

免震・制振デバイスの低温時性能評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 27

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西弘明、今野久志、岡田慎哉、表真也

【要旨】

近年、橋梁の耐震補強が急がれている中、当初設計における適用基準の古い橋梁においては、橋脚躯体の単純な補強に留まらず、免震・制震デバイスを用い、橋梁全体で耐震性能を確保するような設計を行う場合もある。しかしながら、これらのデバイスの寒冷地への適用性については検証されていないのが現状である。本研究では制震デバイスの一つである鋼材降伏系ダンパーに用いられている低降伏点鋼材の低温条件下における強度特性や靱性能を把握することを目的に、低温下におけるシャルピー衝撃試験や引張試験などを実施し、低温時性能や温度依存性について検討を行った。

キーワード：低降伏点鋼材、シャルピー衝撃試験、LY225、温度依存性、制震ダンパー

1. はじめに

昨今、東日本大震災を契機に、より一層、橋梁の耐震補強が急がれている。このような中で、当初設計における適用基準の古い橋梁においては、基準の耐震性能が低い、あるいは耐震性能の規定が無いなどにより、現状で保有する耐震性能が低く、耐震補強設計がままならないような場合も生じている。このような場合には、橋脚躯体の単純な補強に留まらず、免震・制震デバイスを用い、橋梁全体で耐震性能を確保するような設計を行う場合もある。

免震・制震デバイスは、橋梁等の土木構造物において耐震性能を向上させることを目的として各種開発されており、実構造物への適用も進んでいる。

このうち、制震ダンパーは地震による振動エネルギーを変位・変形により吸収するデバイスであり、オイル等の粘性体によりエネルギーを吸収するシリンダー系や、ゴムの減衰によるエネルギー吸収を期待するゴム系、鋼材の降伏によりエネルギー吸収を期待する鋼材降伏系など、様々な種類がある。これらの制震ダンパーについては、過年度に土木研究所により研究が実施されており、その特性は概ね把握されている。

前述のような補強設計においては、制震ダンパーの追加や現行部材のダンパーへの置き換えなどにより耐震性能を確保する場合が多く、特にアーチ橋やトラス橋において鋼材降伏系のダンパーが用いられる事例が多い。しかしながら、鋼材降伏系ダンパーに用いられている低降

伏点鋼材について、特に低温時特性に関する規定はなく、具体的な検討もなされていない。そのため、これらのデバイスの寒冷地への適用性については検証されていないのが現状であり、これについて検討することは急務である。

このような背景から、本検討では低降伏点鋼材に対して、基礎的検討として低温条件下における強度特性や靱性能などを把握することを目的に、シャルピー衝撃試験や引張試験、低サイクル疲労試験を実施し、その低温時性能や温度依存性などについて検討を行ったものである。

2. 鋼材降伏系ダンパー

鋼材降伏系ダンパーは、制震デバイスの一つである。これらのデバイスを構造系に導入することで、地震等により入力されたエネルギーを吸収させ、橋梁全体の地震時応答を抑制し、耐震性能を向上させるものである。そのエネルギー吸収は鋼材の塑性化により生じる。制震手法としてはパッシブ制震である。そのため、外部から電気等のエネルギー供給の必要はなく、山間部等の地理的条件に関わらず、用いやすいことも特長である。

写真-1 には、鋼材降伏系ダンパーの例を示す。鋼材降伏系ダンパーは、大きく軸降伏型と曲げ降伏型、せん断降伏型に分類される。軸降伏型は、軸方向、すなわち伸び・縮み方向の変形に対して鋼材を降伏させ、エネルギーの吸収を図るダンパーである。適用方法としては、橋梁の既存の斜材や対傾構、横構等の部材の置き換える場合や、効果的な箇所へ新規で追加する場合がある。



