M401　自動車骨格部材の衝突時の強度推定法に関する研究

大林　祐也　（指導教員：正岡）

1. 緒言

自動車骨格部材のフレーム構造はスポット溶接で接合された薄板により構成されている. 衝突時に骨格部材は圧縮, 曲げなどの複合荷重を受ける. 従来からフレーム構造の最終強度解析を行う際, 圧縮部分に関して座屈有効幅理論を適用した近似解法があるが, 複合荷重に対しては推定精度が悪い場合がある. そこで本研究では非線形有限要素法解析を用いて複合荷重を受けるフレーム構造の最終強度推定の精密化をおこなう. また本手法を用いて, スポット溶接の間隔がフレーム構造の最終強度に及ぼす影響, 及びフレーム構造の長手方向への断面形状の変化が部材の最終強度低下に与える影響について検討する.

2. 非線形有限要素法解析の概要

自動車のような薄板構造の最終強度解析を行うには, 幾何学的非線形性と材料的非線形性を考慮した弾塑性大変形解析を行う必要がある. 本解析ではこの弾塑性大変形解析を行うにあたり４節点アイソパラメトリック・シェル要素を用いてフレーム構造をモデル化している[1]. またスポット溶接はビーム要素を用いてモデル化しており, シェル要素の接触はトラス要素を改良した接触要素を用いて表現している.

解析には静的陰解法を使用する. 弾塑性の判定にはミーゼスの降伏条件を使用し完全弾塑性体を仮定している. また収束性を高めるために弧長増分法を使用し, Newton-Raphson法により、1ステップ毎に解の収束計算を行う[2].

幾何学的非線形性

幾何学的非線形性として座屈の影響を考え, 定式化を行う. 変形が大きくなると歪と変位の間に存在する線形関係が崩れ, 面内および面外の大変形項を考慮する必要がある. 部材の変形が大きくなった場合の歪と変位の関係は(1)式で表される.

本解析では(1)式の大変形項を無視し, 幾何学的非線形性を考慮しない解析も可能としている.

$$\left.\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \\
\gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

材料的非線形性

材料的非線形性として塑性化の影響を考慮する．平面応力状態での応力と歪の関係は(2)式で表される．要素座標を考え，シェルの面内方向にx軸，y軸を設定した．その軸に沿い，応力σ_x, σ_y, τ_{xy}, 歪ε_x, ε_y, γ_{xy}を定義した．応力と歪は積分点毎に評価しており，面内に 2×2 点, 面外方向に 6 点の積分点を設けている.

$$\left.\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \\
\varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \\
\gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy}
\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

降伏の条件にはミーゼスの降伏応力を用いており, 平面応力状態の仮定の下, 降伏の判定を行う．ミーゼスの降伏条件より, 降伏関数 f は次式のように定義される.

$$f = \sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 - \sigma_0^2 \qquad (3)$$

(3)式の中のσ_0は降伏応力であり，f=0 を満たすとき降伏する．降伏後は積分点毎にf=0 を満足する応力状態となる.

降伏後は塑性流れ則に従う. 歪硬化を考慮しない場合，弾塑性構成行列[D^p]は次式となる[3].

$$[D] = \begin{cases} [D^e] & (f < 0) \\ [D^p] & (f = 0) \end{cases}$$

$$[D^p] = [D^e] - \frac{[D^e]\{\Phi\}\{\Phi\}^T[D^e]}{\{\Phi\}^T[D^e]\{\Phi\}}$$

ここで $\{\Phi\} = \{\partial f/\partial\sigma_x \quad \partial f/\partial\sigma_y \quad \partial f/\partial\tau_{xy}\}$ である.

