

足回り部品の弾塑性解析

Nonlinear Static Analysis of Automotive Suspension Parts

中道義弘* Yoshihiro Nakamichi
吉沢 亮* Akira Yoshizawa
原 雅徳* Masanori Hara

自動車機器カンパニーでは、自動車の足回り部品において弾性解析を用いて降伏荷重を精度良く予測する解析技術確立している。現在、破断荷重を予測するための弾塑（そ）性解析技術の確立に取り組んでいる。まず、基礎的な引張り試験と三点曲げ試験を行い、曲げ部位の破断判定方法を検討した。その結果を自動車足回り部品のナックルステアリングに適用し、精度良く破断荷重を予測できることを確認した。本稿ではこれらの内容について紹介する。

We have established a linear FEA technique to estimate yield strength but we are struggling to develop a nonlinear FEA technique to estimate fracture strength. First, we did a tensile test and a bending test, and we considered to select a method to estimate the fracture strength of the bending test piece. This result was applied to the FEA of knuckle steering. And we found we could estimate fracture strength very accurately.

① 緒 言

近年、コンピュータの性能向上と低価格化や、CAD/CAM/CAEなどのアプリケーションソフトの性能向上により、製造産業での物造りはデジタル化による効率向上が進んでいる。自動車の設計開発においてもデジタルモックアップ（コンピュータ上で車を組上げ仮想的に試作）によるバーチャルな開発へ移行してきている。部品メーカーにおいても設計開発には自動車メーカーとタイアップしたCADが不可欠であり、CAEによる事前検討が必須項目となっている。

自動車機器カンパニーでも、自動車の鋳物強度部品において、CADを中核としFEA（有限要素モデルによる解析）を用いて事前に強度検討を行うことで、試作回数の低減と開発期間の短縮に効果を上げている。また、RP（ラピッドプロトタイピング）をデザインレビューや短納期試作に活用し、高いCS（顧客満足度）をいただいている。

足回り部品ではFEAによる強度検討において、弾性解析を用いて降伏荷重を精度良く予測する解析技術確立している。しかし、破断荷重は実際の試作品を用いて台上試験で評価しているのが現状である。そのため、FEAで破断荷重を予測するための弾塑性解析技術の確立に取り組んでいる。まず、テストピースによる基礎的な試験を行い、その結果をナックルステアリングに適用し破断荷重の予測精度を確認した。本稿ではこれらの内容について紹介する。

② 引張り試験および三点曲げ試験

2.1 引張り試験

弾塑性解析を行うには材料の応力-ひずみ線図が必要であるため引張り試験を行った。試験片はJIS 4号引張り試験片とした。材料は足回り部品に良く用いられるFCD（球状黒鉛鋳鉄）相当材であるHNM材（HNM380、HNM450、HNM500、HNM600）を用いて試験を行った。HNM材の機械的性質を表1に示す。また、切削加工の試験片だけでなく鋳肌品の伸びを調べるため、標点間を鋳肌品とした試験片も準備した。試験本数はそれぞれ6本とした。

なお、HNM各材料には硬度の範囲があり、FEAで強度検討する場合、安全を考慮するため硬度下限の材料特性を用いて強度設計する必要がある。そのため、試験片は硬度下限材となるように鋳造した。硬度が高くなってしまった材料は硬度下限相当になるように、試験結果を補正した。

表1 HNM材の機械的性質

Table 1 Mechanical properties of HNM material

	硬度(HB)	0.2%耐力(MPa)	引張り強さ(MPa)	伸び(%)
HNM380	170以下	230以上	380以上	18以上
HNM450	143 ~ 207	290以上	450以上	12以上
HNM500	170 ~ 235	340以上	500以上	8以上
HNM600	201 ~ 262	262以上	600以上	4以上

