HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	鋼道路橋における経年鋼材の使用安全性評価に関する研究
Author(s)	松縄, 秀範
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11457号
Issue Date	2014-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11457
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55549
Type	doctoral thesis
File Information	Matsunawa_Hidenori.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

鋼道路橋における経年鋼材の
使用安全性評価に関する研究

（Evaluation for Usability and Safety of Overage Steel Plates in Highway Bridges）

松縄　秀範

平成 26 年 3 月

目　次

第 1 章　序論 ---------- **1**
1.1　研究の背景 ---------- 1
1.2　既往の研究 ---------- 2
1.3　研究の目的 ---------- 3
1.4　論文の構成 ---------- 4
参考文献（第 1 章） ---------- 7

第 2 章　低温下における鋼材の靭性指標 ---------- **9**
2.1　概説 ---------- 9
2.2　鋼材の靭性評価に関する文献 ---------- 10
2.2.1　英国船級協会ロイドが提示した鋼材の靭性評価基準値 ---------- 10
2.2.2　JIS 規格における靭性要求値と変遷 ---------- 12
2.2.3　日本溶接協会規格（WES） ---------- 14
2.3　北海道の鋼道路橋における鋼種選定 ---------- 14
2.4　本章のまとめ ---------- 16
参考文献（第 2 章） ---------- 16

第 3 章　経年鋼材を用いた低温下における材料特性試験 ---------- **17**
3.1　概説 ---------- 17
3.2　供試鋼材の採取 ---------- 18
3.3　化学組成および機械的性質 ---------- 21
3.4　シャルピー衝撃試験 ---------- 23
3.4.1　シャルピー吸収エネルギーの遷移曲線 ---------- 23
3.4.2　試験片の厚さがシャルピー衝撃試験結果に及ぼす影響 ---------- 26
3.5　3 点曲げ CTOD 試験 ---------- 27
3.5.1　CTOD 試験の手順および結果 ---------- 27
3.5.2　厚さの異なるシャルピー試験片による遷移温度の交換の妥当性 ---------- 32
3.5.3　3 点曲げ CTOD 試験結果の考察 ---------- 34
3.6　経年鋼材に対する脆性破壊発生有無の評価・判定法の提案 ---------- 35
3.7　本章のまとめ ---------- 37
参考文献（第 3 章） ---------- 38

第 4 章　経年鋼材の使用安全性に関する評価 ---------- **39**
4.1　概説 ---------- 39
4.2　JIS における低温下での使用条件の検証 ---------- 40

4.3　経年鋼材の相対的な靭性評価 ---------- 43
4.3.1　供試体の試験年度 ---------- 43
4.3.2　エネルギー遷移温度と最低使用温度の関係 ---------- 44
4.3.3　JIS の要求試験温度における吸収エネルギーとの関係 ---------- 46
4.3.4　化学成分による遷移温度への影響 ---------- 48
4.4　本章のまとめ ---------- 53
参考文献（第 4 章） ---------- 54

第 5 章　少数主桁に用いる厚鋼板の低温下における材料特性試験 ---------- 55
5.1　概説 ---------- 55
5.2　厚鋼板を用いた実験計画 ---------- 56
5.2.1　実験対象 ---------- 56
5.2.2　供試体 ---------- 57
5.2.3　実験ケース ---------- 58
5.2.4　溶接条件 ---------- 60
5.3　シャルピー衝撃試験結果 ---------- 63
5.4　厚鋼板の適用評価法に関する提案 ---------- 67
5.4.1　WES3003 鋼種判定基準の準用 ---------- 67
5.4.2　厚鋼板の低温下での靭性評価法 ---------- 68
5.5　厚鋼板の鋼種選定における一提案 ---------- 72
5.6　本章のまとめ ---------- 74
参考文献（第 5 章） ---------- 75