写真-1 鋼材降伏系ダンパーの例



写真-2 シャルピー衝撃試験装置

表-1 実験ケース一覧（シャルピー衝撃試験）

鋼種	ミル メーカー	板厚 (mm)	試験温度 (°C)	試験体数 (1温度当り)	合計
LY225	A	12	6 温度 (-60 ~40°C)	3	18
	B	25			18

表-2 LY225 の性能規定

降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
205~245	300~400	≤40

曲げ降伏型は、曲げにより鋼材を降伏させるダンパーである。せん断降伏型は、せん断方向、すなわち部材の直行方向の変形に対して鋼材を降伏させるダンパーである。橋梁の固定支承部に可動支承と組み合わせて機能分離型支承として使用する場合や、対傾構や横構の接続部であるガセットプレートを置き換えて使用する場合などがある。

これらの鋼材降伏系ダンパーが有効に機能するためには、主要部材よりも先に降伏することでダンパーにエネルギーを吸収させ、主要構造部の損傷を未然に防ぐ必要がある。そのため、降伏用の材料として、降伏点の低い低降伏点鋼材が用いられることが多い。低降伏点鋼材とは、添加元素を低減した純鉄に近い物であり、従来の軟鋼材と比較して引張強度や降伏点が低く、延性が高い鋼材である。

3. 低降伏点鋼材の低温じん性

本検討では、JIS Z2242²⁾に基づくシャルピー衝撃試験³⁾により、低降伏点鋼材の靱性能を検証することとした。

3.1 シャルピー衝撃試験の概要

写真-2には、本試験を実施した試験機を示す。

シャルピー衝撃試験は、切り欠きを挿入した角柱状の試験片（試験片：長さ L=55 mm、幅 W および厚さ D = 10 mm、試験片中央に深さ 2 mm の 45 度 V 字溝を設ける）に対し、任意の質量の錘を振り運動により衝突させ、試験片を破断させる試験である。この際、試験片

の破断に要したエネルギーから、じん性を簡便に評価するもの試験である。一般に、破断に要するエネルギーの大きいものほど、粘り強く高いじん性を有する。また、多くの金属材料は、そのエネルギーに温度依存性を有するため、試験は任意の温度で行う。

3.1.1 試験鋼材

表-1には実験ケースの一覧を、表-2にはLY225 鋼材の性能規定を示す。本検討では、鋼材降伏系の制震ダンパーに使用されている低降伏点鋼材を対象とし、低降伏点鋼の一つである LY225 について、ミルメーカーの異なる2種類に対してシャルピー衝撃試験を行い、その吸収エネルギー遷移温度および最低使用温度について検討を実施した。それぞれのミルメーカーを区分するため、試験片をミルメーカーごとに LY225-A、LY225-B と表記する。なお、同一の板厚での入手は困難であったため、LY225-A については 12 mm 厚、LY225-B については 25 mm 厚の鋼材を用いた。

3.1.2 試験片の温度管理

シャルピー衝撃試験は任意の6種類の温度で実施することとし、その各試験結果から遷移曲線を的確に評価できるように、各試験実施後、都度、試験温度を -60 ~ +40 °C の間で設定することとした。試験片の温度は、エタノール溶液と液体窒素および電熱ヒータを用いて管理している。なお、試験片は所定の温度に到達した後、5分間以上温度を維持することで定常状態とし、試験を行っている。