引張り試験で得られた応力-ひずみ線図を図1に示す。

* 日立金属株式会社 素材研究所

* Casting Technology Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

図中の実線が切削加工品の試験結果であり、鋳肌品の破断は印で示している。鋳肌品は伸びが低いが、破断までの応力-ひずみ線図は加工品と同等である。また、鋳肌品の伸びはばらつきが大きい、過去のデータと比較すると（図2）、本稿試験の伸びはばらつきの下限に近い値となっている。

この試験結果からFEAで設定する応力-ひずみ線図を印で示すように多直線で近似し、この設定値をナックルステアリングの弾塑性解析に適用した。

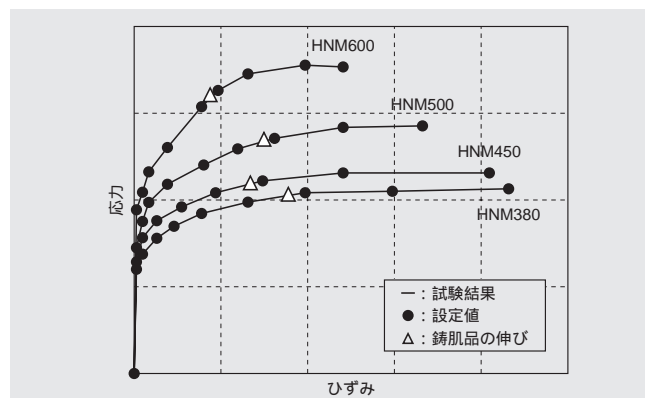


図1 引張り試験による応力-ひずみ線図

Fig. 1 Stress-Strain curves by tensile test

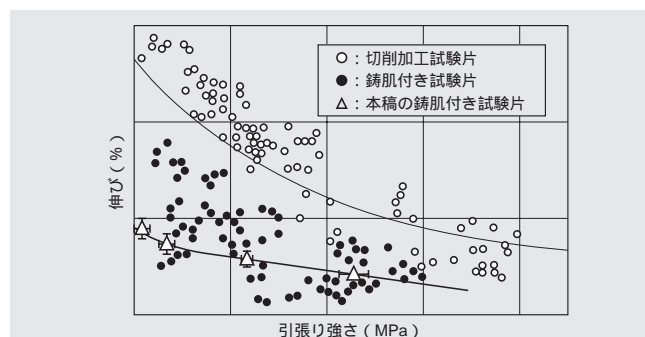


図2 鋳肌付き試験片の伸びと引張り強さ

Fig. 2 Elongation and tensile strength of test piece with casting surface

2.2 三点曲げ試験

弾塑性解析において曲げ部位の破断荷重を予測するための判断基準を検討するため、三点曲げ試験を行った。試験片寸法と試験方法を図3に示す。試験片は切削加工品と鋳肌品それぞれ6本の試験を行った。

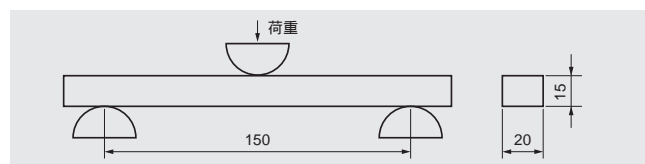


図3 三点曲げ試験方法

Fig. 3 Method of bending test

試験結果（鋳肌品）を図4に示す。この図から降伏荷重を読み取り、降伏応力を算出した。その値と引張り試験での0.2%耐力を比較すると、三点曲げ試験での降伏応力は、引張り試験での0.2%耐力の1.45～1.48倍となっている。これは、曲げ試験では表面が最大応力となるが

中立面の応力は0であるため、表面応力が引張り試験での0.2%耐力を超えても曲げ試験片全体では降伏しないためである。また、完全塑性理論でも長方形断面の曲げの降伏応力は、引張り試験での降伏応力の1.5倍となる¹⁾。このことから、実際の足回り部品での弾塑性解析による降伏荷重の予測において、曲げ部位の降伏応力は引張り試験での0.2%耐力の約1.5倍の応力で判断できると考えられる。

