研究速報

UDC 624.072.2：539.4.01

補強箱型はりの横衝突崩壊挙動の弾／粘塑性解析

Elasto-Viscoplastic Analysis of Transverse Collision Collapse of Reinforced Box Beams

弓削康平*・都井　裕*

Kohei YUGE and Yutaka TOI

1．はじめに

箱型はりの衝突崩壊挙動に関する数値解析的研究はすでにいくつか見られるが(たとえば文献1))，ひずみ速度の影響を考慮したもの，あるいは横衝突解析を行ったものは，ほとんど見当たらない．本研究では、弾／粘塑性流れ則によりひずみ速度の影響を考慮した板殻用動的クラッシュ解析コードを作成し，横衝突に対する箱形はりの補強効果解析を実施した．補強方法として衝突面に補強板をスポット溶接したもの、隅肉溶接したもの、全体の肉厚を厚くしたものを仮定した．文献2)には，疲労強度解析の観点からスポット溶接の詳細な取り扱い方が示されているが，クラッシュ解析においては，スポット溶接点近傍の応力あるいはひずみ場の精密な評価は要求されない．そこで，本研究では節点自由度を要素中心面から要素表面にオフセットする簡便な方法を用いたが，補強方法による明確な強度の相違を得ることができた．

以下，第2章では解析アルゴリズムの概要を説明し，第3章で種々の補強箱型はりに対する数値解析の詳細を示した後、第4章でまとめを述べる．

2．衝突圧壊解析アルゴリズムの概要

解析コードは著者らが文献3)において作成した準静的な板殻クラッシュ解析コードを動的解析に拡張したものであり，解析における主要な仮定は以下のとおりである．すなわち，4節点双一次シェル要素を使用する，要素の剛性評価には一点積分法を適用する，断面剛性は層分割法により評価する，超大変形を追跡可能とするため幾何学的非線形性はupdated Lagrange法に基づく定式化とする，時間積分法として陽解法を用いる，ひずみ速度の影響を考慮するため，応力・ひずみ関係式に弾／粘塑性流れ則を適用することなどである．準静的解析と共通するアルゴリズムの詳細は文献3)に譲り，ここでは時間積分法，弾／粘塑性流れ則，および前節で述べた溶接部の取り扱い方法を示す．

2.1　陽解法による時間積分

有限要素法における動的釣合方程式は一般に次式で表される．

$$\{f_{int}\}^{(n)}+[M]\{\ddot{u}\}^{(n)}=\{f_{out}\}^{(n)} \tag{1}$$

ここに上添字nは第nステップの釣合状態であることを，$[M]$ は質量マトリックスを，$\{f_{out}\}$ は外力を表す．また，$\{f_{int}\}$は内力の等価節点ベクトルであり次式で定義される．

$$\{f_{int}\}^{(n)}=\int[B]^t\{\sigma\}^{(n)}dv \tag{2}$$

ここに $[B]$ はひずみ・変位マトリックス，$\{\sigma\}$ 要素応力ベクトルを表す．積分記号は要素体積積分を意味する．陽解法では(1)式の $\{\ddot{u}\}^{(n)}$を中心差分法により次式で近似する．

$$\{\ddot{u}\}^{(n)}=(\{u\}^{(n+1)}-2\{u\}^{(n)}+\{u\}^{(n-1)})/\Delta t^2 \tag{3}$$

(3)式を(1)式に代入することにより次式を得る．

$$[M]\{u\}^{(n+1)}=\Delta t^2(\{f_{out}\}^{(n)}-\{f_{int}\}^{(n)}+[M](2\{u\}^{(n)}-\{u\}^{(n-1)}) \tag{4}$$

$[M]$が対角成分のみを有する集中質量マトリックスならば，上式は単純漸化式となり計算速度は著しく向上する．本解析コードでは節点6自由度に対する集中質量として以下の値を使用した．

$$\left\lfloor\frac{m_e}{4},\frac{m_e}{4},\frac{m_e}{4},\frac{m_e\cdot r_x^2}{4},\frac{m_e\cdot r_y^2}{4},\frac{m_e\cdot r_z^2}{4}\right\rfloor \tag{5}$$

上式各項は左よりx, y, z方向並進変位自由度に対する集中質量および，x軸，y軸，z軸回りの回転変位自由度に対する集中質量を表す．また，m_eは要素質量であり，r_x, r_y, r_zは要素中心点（$\varepsilon=\eta=0$）に設けた座標系（全体座標系と同一方向とする）の各座標軸への節点からの垂線の足の長さを表す．

