

ボイド損傷理論による引張り荷重を受けるボルトの延性破壊挙動の予測

地域振興整備公団 正会員 田嶋 靖夫 トピー工業株式会社 正会員 藤原 英之
名古屋工業大学 正会員 後藤 芳顕 名古屋工業大学 正会員 小畑 誠
名古屋工業大学 学生員 植木 雅雄

1. はじめに

鋼製橋脚とフーチングコンクリートとの接合部となるアンカー部の地震時終局挙動について、これまで実験、解析両面からの検討が行われてきた¹⁾。その中で、アンカー部の挙動にはアンカーボルトの力学特性が大きく影響することが解明された。アンカーボルトにはねじ加工が施されており、その力学挙動は通常の材料試験で用いられる平滑材とは異なる。耐震性能を考えた場合、アンカー部には強度はもとより十分な変形能力が要求され、合理的な設計手法の確立にはアンカーボルトの挙動の把握が不可欠である。

そこで本研究では、アンカーボルトの終局限界を捉え、性能向上に向けた基礎データを取得することを目的とし、ねじ加工された鋼材（以降、ねじ加工材）と平滑材の単調引張り載荷試験を行い、その力学挙動を比較する。同時に数値解析による破断までの挙動予測についての検討を行う。

2. 試験概要

供試体は図-1に示す、φ18mmの平滑材とM18ねじ加工材とする。ねじ加工はJIS-B-0205の並目ねじと細目ねじを設定する。鋼種はSS400、S35CN、S45CNの3種を各形状について用意する。また、ねじのらせんの影響を考察するため、S35CN材についてはM18ねじ形状を平行に加工した供試体（以降、溝加工材）も追加している。試験は室温で十分に静的な載荷速度で行い、標点変位-荷重データの収集および試験後の供試体破面観察を実施する。

3. ボイド理論に基づく有限要素解析

引張り荷重下の鋼材は、降伏して以降ひずみ硬化により荷重が上昇し、最大荷重到達後、ひずみの局所化が進み、荷重の低下とともに最終的な破断に至る。また、ひずみの局所化以降、微視的には鋼材に内存する介在物等を核とするボイドが成長、合体し、全体の軟化やき裂を引き起こす現象も多く報告されている。本研究では、基質材料の塑性硬化則に等方硬化則として式(1)を、またボイド損傷理論に基づく軟化モデルとして、式(2)のGursonのモデルを適用した有限要素解析を行う。

$$\sigma_{true} = h(\epsilon^p - \epsilon^y + \alpha)^n \quad (1)$$

$$\phi = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y} \right)^2 + 2f^* q_1 \cosh \left(\frac{\sum_{i=1}^3 \sigma_{ii}}{2\sigma_y} \right) - \left\{ 1 + (q_1 f^*)^2 \right\} = 0 \quad (2)$$

ここに、 σ_{true} ：真応力、 ϵ^p ：対数塑性ひずみ、 ϵ^y ：降伏棚の長さ、 σ_y ：基質材料の降伏応力、 σ_e ：ミゼスの相当応力、 f^* ：空隙の体積比率 f の関数、 q_1 ：空隙の相互作用を考慮するために導入

されたパラメータである。このうち、空隙の体積比率 f は式(3)のように式(4)に示す f_{nucl} ：空隙の発生率と、 f_{growth} ：既存空隙の成長率との和となり、式(4)に含まれる A を式(5)に示す正規分布関数で仮定する。

$$\dot{f} = \dot{f}_{nucl} + \dot{f}_{growth} \quad (3) \quad \dot{f}_{nucl} = A \left(\frac{EH}{E-H} \right) \epsilon^p + \frac{1}{3} B \sum_{i=1}^3 \dot{\sigma}_{ii} \quad (4)$$

$$A = \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{E} \right) \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_M^p - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