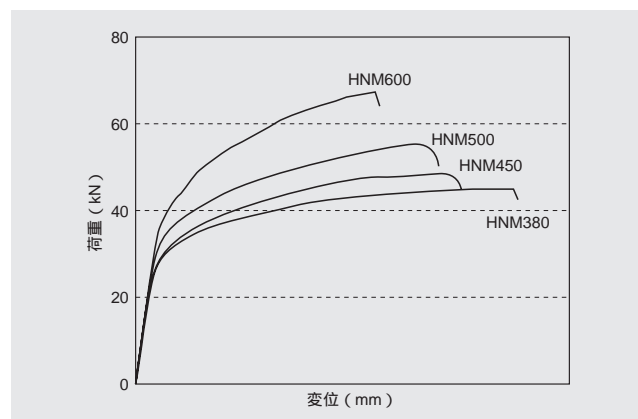


図4 三点曲げ試験結果（鋳肌品）

Fig. 4 Result of bending test

次に、曲げ部位の破断についてはどのような判断基準が適用できるか検討した。試験片中央にひずみゲージを貼くは）りひずみを測定したが、破断時のひずみは大変大きいためひずみを実測することができなかった。そのため弾塑性解析で三点曲げ試験を再現し、破断時の応力、ひずみを調査した。解析モデルを図5に示す。要素タイプは、足回り部品で用いているテトラ（三角錐）2次要素とした。要素長は3.75mmとし自動メッシュで要素分割した。材料設定は、引張り試験で得られた応力-ひずみ線図を用いた。

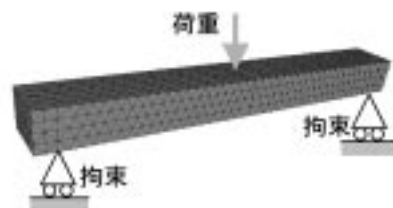


図5 三点曲げ試験の解析モデル

Fig. 5 Analysis model of bending test

解析結果の一例としてひずみの分布を図6に示す。中央部が最大ひずみとなっている。また、試験と解析の荷重-変位線図を比較すると図7に示すように解析結果は整合性が取れていることがわかる。

破断荷重を予測する判断基準に応力値を適用すると、塑性域では応力値の増減が小さいためわずかな解析誤差が生じただけでも判断を誤る恐れがある。そのため、ひずみを用いて破断荷重の判定を検討した。三点曲げの弾塑性解析で破断荷重を負荷したときの最大ひずみを調べ、HNM各材料において最大ひずみを整理しデータベース化した。この結果をナックルステアリングに適用し、破断荷重の予測精度を確認した。

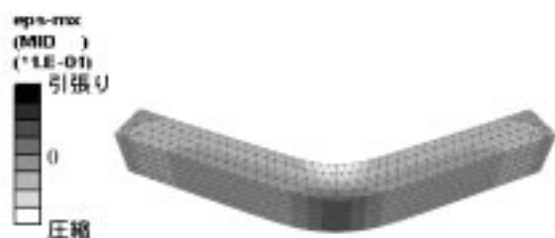


図6 解析結果の一例（ひずみ分布）

Fig. 6 An example of FEA result (strain contour)

