

[2022] コンクリート構造物の自動解析モデル化と設計への利用

正会員○杉本 優（東京都立大学大学院）

正会員 山崎 淳（東京都立大学工学部）

1. 目的

本研究は、鉄筋コンクリート構造物の解析モデルを自動的に生成する方法を見いだすことである。その使用目的は、鉄筋コンクリート部材内の力の流れとその大きさを見いだすことにより、引っ張り力を受け持つ鉄筋の形状や配置、圧縮力を受け持つコンクリート部分の寸法などの設計に利用することである。

2. トラスモデル、アーチモデルなどマクロ的な構造モデル

設計の強度計算の為に、既に図1のトラスモデルなどマクロ的な構造モデルがある。その適用は図2に示す初等応力解析のできないコーベルなどの領域や、図3に示すねじりなど3次元問題と多岐にわたっているが、これらのモデルの生成の自動的な手順は確立されていないようである。また、これらはすべて、ひび割れが発生し、安定した後の状態を対象としている。

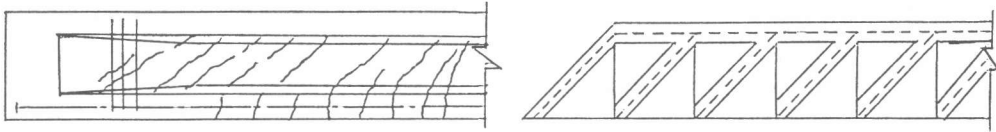


図1. Mörschのトラス理論におけるモデル[1]

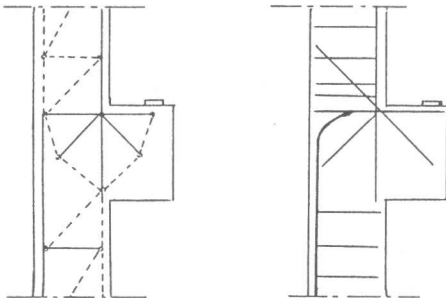


図2. 初等解析理論の得られていない部材のトラスモデル化（コーベル）
Beton-Kalender[2]

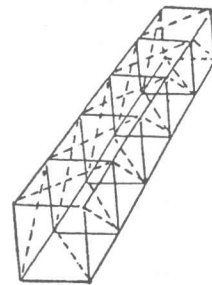


図3. 梁におけるねじりの3次元のトラスモデル
Beton-Kalender[2]

図4の二羽のデーブビーム[3]は、梁を連続体と考え、二次元のFEM解析を出発点とし、ひび割れが発生、伸展し、安定するまでの各々の段階における基準の検討を行い、ミクロな領域の応力を集積した力の流れにもとずき図の様なアーチ状のモデル化をし、破壊の直前までの追跡を行っている。

図4. 二羽のデーブビーム

また、図5、図6、図7に示すK A N Iの内部アーチ[4]は、梁の斜めひび割れ前と、斜めひび割れ発達後の状態の変化を下図に示すような内部アーチからなるモデルで考えた。

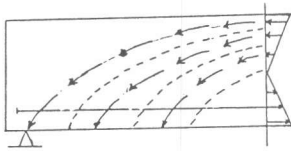


図5. 斜めひび割れ前

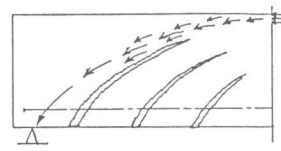


図6. 斜めひび割れ後

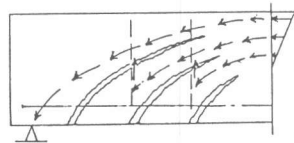


図7. スターラップによる内部支承

3. 本報告で検討した挙動

鉄筋コンクリート構造の挙動に対する支配要因としては、ひび割れの影響、鉄筋の影響, Aggregate Interlock, Dowel Actionなどがある。Aggregate Interlock[5]とDowel Action[6]についての定量化も試みられているが、現時点においては、本手法に取り込んでいない。ここで対象とする挙動の支配要因として、ひび割れ（ひび割れの存在によって力の流れがどうなるか）と鉄筋（スターラップの位置）の影響のみを考慮する。

ひび割れに対しては、ひび割れが発生する基準、ひび割れが伸展する基準について諸説が唱えられているが、統一化は未だ成されていないようである[8]。ここでは、ひび割れが充分発達し、安定した後の梁のマクロモデルを考える。