スポット溶接のモデル化

ビーム要素によるスポット溶接モデルの概略図を Fig.1 に示す．Fig.1 に示すようにビーム要

素を用いてシェル要素の節点をつなぎ合わせることでスポット溶接を表現している．

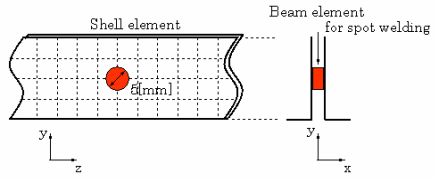
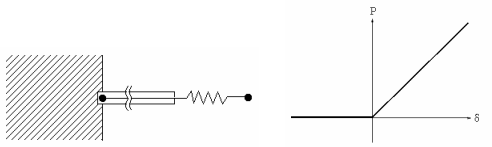


Fig.1　スポット溶接モデルの概略図

接触要素のモデル化

Fig.2 に接触要素ギャップモデルとその軸力 - 伸び曲線を示す．



(a)　ギャップモデル　　(b)　軸力-伸び曲線

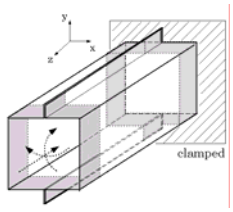
Fig. 2　接触要素

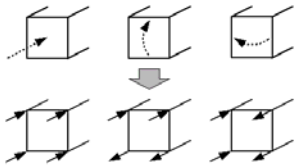
本研究で用いている接触要素は圧縮方向に対する変形に対してのみ反力をもち，引張りに対しては自由に伸びることが出来る．この要素により接触しているシェル要素どうしにオーバーラップなどの現象が起こるのを防ぐことができる．またはじめに接触していたシェル要素どうしが離れていく際には接触要素は一切影響を与えない．

解析モデル

フレーム構造の解析モデルと境界条件および作用する外力（軸力，縦曲げ，横曲げ）を Fig.3 に示す．解析対象部の両側にそれぞれ 100[mm]の端末要素を設けており，一端を固定端，他端を自由端としている．ただし端末要素の板厚は解析対象部の板厚の 1000 倍としている．

外力として作用する軸力，縦曲げ，横曲げは Fig.4 に示すように，４点に作用する集中荷重として自由端に作用させており，複合荷重は集中荷重の組み合わせにより表される．





軸力 N　縦曲げ Mx　横曲げ My

Fig.3　境界条件および外力　　Fig.4　各外力の表現

3. スポット間隔が及ぼす影響の検討

スポット溶接の間隔がフレーム構造の最終強度に及ぼす影響を検討する．解析モデルの寸法の主要目を Fig.5 に示す．材料定数およびスポット間隔については Table 1 に示す．

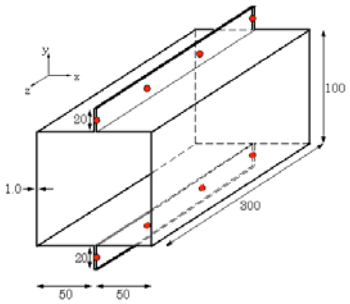


Fig.5　解析モデル

Table 1　材料定数およびスポット間隔

ヤング率 E [GPa]	200
ポアソン比 ν	0.3
降伏応力 σ_Y [MPa]	300
スポット間隔 [mm]	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100

解析結果

スポット間隔が 30，100[mm]のフレーム構造に縦曲げが作用した際の応力-歪曲線を Fig.6 に示す．また最終強度時の相当応力分布と変形を Fig.7 に示す．ただし変形は 5 倍としている．

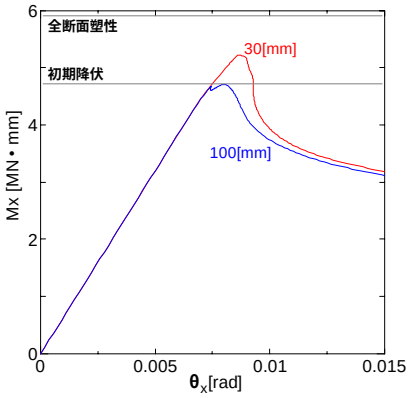
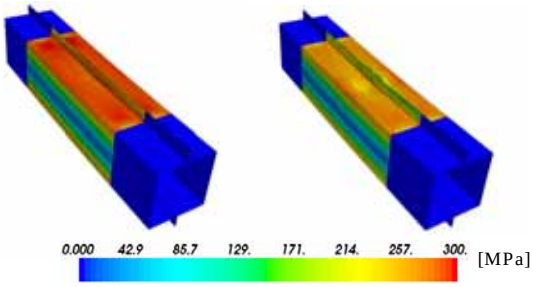