E ：ヤング率、 H ：基質材料の加工硬化係数、 A 、 B ：空隙発生に関する材料パラメータ、 f_N ：材料に初期に含まれる介在物の体積比率である。上式は空隙の発生率は、相当塑性ひずみが ϵ_N に等しいときに最大になり、またそのばらつきは S_N で与えられることを意味している。上式中、式(1)、(5)に含まれる h 、 n 、 ϵ_N 、 S_N が定数となり、平滑材の試験結果から逆解析により同定する²⁾。解析は供試体全体の1/4部分を軸対称でモデル化する。ねじ加工材の解析モデルの要素分割状況を図-2に示す。

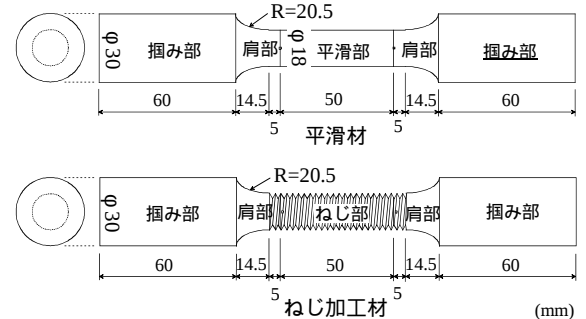


図-1 供試体寸法図

4. 破断形式と変形能の関係

試験および破面観察結果を表 - 1 に示す。また、図 - 3 は S35CN 材各形状の試験結果について、引張り荷重 P 、標点間の平均ひずみ ε を、降伏時の荷重 P_y と平均ひずみ ε_y で無次元化した荷重 - 変位関係を比較して示す。表 - 1、図 - 3 に示すように、

S35CN 材では並目ねじ加工により最大荷重/降伏荷重 (= 降伏比) が高くなり、破断時の伸びは 40% 程度低減する。細目ねじ加工材では降伏比に影響はないが、破断時の伸びは約 25% 低減する。S45CN 材では破断時の伸びについては S35CN 材と同程度になったが、降伏比については細目ねじ加工材が上回る結果となった。SS400 材ではねじ加工による降伏比への影響は見られず、破断時の伸びについて並目ねじ加工材で 30% 程

度の低減、細目ねじ加工材では約 10% の低減に留まる。一方、破断後の破面観察結果では、表 - 1 の分類に示すように、SS400 材ではねじ加工の有無を問わずディンプル破面を呈しているが、S35CN および S45CN 材ではねじ加工の影響により脆性的な劈開破面に移行することが確認された。また全ての鋼種において、平滑材の破面にはせん断縁 (シャリリップ) が現れており、破断は断面中心部の延性破壊が起点となったものと考えられるが、ねじ加工材ではねじ底にも早期に延性き裂が生じるため、せん断縁は現れない。

つぎに、解析結果として S35CN 並目ねじ加工材の荷重 - 標点間平均ひずみ関係を試験結果と比較して図 - 4 に示す。解析結果では降伏荷重が実験値より 5% 程度大きく算定されるが、試験での最大荷重付近までのひずみ硬化域ではよく一致する。ただし、試験結果の最大荷重を超えても解析結果における荷重は緩やかに上昇しており、最大荷重の出現および軟化が始まる平均ひずみ値は大きく相違する。これは、解析モデルでは前述したねじ底に早期に発生、進展する延性き裂を考慮していないことに起因するものと考えられる。平滑材は破断時、ねじ加工材は解析結果が概ね一致している最大荷重時についてボイド体積比率の分布を図 - 5 に示すが、平滑材が断面中心部で高いボイド体積比率を示すのに対して、ねじ加工材ではねじ底のボイド体積比率が卓越しており、現象的に試験結果と一致する。

参考文献

- 1) 後藤芳顕 他：鋼製橋脚定着部の終局挙動とそのモデル化に関する考察，構造工学論文集，vol.42A，pp.987-998，1996
- 2) 小畑 誠 他：大変位領域での材料構成則パラメータの同定方法について，構造工学論文集，vol.44A，pp.29-36，1998