4. 手法

梁内部の2次元応力解析を出発点とし、アーチ状のモデルを見いだすデーブビームの為の手法が二羽によって行われたが、均質なトラスを出発点とし、力の流れの効率的なトラス部材の方向を逐次見いだしてゆくのが、本手法の特徴である。その手順は、以下のようである。

1) 1回目の解析

① 出発点でのトラスの基本要素は、等方性を得るため、主に正三角形とし、梁のモデル化を、図8に示すような、正三角形を集めた六角形ユニットの集合体とした。

② 節点は荷重段階毎に位置の移動を許すものと、不動点とするものを設定しておく。なお不動点は、図8に示す六角形ユニットの中心とし、不動点の位置は図10に記入した。

③ マトリックス構造解析法トラス解析プログラム (STAP) [7]を用いて解析を行い、各部材の応力の分布から応力の流れを調べる。

2) 2回目の解析

① 1回目の解析で求められた部材の応力をベクトルとみなし、同一不動点を部材の一端となす二部材の応力をベクトル合成し、合成されたベクトルを新たなトラス部材とする。

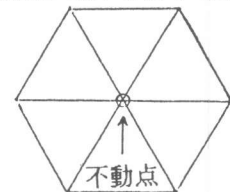


図8. 六角形ユニット
新たな部材

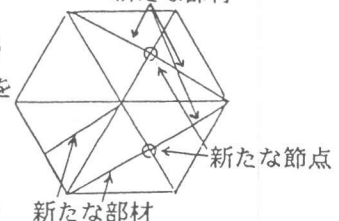


図9. ベクトル合成した後の六角形ユニット

- ② 新たなトラス部材と現存する他のトラス部材との交点を新しい節点とする。
- ③ 前項①において、ベクトル合成によって新たな応力の流れの道筋を設けたので、そのベクトル合成に用いた二つのトラス部材はもはや、荷重経路としては不要となると見なす。この不要な部材を除去することの近似的効果を与えるために、それらの部材の剛性を他のトラス部材の剛性の $1/100$ とする。
- ④ 前回用いた不動点を、今回においても、同様の不動点とする。
- ⑤ 上記のように、ベクトル合成を行い、新たなトラス部材が生成された六角形ユニットの一例を図9に示す。
- ⑥ 上記のようにトラス部材のベクトル合成をおこなって得られた新たなトラスモデルに対してマトリックス構造解析を行い、再び応力の流れを調べる。

3) 3回目の解析

2回目の結果から、2回目の手法と同様にベクトル合成を行い、新たなトラスモデルを作り、それをマトリックス解析し、トラス部材の応力を求める。

今回は、3回目手順を打ち切っている。

5. 計算例

単純支持され、スパン中央に集中荷重を受ける縦横比が約 $1/7$ の梁を解析対象とした。

1) 本手法を用いて、均等質の弾性体の場合の梁について、解析を3段階行うにつれ、トラス部材の構成が変化する様子を図10、図11、図12に示す。

2) 次に、図13に示す斜めひび割れがあって、主鉄筋がない梁の場合と図14に示す斜めひび割れがある単鉄筋コンクリート梁について解析を行う。図13においては、無筋コンクリートとして取り扱ったが、実際には、無筋コンクリートには斜めひび割れは発生しないが、スターラップを配筋した後の応力の流れを調べるため、このモデル化を行う。図14においては、主鉄筋の効果をあらかずTension Pathのみを考慮する。

3) 斜めひび割れがあり、主鉄筋がなく、スターラップを配筋した場合において、図13のモデルに、スターラップの配筋位置による応力の流れを調べる。スターラップの配筋位置は、図15に示すひび割れ開口部付近と図16に示すひび割れ先端付近とする。

