

道路橋に用いられる低降伏点鋼材の 低温時特性について

寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 寒地構造チーム ○表 真也
寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 寒地構造チーム 岡田慎哉
寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 寒地構造チーム 西 弘明

近年、当初設計の適用基準の古い橋梁においては耐震性能が低く、耐震補強設計がままならないような場合が生じている。このような場合、制震ダンパーの追加や既設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事例が多く、特に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、鋼材降伏系のダンパーについては、低温時性能の性能検証がなされておらず、寒冷地への適用性について検討が行われていないのが現状である。このため本報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各種試験を行い、鋼材の温度依存性などを確認したので報告する。

キーワード：道路橋、低降伏点鋼材、寒冷地、靱性、シャルピー衝撃試験

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、当初設計の適用基準の古い橋梁においては、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。このような場合においては橋脚躯体の単純な補強に留まらず、やむを得ず免震・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の基本性能については、過年度に土木研究所により研究が実施¹⁾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、特に鋼材降伏系のダンパーが用いられる事例も多い。

しかしながら、鋼材降伏系のダンパーの低温時性能については性能検証がなされておらず、寒冷

地への適用性について検討が行われていないのが現状である。そのため、鋼材降伏系の制震ダンパーの寒冷地への適用性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、基礎的検討として低温条件下における靱性を把握することを目的にシャルピー試験や引張試験を実施し、温度依存性などについて確認を行ったので報告する。

2. 低降伏点鋼材の低温じん性

本検討では JISZ2242²⁾に基づきシャルピー衝撃試験 (Charpy impact test)³⁾により低降伏点鋼材の靱性を検証した。シャルピー衝撃試験は、破壊に要した試験片の吸収エネルギーから靱性を簡便に評価するものである。写真-1 には試験を実施した試験機を示す。

なお、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 $L = 55 \text{ mm}$ 、幅 = 厚さ = 10 mm 、中央に深さ 2 mm の 45° V 字溝) を設置し、切り欠きのある部分の反対側に振子を衝突させ、試験片を破壊し、破断に要したエネルギーを求める試験である。吸収エネルギーの大きいものほど、粘り強く高い靱性を有することが知られている。また、多くの金属材料の吸収エネルギーは、試験温度によって変化するため、試

験は指定された温度で行う。この際に、試験温度が室温と異なる場合には、試験片を加熱または冷却して行うこととされている。

(1) 試験鋼材

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とし、低温下におけるじん性能について検討する。

ミルメーカーの異なる 2 種類の低降伏点鋼 (LY225) につい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を確認することとした。表-1 には実験ケースの一覧を示す。

本検討で試験を行った低降伏点鋼 (LY225) 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強度が低く、延性が高い鋼材である。表-2 には鋼材の性能規定を示す。

このような特性を有することから、主要部材よりも先に降伏することで特定の部位に地震エネルギーを吸収させ、主要構造部の損傷を未然に防ぐダンパーとしての目的で用いられている。

(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 -60 ~ +40 °C の間で遷移曲線を的確に評価できるように都度、試験温度を設定することとした。試験片の温度管理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調整を行った。なお、試験片は設定した温度に到達した後、5 分間以上温度を維持し、定常状態として試験を行っている。

(3) シャルピー衝撃試験結果

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。

表より、LY225-A の場合には -60 ~ -10 °C までの温度域において吸収エネルギーが小さく、かつほぼ全域に脆性破面が確認できる。これと比較し、LY225-B の場合には -60 ~ -50 °C において吸収エネルギーの低下と脆性破面が確認できるが、これより温度が上がると吸収エネルギーはほぼ安定し、その破断面も延性破面となっている。これより、2 種の鋼材において、その低温時特性に大きな違いがあることが明らかとなった。

(4) 遷移温度曲線および吸収エネルギー遷移温度

図-1 には、本試験結果より得られた低降伏点鋼の遷移温度曲線を示す。なお、遷移温度曲線は表-3 の結果を基に、WES2805 より得た。

ここで遷移温度とは、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、シャルピー衝撃試験から求められる温度であり、この温度よりも高温側では脆性破壊しないことを示している。本



写真-1 シャルピー衝撃試験機

表-1 実験ケース一覧

鋼種	ミルメーカー	試験温度 (°C)	試験体数 (1 温度当たり)	合計
LY225	A	6 温度 (-60 ~ 40°C)	3	18
	B			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

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

(単位: J)

報では WES3003⁴⁾ を基に遷移温度は吸収エネルギーの最大値の 50% となる温度とした。図より、LY225-A の場合にはその変曲点が高い温度域まで広く分布しているのに対し、LY225-B では -50 °C 近傍で変曲し、それよりも高温では一様となっていることが分かる。

さらに、図より吸収エネルギー遷移温度を読み取ると、LY225-A の場合には、 vE_{shelf} (上部棚吸収エネルギー) は 287.0 J であり、そのエネルギー遷移温度は +1.0 °C と判断される。これに対し、LY225-B の場合には、 vE_{shelf} は 268.3 J であり、そのエネルギー遷移温度は -49.6 °C と判断される。

これらのことから、両者を比較すると、遷移曲線が異なり、これに伴い吸収エネルギー遷移温度も大幅に異なることが明らかとなった。

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		-	-					
		-	-					
		-	-					
LY225-B					-	-		
					-	-		
					-	-		

(5) 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、WES3003⁴⁾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。

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

$$: \sigma_{y0} \leq 390 \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

$$vT_E = T + 166.3 - 0.13\sigma_{y0} - 6\sqrt{t} - 0.45\sigma_{y0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{y0}} + 0.6 \right) \exp\left(-\frac{\sigma_{y0}}{294}\right)$$

$$: \sigma_{y0} > 390 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

ここで、

vT_E : エネルギー遷移温度 (°C)