Fig.6　スポット間隔による荷重 - 変位曲線の違い



(a) スポット間隔 30[mm]　(b) スポット間隔 100[mm]

Fig.7　スポット間隔の異なるフレーム構造の最終強度時の相当応力分布と変形の比較（変形 5 倍）

これよりスポット溶接の間隔が 100[mm]の場合，30[mm]としたときに比べ最終強度が 1 割程度低下していることが分かる．Fig.7 より縦曲げを受ける際に生じる圧縮荷重によりプレート上部に座屈が発生していることが分かる．このとき，スポット間隔 30[mm]ではフランジが座屈を抑

える役割をするためフレーム構造が強度を保てているが，スポット間隔 100[mm]ではフランジ自体が座屈し，口開きするため，プレート部の座屈を抑えることができず，強度低下が起こっている．これよりスポット間隔が最終強度に影響を与えることが分かる．

縦曲げを受けるフレーム構造のスポット間隔が 0～100[mm]のときのスポット間隔と最終強度の関係を Fig.8 に示す．

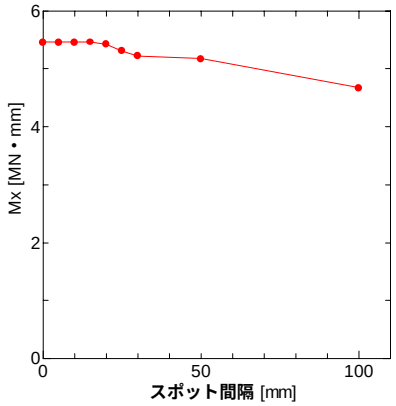


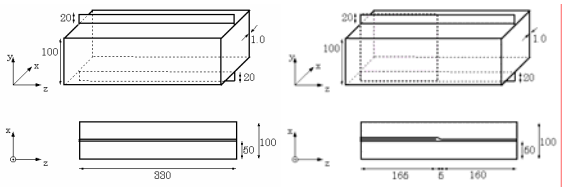
Fig.8　スポット間隔と最終強度の関係

Fig.8 よりスポット溶接の間隔が 20[mm]以下では間隔を詰めても最終強度は上昇せず，20[mm]よりひろがると最終強度が低下することが明らかとなった．

4. 断面変化が及ぼす影響の検討

切り替わりを有する部材の最終強度解析

フレーム構造は場所によって役割が異なるため，長手方向で断面形状が変化する．本研究ではフレーム構造の断面を構成する薄板が 3 枚から 2 枚へ切り替わる場合について考え，この切り替わりが崩壊挙動および強度に与える影響について検討する．解析モデルを Fig.9 に示す．



(a)　2 枚モデル　　(b)　切り替わり 90°モデル

Fig.9　断面切り替わりの形状

Fig.9(a)はすべて 2 枚のモデルである．Fig.9(b)は 3 枚の断面から 2 枚の断面への切り替わりを有するフレーム構造の解析モデルを示したものである．スポット溶接の間隔は 30[mm]としている．