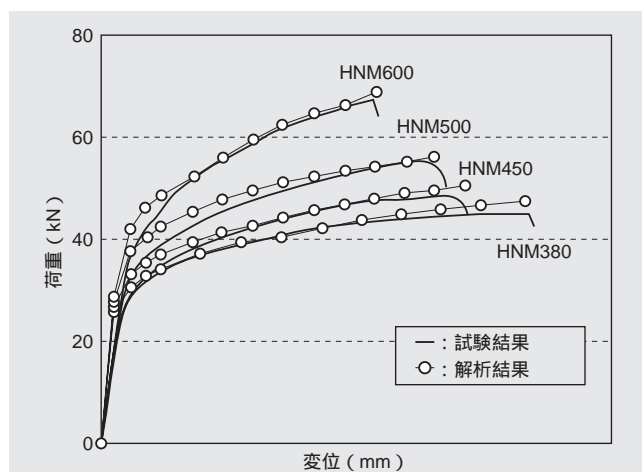


図7 三点曲げ試験結果（鋳肌品）

Fig. 7 Result of bending test

③ 足回り部品の弾塑性解析

3.1 弾性解析

ナックルステアリングにおいて、弾性解析による降伏荷重の予測精度を確認した結果を紹介する。解析モデルは図8に示すように、ステアリングアームに荷重を入力し（車両の内側から外側方向に負荷）、ベアリング挿入部を拘束した。解析結果を図9に示す。最大応力部位と台上試験での破断部位（図10）は良く一致しており、この最大応力部位が最初に降伏する部位であると考えられる。試作品はHNM450であり、実測硬度から0.2%耐力を求めた。この値を1.45倍した応力値を曲げ部位の降伏応力と推測した。この応力値を用いてFEAで降伏荷重を予測すると12.6kNとなる。台上試験での降伏荷重を次に示す。

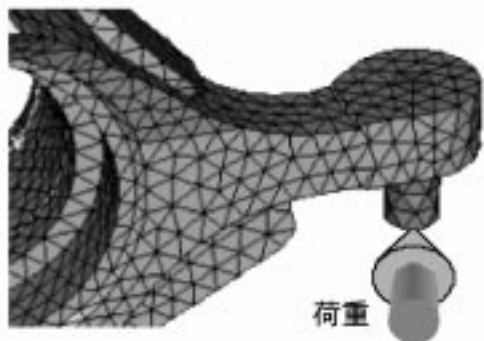


図8 ナックルステアリングの解析モデル

Fig. 8 Analysis model of knuckle steering

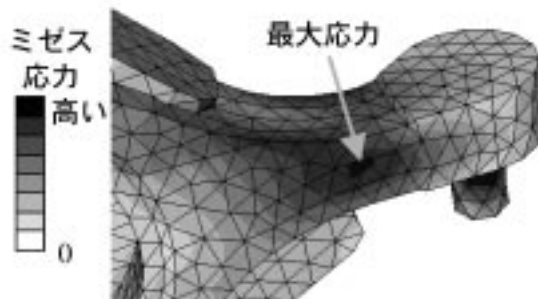


図9 解析結果（ミゼス応力分布）

Fig. 9 Analysis result (Mises stress contour)

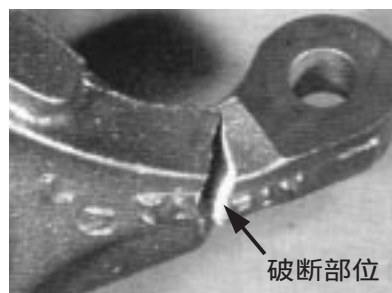


図10 破断部位

Fig. 10 Fracture point

台上試験での荷重-変位線図を図11に示す。この図から降伏荷重は13.0kNと読み取れ、解析では12.6kNの予測であり解析誤差は3%となる。この結果から三点曲げの降伏応力を用いることで、降伏荷重を精度良く予測できることが確認できた。現在、この解析技術を強度設計に活用しており、開発期間の短縮に効果を上げている。