*東京大学生産技術研究所　第2部

2.2 粘・塑性流れ則

前述したように本解析コードでは粘・塑性流れ則によりひずみ速度の影響を考慮する．粘・塑性流れ則に基づけば，降伏後の応力増分 $\{\Delta\sigma\}$ とひずみ増分 $\{\Delta\varepsilon\}$ は次式の関係で表される[4]．

$$\{\Delta\sigma\}=[D](\{\Delta\varepsilon\}-\{\dot{\varepsilon}_{vp}\}\Delta t)$$

ここに　(6)

$$\{\dot{\varepsilon}_{vp}\}=\gamma\Phi\{\partial f/\partial\sigma\}$$

ここにγは流動性パラメータであり，fは塑性ポテンシャル，Φは関数である．代表的なΦとして次章の数値解析では次式を用いる．

$$\Phi=\{(f-f_o)/f_o\}^N$$

ここに　(7)

$$N=2$$

f_oは準静的降伏応力であり次式で与えられる．

$$f_o=\sigma_y+H'\bar{\varepsilon}_{vp} \tag{8}$$

ここにσ_yは降伏応力である．また，$\bar{\varepsilon}_{vp}$は相当粘塑性ひずみであり各時間増分ステップにおいて次式で得られる相当塑性ひずみ増分を蓄積することにより得る．

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{vp}=\sqrt{(2/3)\lfloor\dot{\varepsilon}_{vp}\rfloor\{\dot{\varepsilon}_{vp}\}}\Delta t \tag{9}$$

(9)式を(6)式に代入することにより応力増分を得る．なお，updated Lagrange法ではさらに，この応力増分(Kirchhoff応力増分）に対して座標変換を施し，Jaumann応力増分を求めることが必要となる．座標変換法については文献1)を参照していただきたい．

2.3 溶接部の取り扱い

本研究で解析を実施した箱型はりには前述したように補強板を溶接したものがある．図1に示すs点は溶接部位である．s点を挟んで位置するはり側および補強板側の節点をiおよびjとする．節点i，jはs点とともに剛体変位すると仮定することによりこれらの節点自由度を要素表面上に位置する溶接点sにオフセットすることができる．節点iおよびjの並進変位ベクトル$\{u_{t(i)}\}$，$\{u_{t(j)}\}$（添字tはtranslationの意）は高次の項を無視した近似剛体変位関数に従い，溶接点の並進変位ベクトル$\{u_{t(s)}\}$および回転変位ベクトル$\{u_{r(s)}\}$（rはrotationの意）を用いて次式で表される．

$$\{u_{t(i)}\}=\{u_{t(s)}\}+\{u_{r(s)}\}\times(\{x_i\}-\{x_s\})$$

$$\{u_{t(j)}\}=\{u_{t(s)}\}+\{u_{r(s)}\}\times(\{x_j\}-\{x_s\}) \tag{10}$$

ここに$\{x_t\}$，$\{x_j\}$，$\{x_s\}$は節点i，j，sの位置ベクトルを表す．各節点の回転変位量はスポット溶接点の回転変位量と等しい，すなわち次式で与えられるものとする．

$$\{u_{r(i)}\}=\{u_{r(j)}\}=\{u_{r(s)}\} \tag{11}$$

(10)，(11)式を用いることにより節点i，jの6変位自由度$\{u_{(i)}\}$，$\{u_{(j)}\}$と溶接点の6変位自由度$\{u_{(s)}\}$の変換マトリックスを次式のように導くことができる．

$$\lfloor u_{(i)},u_{(j)}\rfloor^t=[A]\{u_{(s)}\} \tag{12}$$

節点i，jに生じる等価節点力は次式で溶接点の等価節点力に変換される．

$$\{f_{int(s)}\}=[A]^t\lfloor f_{int(i)},f_{int(j)}\rfloor^t \tag{13}$$

節点i，jの外力も同様に溶接点の外力に変換される．また，溶接点の質量マトリックスとして両節点の質量マトリックスの和を用いる．以上の関係式により溶接点に関する運動方程式が他の節点と同様次式のように構成される．