6. 計算結果

図の実線は、圧縮力であり、破線は、引っ張り力である。

太線は、トラス部材応力の最大値の 20% 以上であり、細線は、最大値の 20% 以下である。

梁上部から梁底へ圧縮の力の流れがみられ、
梁底部から梁上部へ引っ張りの力の流れがみられる。

図中の○は、不動点を示す。

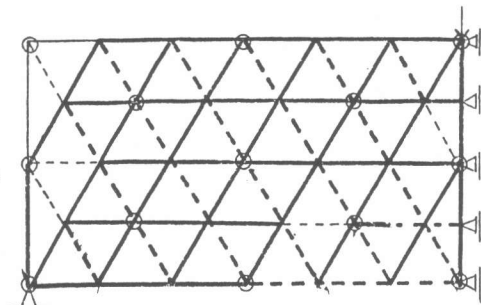


図10. 梁を当初からトラスモデル化した1回目の解析結果

載荷点から梁側面へ向かって圧縮の力の流れがみられる。引っ張りの力の流れは、図10とほぼ同様である。載荷点から支点へ向かって圧縮の圧力の線が直接的に流れていることが分かる。この力の大きさは、他のトラス部材の力の大きさに比べ、非常に大きい。また、1回目の解析結果による圧縮の力の最大値の約2倍の大きさである。

