE-43D4-8992-6E8C181B38BA>, (accessed 2017.9.2).
- 10) Makoto MOCHIZUKI : Structure in Architecture, GAKKENSHA, ISBN4762360503, pp. 78-81, 1991
- 11) Kazushi NAKAMURA : A Easy Visual Guide to Movement and Mechanism of Muscles and Joints, SHUWA SYSTEM CO.,LTD, ISBN4798025321, pp. 41, 2010
- 12) Akira TANAKA : Experimental study of String Crescent Structure (part1), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Struct.-I, pp. 1003-1004, 2016
- 13) Akira TANAKA : Study on Structural Characteristics of String Crescent Structure (part2), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Struct.-I, pp. 1105-1106, 2013
- 14) Akira TANAKA : Study on Structural Characteristics of String Crescent Structure (part1), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Struct.-I, pp. 821-822, 2012
- 15) Akira TANAKA : The building unit, the structure and the construction(建築ユニット・建築構造物及び建築方法), Japanese Patent No. 6078251

EXPERIMENTAL STUDY ON THE STATIC CHARACTERISTICS OF STRING CRESCENT STRUCTURE MADE FROM REUSABLE PARTS

Akira TANAKA *

* Lect., Faculty of Industrial Technology, Tsukuba University of Technology, Dr.Eng.

In this paper, a prerequisite for “Reuse System” is that building materials finish the design of the reuse part before production. This use is temporary space, indoor exhibitions, the store in commercial facilities. The characteristic of existing reuse systems are “lightness”, “rapidity” and “simplicity”, but existing reuse systems is not combined “The kind of the use material is minimized” with “The use material is convert to a wide variety of structural shape”.

To solve this problem, I propose Crescent System. Crescent System is the structure that Crescent Parts were connected by the arms. The joint of Crescent System combines “Mobile joint with the arms” and “Unbonding joint with Crescent Parts”. Crescent Part is Aluminum extrusions, this basic shape is crescent-shape that was made in Major arc and Minor arc. This change of basic shape affects the small dimensions of Crescent System. I made the miniature. As a result of this, a wide variety of shape was able to formed by the arms and Crescent Parts only. This Crescent System was stable by the installation of the strings. This stable structure is String Crescent Structure (SCS). I did an experiment and analysis to study structure behavior of SCS. As a result of this study, the knowledges were shown below.

*Shear transfer mechanism between Crescent Parts:

(Non-separating) The tensions of the strings does not occur, and the bearing stress occur.

(After separating) The tensions of two strings reduce the *separating* between two Crescent Parts, and bearing stress increase.

*Bearing moment transfer mechanism between Crescent Parts:

(Non-slackness) Compression force occurs to one string, and tension force to the other string.

Bearing stress between two Crescent Parts is small.

(After slackness) Slackness occurs to one string, and tension force of the other string increase.

Bearing stress between two Crescent Parts increase too.

*The change of Crescent part-shape influences compared rigidity, compression stress of the string and Crescent Part.

*The selection of the hollow structure for Crescent Part influences the rigidity of SCS.

*A mechanical role of arms contact to the bolts is only the reduction of deformation.

*A mechanical role of the prestress of the strings is prevention of deformation by slide, stabilization of structural behavior and the increment of the rigidity and the load for the slackness of the strings.

The direct joining between Crescent Parts is “Unbonding joint” to permit siding and *separating*. As a result, I expected that SCS shows the structure behavior different from the elastic continuum, and put the case that the experimental value is different from the analysis value. However, the experimental value accorded with the analysis value in “Load-displacement” and “Load-tension of the string”.

The challenges for the future are as follows. When SCS is applied into a an arched form, the two material axes of Crescent Parts are not aligned in a straight line. This geometric problem may influence rigid reduction, the increase of the stress. To prepare for this, I examine the appropriate value of the rigid ratio of each material for Crescent Part. The change of the prestress installation process influences the position and the size of friction and the contact in “Unbonding joint”. This phenomenon may make the prestress control difficult. To prepare for this, It is necessary to study the prestress installation process and joint detail of the string. These problem solution is the condition of the utility improvement of Crescent System.

(2017 年 3 月 24 日原稿受理, 2017 年 8 月 28 日採用決定)