T : 最低使用温度 (°C)

t : 板厚(mm)

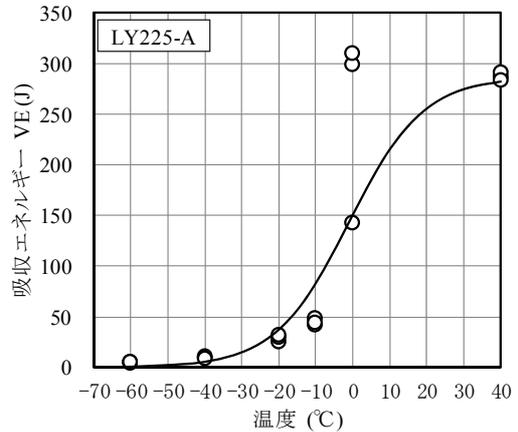
σ_{y0} : 鋼材の降伏点または耐力の保障値 (N/mm²)

σ : 使用応力度 (N/mm²)

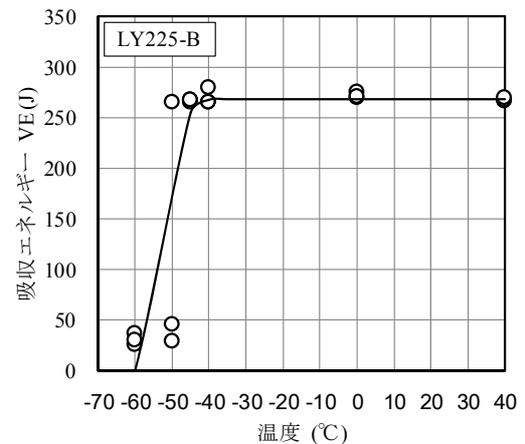
表より、最低使用温度は LY225-A は +22.4 °C、LY225-B では -18.9 °C と評価される。

これより、同じ LY225 の鋼材であるにも関わらず、ミルメーカーの違いにより、その最低使用温度には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、同鋼材の低温環境への適用性は低いと判断せざるを得ず、寒冷地での使用については十分に検討・確認する必要があると言える。



(a) LY225-A



(b) LY225-B

図-1 遷移温度曲線

3. 降伏に関する温度依存性

本検討では、さらに低降伏点鋼材の降伏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、引張強さなどの低温時特性を確認した。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。

(1) 試験概要

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。試験は鋼材に引張荷重を与え試験片が破断するまで実験を行う。その際の変位作用速度は 5mm/min とし、試験温度は 4 種類の温度 (-30, -20, +24, +40 °C) とした。

(2) 引張試験結果

図-2 には、各種温度での引張試験の結果を示す。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。

図より、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 1N/mm² 増加する傾向が見られる。LY225 の性能規定によると、引張強さの規定は 300 ~ 400 N/mm²、降伏点の規定は 205 ~ 245 N/mm² となっており、試験結果より LY225-A は概ね 0 °C 以下の条件において、降伏点が規定を超過することが分かる。

これより、寒冷地において低降伏点鋼を使用する場合には、鋼材の低温時特性およびその使用温度等に配慮し、設計にあたっては十分な検討が必要である。

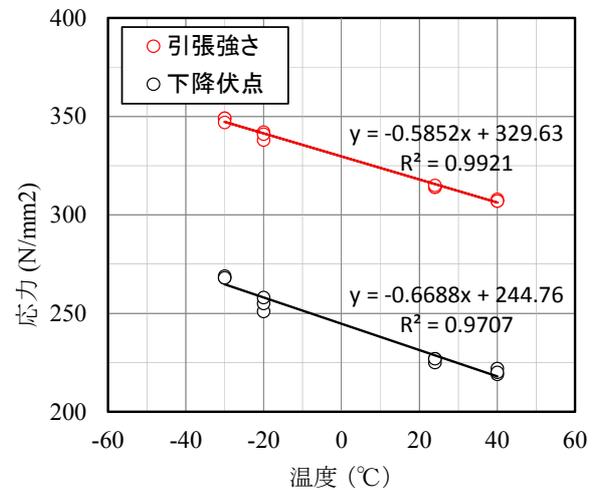
4. まとめ

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基礎的なデータを得る目的で試験を行い温度依存性や、WES3003 を準用して最低使用温度を算出した。まとめると以下のようなものである。

- (1) 低降伏点鋼材はミルメーカーによって遷移温度および使用温度に大きな差異があることが明らかとなった。
- (2) 低降伏点鋼は WES3003 を準用しエネルギー遷移温度から最低使用温度を算出した結果、LY225-A では +22.4 °C 以上、LY225-B では -18.9 °C 以上となった。
- (3) LY225-A では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ことが明らかとなった。

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	+1.0 °C	+22.4 °C 以上
LY225-B	-49.6 °C	-18.9 °C 以上



LY225-A

図-2 引張試験結果

以上から、寒冷地において低降伏点鋼を使用する場合には、その要求性能に対して鋼材の性能を十分に検討する必要があると判断される。

今後の課題

本検討では低降伏点鋼材の低温時性能の検討に WES3003 を準用して最低使用温度を算出したが、低降伏点鋼への WES3003 の適用性については、検討する必要があると考えられる。また低温環境下における低降伏点鋼材の低温時性能を検討するには、CTOD 試験 (き裂先端開口変位) や CT 試験 (K 値) 等を実施し、幅広くデータを蓄積する必要もある。

今後は本鋼材の使用実態を考慮し、地震動を想定した低サイクル疲労試験などによる低温時特性の検討を実施してゆく所存である。

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, WES3003 低温用圧延鋼判定基準, 1995