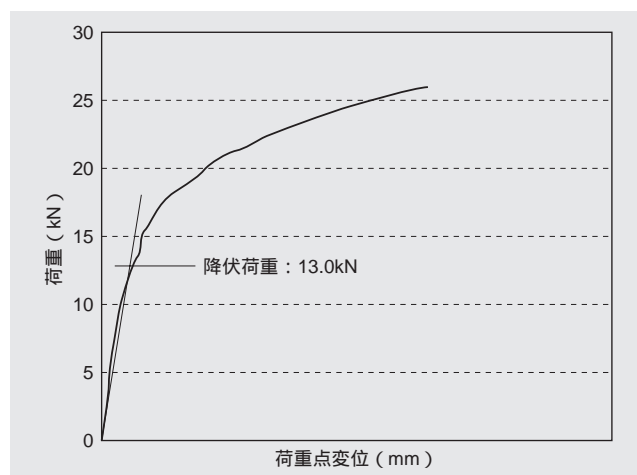


図11 台上試験での荷重-変位線図

Fig. 11 Load-Displacement of bench test

3.2 弾塑性解析

同じナックルステアリングにおいて、弾塑性解析による破断荷重の予測精度を確認した結果を紹介する。図9で示した解析モデルにおいて、材料設定は引張り試験で得られた応力-ひずみ線図を用いた。荷重の設定は、変形量が大きくなるに従い荷重が減少する場合があるため強制変位で入力した。解析結果のひずみ分布を図12に示す。最大ひずみ部位と図10に示した台上試験での破断部位は良く一致している。

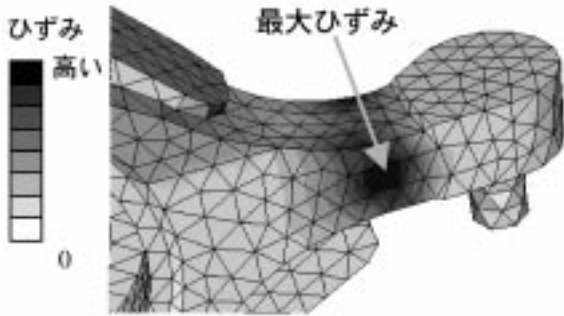


図 12 弾塑性解析結果（ひずみ分布）
Fig. 12 Result of nonlinear static analysis

また，台上試験と解析での荷重-変位線図を比較すると，図 13 に示すように両者の整合性は良いことがわかる。この試作品の材質はHNM450であり，実測硬度から三点曲げ試験の破断ひずみ（鋳肌）を硬度補正した値をナックルステアリングの曲げ部位の破断ひずみとして，破断荷重および最大変位を予測した。台上試験と比較した結果を表 2 に示す。破断荷重と最大変位の解析誤差は，それぞれ4.2%，4.9%であり，大変高い精度で予測できることが確認できた。

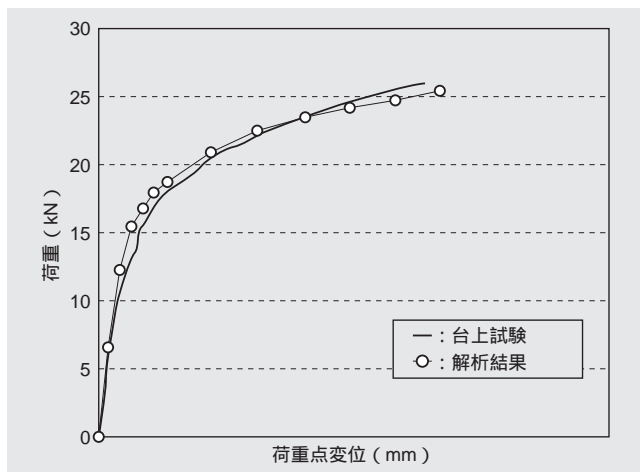


図 13 台上試験と解析での荷重-変位線図
Fig. 13 Load-Displacement of bench test and FEA

表 2 解析精度の確認

Table 2 Accuracy of nonlinear static analysis

	FEAでの予測値	台上試験結果	誤差
破断荷重	25.1kN	26.2kN	4.2%
最大変位	15.0mm	14.3mm	4.9%

④ 結 言

基礎的な引張り試験と三点曲げ試験を行い，FEA弾塑性解析で曲げ部位の破断ひずみを調査した。その結果をナックルステアリングに適用し，弾塑性解析を用いて破断荷重を精度良く予測できることを確認した。このことから，事前に破断荷重を予測した強度設計が可能になったと考えている。

参考文献

- 1) 中原：“材料力学（上巻）”，養賢堂（1987）。



中道義弘

Yoshihiro Nakamichi
日立金属株式会社 素材研究所



吉沢 亮

Akira Yoshizawa
日立金属株式会社 素材研究所



原 雅徳

Masanori Hara
日立金属株式会社 素材研究所