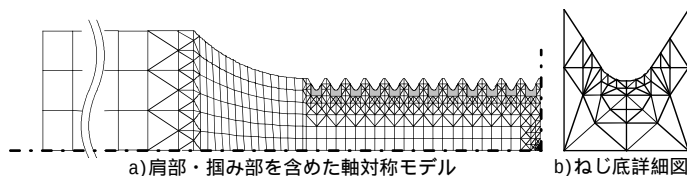


図 - 2 解析モデル図

表 - 1 破断形式と変形能

鋼種	形状	破断面の形態 (下図)	破断起点	降伏荷重 (kN)	最大荷重(kN) (降伏比)	破断伸び(%) (平滑材比)
SS400	平滑材	A	断面中心部	71.1	110.7 (1.56)	46.2
	並目ねじ加工材	A	ねじ底付近	54.5	84.8 (1.56)	31.2 (67.5%)
	細目ねじ加工材	A	断面中心部及びねじ底付近	61.2	95.9 (1.57)	40.0 (86.5%)
S35CN	平滑材	B	断面中心部	84.0	148.2 (1.77)	34.0
	並目ねじ加工材	C	ねじ底付近	59.6	108.4 (1.82)	20.7 (60.9%)
	細目ねじ加工材	C	ねじ底付近	71.3	124.8 (1.75)	26.0 (76.5%)
	溝加工材	C	ねじ底付近	61.1	108.0 (1.77)	21.8 (64.1%)
S45CN	平滑材	A	断面中心部	87.6	158.8 (1.81)	34.0
	並目ねじ加工材	C	ねじ底付近	64.6	117.0 (1.81)	19.9 (58.5%)
	細目ねじ加工材	C	ねじ底付近	71.0	132.0 (1.86)	26.3 (77.4%)

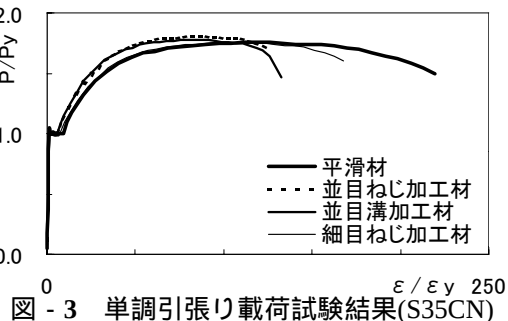
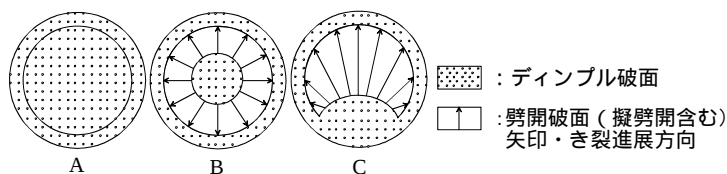


図 - 3 単調引張り載荷試験結果(S35CN)

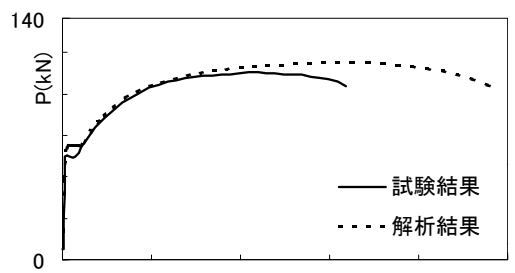


図 - 4 有限要素解析結果(S35CN 並目ねじ)

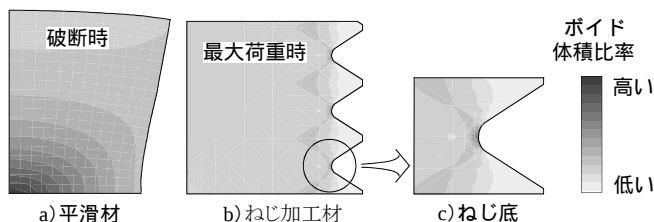


図 - 5 平滑材とねじ加工材のボイド体積比率の分布