$$\{f_{int(s)}\}+[M_{(s)}]\{u_{(s)}\}=\{f_{out(s)}\} \tag{14}$$

3．箱型はりの横衝突解析

本章では，図2に示すような箱型はりの横衝突に対する補強効果解析を実施する．箱型はりは両端部付近を支持された状態で剛な円柱に25km/hで衝突するものとす

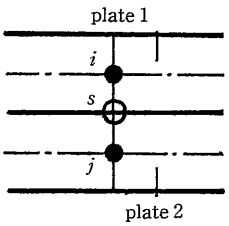


図1　溶接点への節点自由度のオフセット

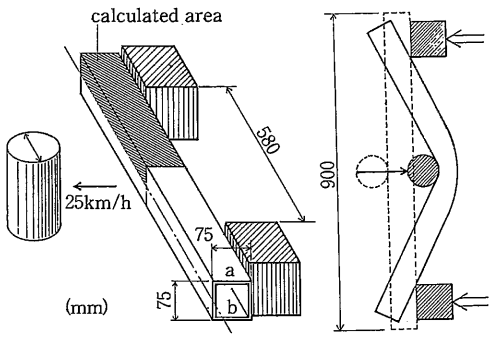


図2　箱型はりの横衝突解析

る．図3に解析モデル4ケースを示す．ケース1は基準となる補強のないモデルである．ケース2は全体の肉厚を増したモデルである．ケース3は衝突面に補強板をスポット溶接したもの，ケース4は同じ補強板を隅肉溶接したものである．図4にケース3のスポット溶接位置の詳細を示す．要素分割は問題の対称性を考慮して箱型はりの4分の1領域に施し（図2参照），衝突位置に近い領域は細かい分割に，遠い領域は粗い分割とした．図5に各ケースの要素分割図を示す．ケース1，2は同じ分割とし，ケース4は同じ分割で補強板を加えている．ケース3はスポット溶接部（図中○印）に節点を位置させたため，若干，細かい分割となった．節点数はケース1，2が483であり，ケース3が1075，ケース4が644である．以上の4解析モデルに対して，全節点に初期速度を与え，さらに支持部に位置する節点に25km/hの強制速度を与え続けた．また剛円柱と接触した節点は円周方向には滑らないと仮定し，リバウンドは剛円柱に生じる衝突方向の反力の向きにより判定した．材料定数として降伏応力（σ_y）30kg/mm²，流動性パラメータ（γ）5000，接線係数（E_t）210kg/mm²，密度（ρ）8.01×10^{-10}kg・s²/mm⁴を用いた．また，時間刻みはクーラン安定条件の10分の1程度とし，箱型はりが最大耐力を越えたと判断されるまで計算を続行した．解析時間はHITAC M682を用いケース2で210分程度を要した．

解析により得られた各モデルの荷重（剛体円柱に生じる反力）と強制変位点における変位の関係を図6に示す．補強方法によりこれらの曲線に明確な相違が現れており，ケース1，ケース3，ケース4，ケース2の順に耐力が大きくなることがわかる．基準となるケース1の最大耐力を1とすると全体の肉厚を高めたケース2は1.52であり，スポット溶接により補強板を設置したケース3は1.05，同じく隅肉溶接を用いたケース4は1.20である．