縦曲げが作用した際の荷重‐変位曲線を Fig.10 に示す．最終強度時の変形と相当応力分布を Fig.11 に示す．ただし変形は 5 倍とする．

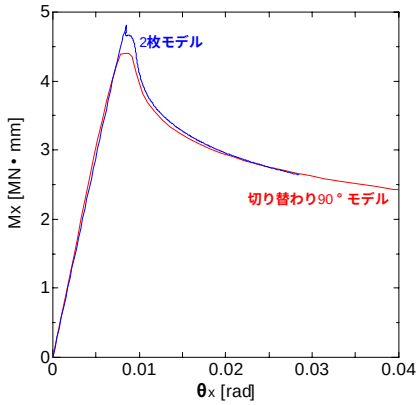
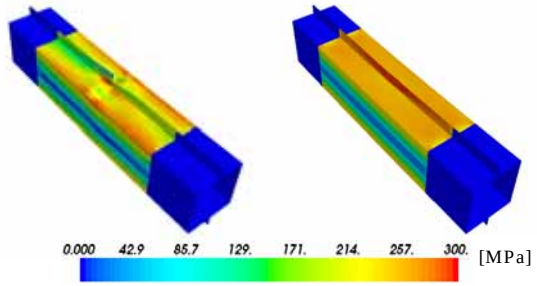


Fig.10　断面の切り替わり有無による荷重‐変位曲線の違い



(a) 切り替わり 90°モデル　　(b) 2 枚モデル

Fig.11　断面の切り替わり有無による最終強度時の相当応力分布と変形の違い（変形 5 倍）

Fig.10 より縦曲げが作用した場合，切り替わりを有するフレーム構造の最終強度が 2 枚モデルの最終強度に比べて低下していることが分かる．Fig.11 より切り替わりを有するフレーム構造に縦曲げが作用した場合，フレーム構造上部に生じる圧縮により，切り替わり部フランジに応力集中がみられ，フランジが大きく座屈変形しており，これによりフランジまわりに力が入らないことが分かる．一方，切り替わりがない場合，フランジに大きな変形はみられず，強度を保てている．

これより切り替わりがフレーム構造の強度低下を引き起こしていると考えられる．

切り替わり形状変更による強度低下の減少

次に切り替わり部に生じる応力集中を緩和し，強度低下を抑えるため，Fig.12 に示す切り替わり 45°モデルのフレーム構造を検討する．

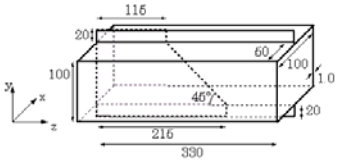


Fig.12　切り替わり 45°モデル

切り替わり 45°モデルに縦曲げが作用した際の荷重‐変位曲線を Fig.13 に示す．最終強度時の相当応力分布と変形を Fig.14 に示す．ただし変形は 5 倍としている．

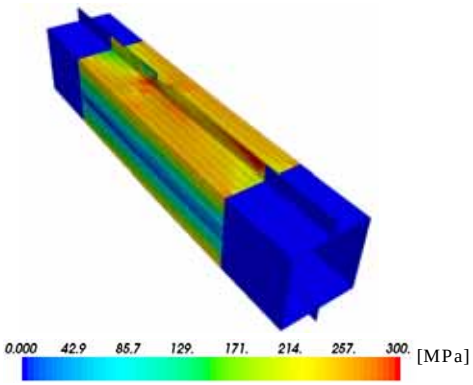


Fig.13　切り替わり形状変更後の相当応力分布と変形（変形 5 倍）

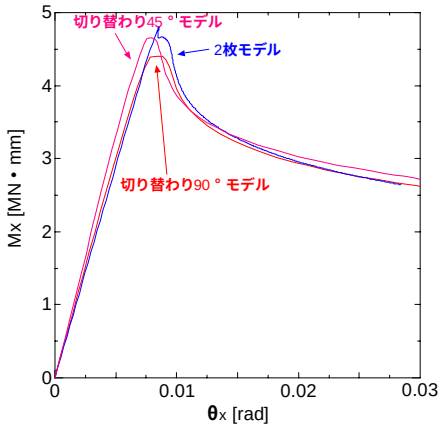


Fig.14　切り替わり形状による荷重 - 変位曲線の比較

Fig.13 より切り替わり 45°モデルでは，切り替わり部フランジの応力集中が緩和されており，フランジの座屈変形が小さくなっていることが分かる．また Fig.14 より切り替わり 45°モデルの最終強度は切り替わり部に傾斜がない場合と比べて大きく，2 枚モデルとほとんど変わらないことが分かる．