3.2 シャルピー衝撃試験結果

3.2.1 エネルギー吸収量および破断面状況

表-3 には、シャルピー衝撃試験による試験鋼材のエネルギー吸収量を、表-4 には各試験鋼材の破断面写真を一覧にして示す。

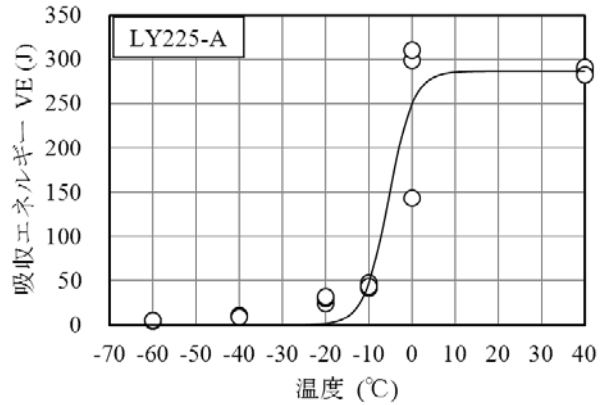
表から、LY225-A の場合には $-60 \sim -10$ °C までの比較的高温の温度域まで吸収エネルギーが小さく、かつほぼ全域に脆性破面が見られる。これと比較し、LY225-B の場合には $-60 \sim -50$ °C において吸収エネルギーの低下と脆性破面が見られるものの、より高温の場合には吸収エネルギーはほぼ一定となり、その破断面も延性破面となっている。このことから、LY225-A、LY225-B の低温時の試験結果には明瞭な差異があり、ミルメーカーの違いにより、その低温時特性に大きな違いがあることが分かる。

3.2.2 遷移温度曲線および吸収エネルギー遷移温度

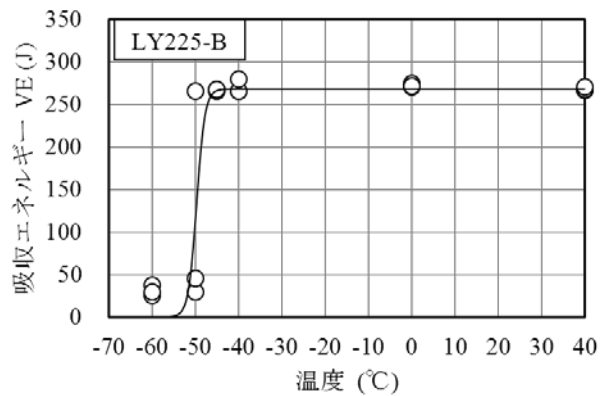
図-1 には、本試験結果から得られた低降伏点鋼の遷移温度曲線を示す。なお、遷移温度曲線は前述の表-3 の結果を基に、WES2805⁴⁾ から得た。遷移温度曲線の定

数に関しては、最小二乗法により残差が最小となるように設定した。

ここで、吸収エネルギー遷移温度とは延性破壊から脆性破壊に破壊形態が変わる変曲点温度であり、シャルピー衝撃試験から求められる温度である。本報では



(a) LY225-A



(b) LY225-B

図-1 遷移温度曲線

表-3 シャルピー衝撃試験による
エネルギー吸収量

		試験温度 (°C)							
		-60	-50	-45	-40	-20	-10	0	40
LY225-A	1	4	-	-	11	25	42	299	287
	2	5	-	-	10	30	48	310	291
	3	5	-	-	9	32	44	143	283
	平均	5	-	-	10	29	45	251	287
LY225-B	1	26	30	266	265	-	-	270	267
	2	38	46	268	266	-	-	275	268
	3	30	266	268	280	-	-	271	270
	平均	31	114	267	270	-	-	272	268

表-4 シャルピー衝撃試験による試験鋼材の破断面状況

		試験温度 (°C)							
		-60	-50	-45	-40	-20	-10	0	40
LY225-A	1	[Image]	-	-	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
	2	[Image]	-	-	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
	3	[Image]	-	-	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
LY225-B	1	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	-	-	[Image]	[Image]
	2	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	-	-	[Image]	[Image]
	3	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]	-	-	[Image]	[Image]

WES3003⁵⁾を基に、試験における吸収エネルギーがその最大値の50%となる温度を吸収エネルギー遷移温度とすることとした。

図から、LY225-Aの場合には約-5℃近傍で変曲し、約10℃で吸収エネルギーが一定となり、上部棚吸収エネルギー（以降、VEshelf）に漸近している。これに対し、LY225-Bの場合には約-50℃近傍で変曲し、約-40℃でVEshelfに漸近している。