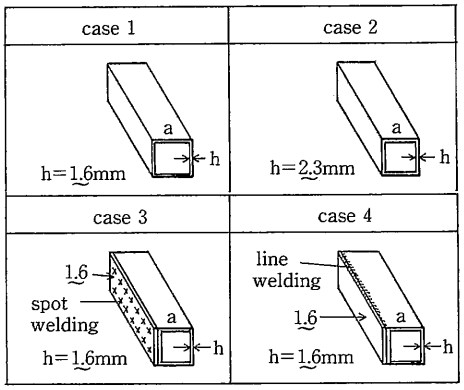


図3　箱型はり解析モデル

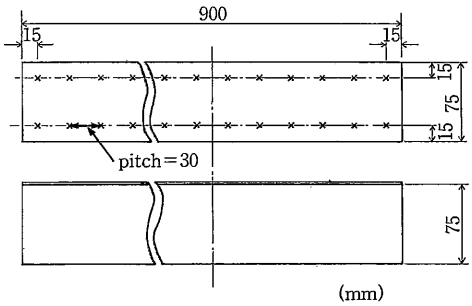
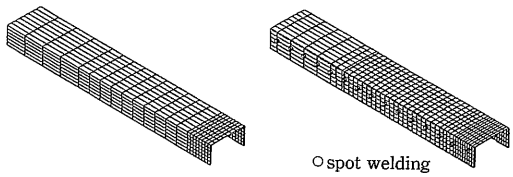
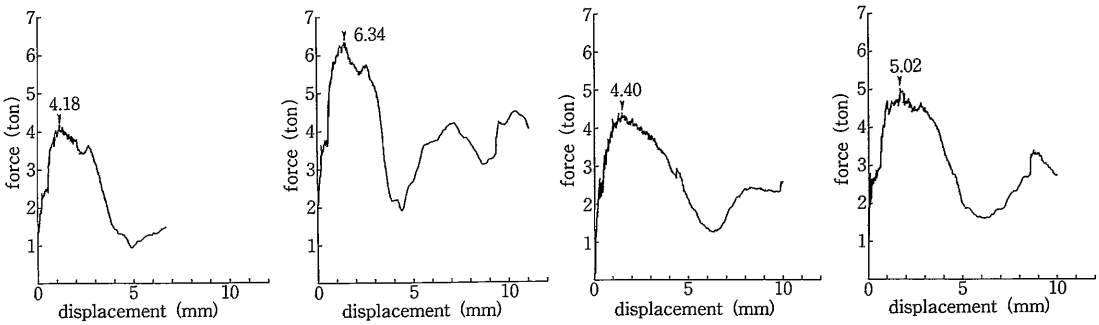


図4　スポット溶接位置詳細



（a）case 1, case 2, case 4　　（b）case 3

図5　要素分割図（図2の斜線部）



（a）case 1　（b）case 2　（c）case 3　（d）case 4

図6　荷重・変位曲線

ケース3は最大耐力は余り高くなっていないが最大耐力後の荷重の低下がケース1に比べ緩やかでありエネルギー吸収量の観点よりはっきりと補強効果が認められる．

図7に衝突点の横断面変形図を，また，図8にモデル全体の崩壊形状の一例を示す．全ケースとも，衝突面と直交する上下の側面（図2のa面とb面）に局所座屈を生じた後，はり全体に曲げ変形が生じた．これらの崩壊形状は上下・側面の座屈強度が箱型はり全体の最大耐力と密接な関連があることを示唆しており，この観点から各ケースの耐力の相違を理解することができる．すなわち，最も耐力の高かったケース2は唯一側面を補強しており，また，ケース3とケース4では，前者が後者に比べ溶接位置が側面に近く拘束が強いと考えられる．以上の考察により解析結果はほぼ妥当であると考えられる．

今後の課題として解析アルゴリズムの妥当性の検証を実験との定量的な比較により進めることが必要である．また，より厳密に強度を算定するためには箱型はりの衝突面と上下・側面の角部の曲率も考慮した要素分割を施す必要があると考えられる．

4．まとめ

本研究では板殻用の弾／粘塑性衝突圧壊解析コードを構成し，補強箱型はりの横衝突崩壊解析を実施した．溶接部の変形を忠実にシミュレートするため，節点自由度を要素の中心面から要素表面にオフセットするアルゴリズムを付加した．その結果，明確な補強効果の相違が観察された．解析結果の実験的な検証については追って報告したい．

（1990年5月21日受理）

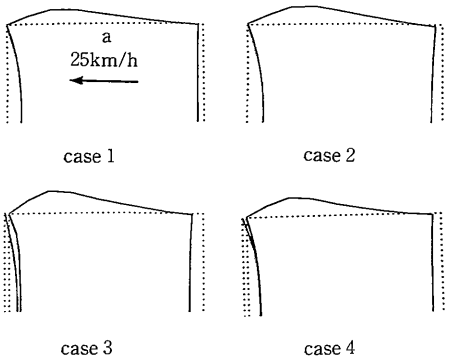


図7　中央横断面変形図

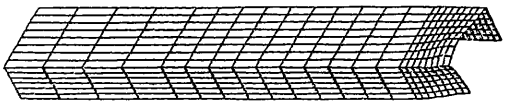


図8　全体変形図（case 2，図2の斜線部）

参考文献

1) 萩原一郎，津田政明，佐藤佳裕；「有限要素法による薄肉箱型断面真直部材の衝撃圧壊解析」，日本機械学会論文集55巻514号（1989），1407.
2) 窪島達雄ほか；「破壊力学に基づくスポット溶接構造の疲労寿命推定法の開発(3)」，自動車技術会学術講演会前刷集892（1989），361.
3) 都井　裕，弓削康平，川井忠彦；「構造要素の衝突圧壊強度に関する基礎的研究（その1）」，日本造船学会論文集第159号（1986），248.
4) D.R.J. Owen and E. Hinton; "Finite Element in Plasticity", Pineridge Press Limited (1980)