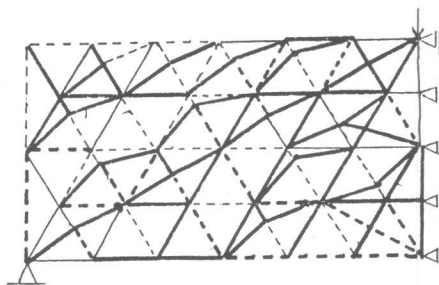


図11. 梁を当初からトラスモデル化した2回目の解析結果

結果は図11の結果とほぼ同様であるが、載荷点から支点に向かう圧縮の圧力の線の力の大きさは、図10の結果によって得られた値の約1.5倍であった。

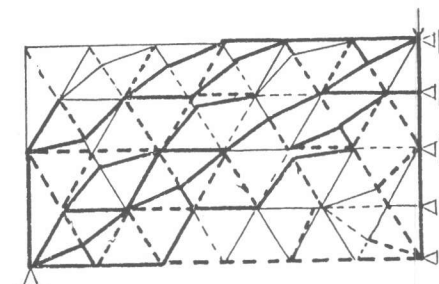


図12. 梁を当初からトラスモデル化した3回目の解析結果

斜めひび割れ下部には、微少な力の流れしか見られない。このモデルは、全体としてアーチのようになっている。

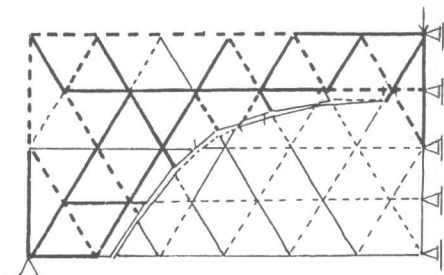


図13. 斜めひび割れがあって主鉄筋がない梁をトラスモデル化した結果

ほぼ図13と同じであるが、Tension Pathによる力の流れがみられる。

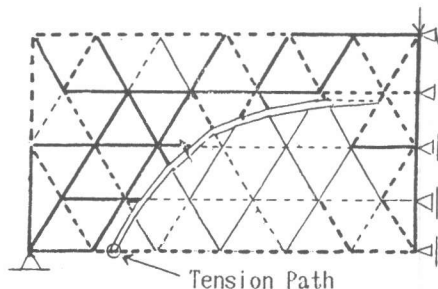


図14. 斜めひび割れがあって単鉄筋コンクリート梁をトラスモデル化した結果

斜めひび割れ下部のスターラップの左側には、微少な力の流れしか見られない。スターラップの右側においては、力の流れがみられる。

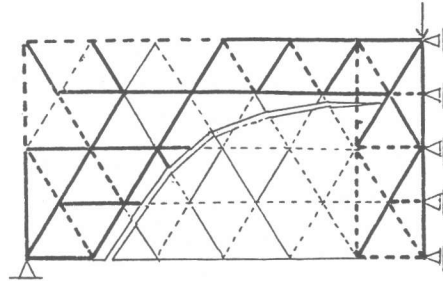


図15. 図13のモデルに、ひび割れ先端付近にスターラップを配筋した梁をトラスモデル化した結果

ひび割れ開口部付近を除いては、図10とよく似た力の流れがみられる。

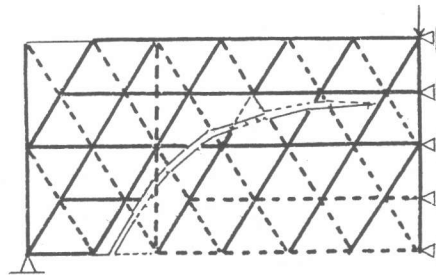


図16. 図13のモデルに、ひび割れ開口部付近にスターラップを配筋した梁をモデル化した結果

7. 結果の解釈、既存の知見との対照、及び設計への利用

- 1) 図10、図11、図12、より、ベクトル合成による梁の応力の流れは、載荷点から支点へ圧力の線が直接的に流れて行くことが認められる。なお、この圧力の線の流れは他のトラス部材の応力に比べ非常に大きく、図10、図11、図12、と解析を進めていくに従って、載荷点から支点に直接的に流れていく圧力の線の大きさが次第に大きくなっていく。
- 2) 斜めひび割れが発生した後のトラスモデルの解析においては、図13では斜めひび割れの下部にはほとんど応力の流れがなく、ひび割れ上部に応力が流れアーチの様になっている。
- 3) 図14では図13よりも応力は大きい斜めひび割れ上部においての応力の流れはほぼ同様である。ただし、梁の底部にTension Pathによる応力の流れがみられる。
- 4) 図13にスターラップを配筋したモデル図15、図16においては、スターラップの配筋位置より右側の斜めひび割れ下部には応力の流れがみられる。しかし、スターラップの配筋位置より左側の斜めひび割れ下部にはあまり応力の流れはみられない。スターラップの配筋を斜めひび割れの開口部付近とすると、スターラップが斜めひび割れ下部をつりあげているため、応力の流れが図10とよく似ている。したがって、スターラップの配筋位置

は、ひび割れの開口部付近が有効であることになる。

- 5) 現在行われている梁の設計においては、着目断面における作用せん断力の値によって、その位置でのスターラップの所要量が決定されているため、本報告における単純支持梁のスパン中央に集中荷重を載荷した梁では、せん断力が梁に一樣な大きさでかかるとしてスターラップを等間隔に配筋することになるが、本手法によれば、開口部付近にスターラップを密に配筋するのがもっとも有効であり、斜めひび割れ先端付近へのスターラップの配筋は余り有効でないことを示している。
- 6) ひび割れ先端付近に配筋したスターラップの応力の大きさは、ひび割れ開口部付近に配筋したスターラップの応力の大きさよりも約2倍大きい。これは、スターラップの配筋位置が載荷点に近づくにつれ、スターラップの応力が大きくなっていることを示す。
- 7) スターラップを配筋する前後におけるひび割れ上部付近のトラス部材の応力の大きさはスターラップの配筋前に比べ、図15では2.5倍程度であるが、図16においては6倍程度であり非常に大きい。これは、上部表面とひび割れとの距離が短くなればなるほど、その倍率が大きくなることを示している。
- 8) 図13, 図15, 図16の結果とKaniの内部アーチの理論とを対照するとほぼ一致していることが分かる。

8. 結論

本手法により、梁の内部の応力の流れをほぼ見ることが出来る。

既存の知見（Kaniの内部アーチ等）との対照においてもほぼ一致している。

将来的には、実験を通じて、梁の内部の応力状態を調べ、本手法による結果と照らし合わせることを今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 日本道路協会：道路橋示方書同解説・コンクリート橋編 PP.124-127
- [2] Beton-Kalender 1984 Teil II PP.939
- [3] 二羽 淳一郎：FEM解析に基づくデューブビームのせん断耐荷力算定式、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集1983、日本コンクリート工学協会 PP.119-128
- [4] Kani,G.N.J.:A Rational Theory for the Function of Web Reinforcement, Journal of American Concrete Institute, V.66,NO.3, March 1969, pp.185-197
- [5] 青柳 征夫：Estimation of Strength and Deformational Characteristics of Reinforced Concrete Shell Elements Subjected to In-Plane Forces, Seminar on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures 1985 Volume 2, 日本コンクリート工学協会 pp.55-73
- [6] 古内 仁, 角田 与史雄：鉄筋のダウエル作用による変形性状について、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、1985、日本コンクリート工学協会 pp.509-512
- [7] K.J.Bathe E.L.Wilson:有限要素法の数値計算、科学技術出版社 PP.227-263
- [8] Sih,G.C.,and Ditommaso,A. :Fracture Mechanics of Concrete, Martinus Nijhoff Publishers, 1985, PP.276