ここで、実験結果からLY225-AのVEshelfは287.0J、LY225-BのVEshelfは268.3Jと算定される。さらに、WES2805から、吸収エネルギー遷移温度は、LY225-Aの場合には-5.4℃、LY225-Bの場合には、-49.7℃と算定される。なお、これらの結果は鋼材の板厚にも影響を受ける。対象の鋼材は板厚の異なる鋼板から切り出しているため、直接の比較はできないものの、一般的には板厚が厚いものほどこれらの温度が高温側に評価される。そのため、本検討の結果については両者の差異はより大きくなるものと推察される。

これらのことから、同じLY225鋼材においても、ミルメーカーにより遷移温度曲線および吸収エネルギー遷移温度は大きく異なることが明らかとなった。

3.2.3 低降伏点鋼材の最低使用温度

表-5には、前項までの結果を基に、WES3003の母材の要求遷移温度式を準用し、各鋼材の最低使用温度を算出した結果を示す。なお、用いた式は以下のものである。

$$vTE = T + 166.3 - 0.13\sigma_{y0} - 6\sqrt{t} - \frac{17976}{\sigma_{y0}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{y0}} + 0.6 \right) \quad (1)$$

ここで、

vTE : エネルギー遷移温度 (℃)

T : 最低使用温度 (℃)

t : 板厚 (mm)

σ_{y0} : 鋼材の降伏点または耐力の保障値 (N/mm²)

σ : 使用応力度 (N/mm²)

なお、WES3003では、 σ_{y0} の値によって2つの式を使い分けるように規定されている。本検討においては、対象鋼材は同一種であるため、 σ_{y0} は同一として評価した。そのため、本文中には使用した式のみを掲載する。なお、本検討においては、 σ_{y0} および σ はどちらも205 N/mm²として評価している。

表から、最低使用温度はLY225-Aでは+16.1℃、LY225-Bでは-19.1℃と評価される。このことから、ミルメーカーの違いにより、その最低使用温度においても

表-5 最低使用温度の算出結果

鋼種	エネルギー遷移温度	最低使用温度
LY225-A	-5.4℃	+16.1℃
LY225-B	-49.7℃	-19.1℃

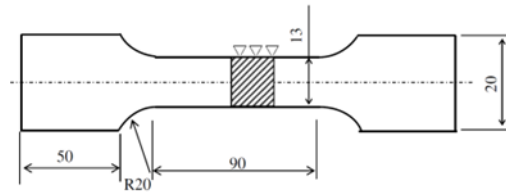


図-2 引張試験体の寸法

大きな差異があることが明らかとなった。

低降伏点鋼という特殊な鋼材に対してのWES3003の適用性については、未だ検討の余地はあるものの、本検討の結果から同鋼材の低温じん性能は低いと判断される。そのため、寒冷地で使用する場合には、使用する部位などに十分な検討が必要である。

4. 強度特性に関する温度依存性

本検討では、低降伏点鋼材の強度特性に関する温度依存性を確認するため、所定の温度条件下で引張試験を行い、その降伏点、引張強さなどの温度依存性の検討を行った。試験は、シャルピー衝撃試験により低温環境への適用性の低いLY225-Aを対象として行った。

4.1 引張試験概要

図-2には試験体の形状を示す。試験体の形状は14B号とし、引張試験片を圧延方向に採取した。試験は試験片が破断するまで行う。変位作用速度は5 mm/minとし、試験温度は4種類の温度(-30, -20, +24, +40℃)とした。

4.2 引張試験結果

図-3には、各種温度での引張試験の結果を写真-4には引張試験後の試験片を示す。図中、黒の実線で降伏点、赤の実線で引張強さの温度依存性を示している。また、LY225の降伏点、引張強さの性能規定値を同じ色の網掛けで併せて示す。