5. 複合荷重作用時の最終強度解析

切り替わり 45°モデルと 2 枚モデルに軸力と縦曲げ，あるいは軸力と横曲げの複合荷重が作用した場合の初期降伏荷重と最終強度時の荷重の相関関係を Fig.15，Fig.16 に示す．なお図中の破線は 2 枚モデルの初期降伏荷重の解析値，実線は 2 枚モデルの全断面塑性時の荷重の解析値である．

Fig.15 より切り替わりモデル，2 枚モデルに軸力と縦曲げが作用した場合の最終強度は座屈の影響により低下していることが分かる．また切り替わりモデルの初期降伏は 2 枚モデルに比べて著しく低下している．Fig.16 より作用する複合荷重の横曲げ成分が大きいとき，切り替わりモデルと 2 枚モデルの初期降伏荷重や最終強度に大きな違いがないのに対し，複合荷重の軸力成分が大きいとき，切り替わりモデルの初期降伏荷重や最終強度が 2 枚モデルに比べて低下していることが分かる．これより横曲げに対しては切り替わりが初期降伏や最終強度に与える影響は小さいといえる．

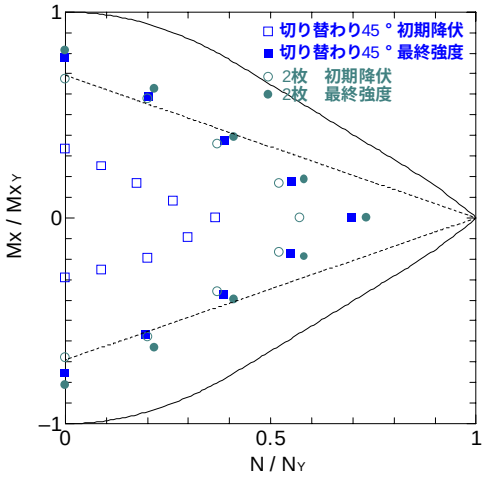


Fig.15　軸力と縦曲げの相関関係

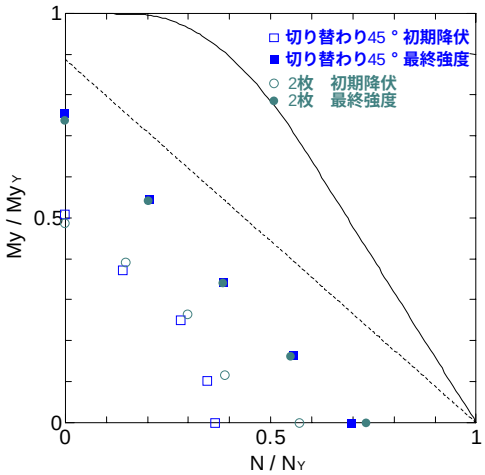


Fig.16　軸力と横曲げの相関関係

6. 結言

自動車骨格部材の衝突時の強度推定のために非線形有限要素法解析を用いて解析法の検討をおこなった．

1. スポット溶接の間隔がフレーム構造の最終強度に及ぼす影響を明らかにした．
2. フレーム構造の長手方向への断面形状の変化により強度低下が起こることを明らかにし，変化を緩やかにすることでその強度低下が抑えられることを明確にした．

参考文献

1)三好俊郎：有限要素法入門，培風館，1994.
2)野口裕久，久田俊明：非線形有限要素法の基礎と応用，丸善株式会社，1995.
3)関西造船協会 KSSG 委員会：造船構造設計者のための有限要素法，関西造船協会，2004.