図から、本実験の温度範囲では降伏点、引張強さ共に温度と直線的な関係が見られ、温度が1度低下すると、降伏点・引張強さともに0.6~0.7 N/mm²程度増加する傾向が見られる。LY225の性能規定では、引張強さの規定は300~400 N/mm²、降伏点の規定は205~245 N/mm²

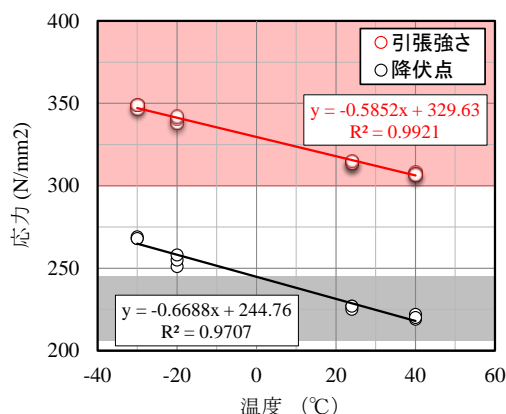


図-3 引張試験結果



写真-4 試験後の試験片

となっており、試験結果から LY225-A は概ね0°C以下の場合に、降伏点が規定を超過することが分かる。

このことから、寒冷地において低降伏点鋼を用いた制震デバイスを使用する場合には、架橋地点における使用温度と、使用鋼材の低温時特性に配慮し、設計にあたっては十分な検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、鋼材降伏系の制震ダンパーに用いられる低降伏点鋼材に対して、低温下における試験によりじん性能、降伏点などの低温時特性について検討を行った。まとめると以下のとおりである。

- (1) 低降伏点鋼材 (LY225) は、ミルメーカーによって低温じん性能が異なり、特に低温じん性能が低いものもある。
- (2) WES3003 を適用して算出した最低使用温度は、ミルメーカーによって +16.1 °C、-19.1 °Cと大きく異なる。
- (3) 一般鋼材と同様に降伏点の温度依存性が存在し、温度により LY225 鋼材の性能規定の範囲を超えるものがある。

以上のことから、寒冷地において耐震補強設計時に鋼材降伏型のダンパーを用いる場合には、そのデバイスに用いられる低降伏点鋼材の使用温度に応じた性能を十分に検討する必要があると判断される。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センターほか、橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証法及び設計法に関する共同研究報告書, 2012.3
- 2) 日本工業規格, Z2242 金属材料のシャルピー衝撃試験方法, 2005
- 3) J.Hodgson and G. M. Boyd : Brittle Fracture in Welded Ships, The Institution of Naval Architects, Quarterly Transactions, 100-3, pp.141-180, 1958.6
- 4) 社団法人日本溶接協会, WES2805 溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法, 2011
- 5) 社団法人日本溶接協会, WES3003 低温用圧延鋼判定基準, 1995

STUDY ON THE TOUGHNESS OF WEATHER RESISTANT STEEL PLATE AT LOW TEMPERATURES

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2013

Research Team : Structures Research Team and

Cold Region Technology Promotion Division

Author : NISHI Hiroaki

KONNO Hisashi

OKADA Shinya

OMOTE Shinya

Abstract : In recent years, seismic retrofitting of the bridge is an urgent need, in the old bridge applicable criteria in the initial design, to go beyond a simple reinforcement of the piers precursor, using the seismic isolation, vibration control device out of necessity, seismic performance in the entire bridge in some cases to perform such a design to ensure. Is the current situation has not yet been validated for applicability to the cold climates of these devices, understand the toughness performance and strength characteristics at low temperature under conditions of low yield point steel which is used in steel surrender system damper in this study the object to be, were tested and tensile test and Charpy impact test at low temperatures, it is considered to temperature dependency and low temperature performance.

Key words : Low yield point steel, Charpy impact test, LY225, temperature dependence, vibration control damper