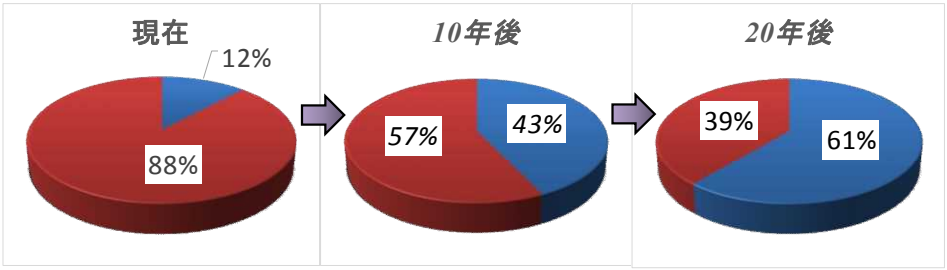
第 6 章　鋼道路橋における点検手法の一提案 ---------- 77
6.1　概説 ---------- 77
6.2　経年橋梁における点検手法の提案 ---------- 78
6.2.1　外観調査（案） ---------- 78
6.2.2　材料試験（案） ---------- 78
6.3　経年鋼材の材料特性の傾向 ---------- 81
6.4　ハザードマップの作成 ---------- 82
6.5　本章のまとめ ---------- 85
参考文献（第 6 章） ---------- 85
第 7 章　結論 ---------- 87
7.1　研究成果のまとめ ---------- 87
7.2　課題と今後の展望 ---------- 90
参考文献（第 7 章） ---------- 92
謝辞 ---------- 93

第1章　序論

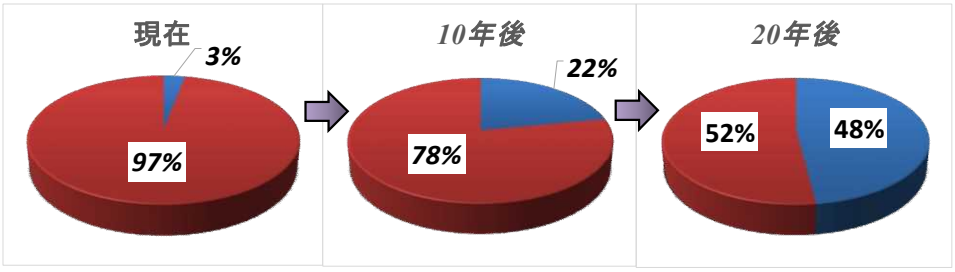
1.1　研究の背景

近年，鋼道路橋の経年橋梁では，損傷や機能の低下が数多く報告されており，補修補強によりこれらを適切に維持管理していくことの重要性が高まっている．現在の厳しい財政状況の下で，これらの膨大な道路資産を長期にわたり良好に維持していくことは社会的にも重要な課題となっている．道路橋の予防保全などの取組みによる管理費の抑制に努めつつ，新規に整備される道路橋については，設計や施工の段階から，定期点検や緊急調査，補修補強工事などの維持管理が確実かつ容易にでき，期待される耐久性が確実に発揮できる良質な資産が形成されることが求められている．

経年橋梁は，その多くが高度経済成長期に建設され，今後，急速に高齢化が進むことから，優先的な維持管理計画が今後の重要課題 [1.1),1.2)]となっている．北海道の橋梁を例にとると，道内の全橋梁数は約 28,000 橋あり，そのうち国道が約 3,700 橋，道道では約 5,100 橋，市町村道に至っては約 19,000 橋が管理対象とされている．このうち，鋼橋は国道・道道とも約 45%（約 4,000 橋），市町村道では約 28%（約 5,100 橋）が相当する．鋼橋に着目した，国道・道道の橋齢の推移を図 1.1 に示す．建設後 50 年以上経過する橋梁数は，10 年後，20 年後と急速に高齢化が進むことがわかる．



(a) 道内の国道の橋梁 [1.1)]



(b) 北海道道の橋梁 [1.2)]

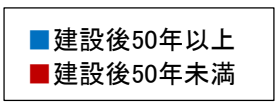


図 1.1　北海道の国道・道道橋の橋齢推移

平成 24 年度に改定された道路橋示方書[1.3)]（以降，道示と略する）では，前述のような状況も踏まえ，維持管理が困難となる箇所や部位，構造を避けることが求められた．また，関連して，必要な維持管理設備や橋本体と同等な耐久性の確保が困難な部材の更新方法などについても，設計において反映するよう規定が設けられた．鋼橋においては，疲労設計の章が新設され，溶接継手の疲労強度や鋼製橋脚隅角部の疲労損傷防止の観点から，隅角部の施工品質の確保を徹底するなど，溶接施工の規定が強化された．また，厚板鋼板の適用事例の増加により，高力ボルト摩擦接合の許容力を低減することで，最大 12 列まで許容範囲が拡大されるなど，時代を見据えて変化を遂げている．

鋼橋の脆性破壊につながる被災事例に着目すると，地震時の衝撃や疲労により，鋼材や溶接継手の靭性劣化部を起点とする脆性的な破壊形態の発生が見られる．これらの破壊形態は，そのほとんどが瞬時に亀裂発生を呈して崩壊に至る．特に北海道などの寒冷な気候の下では，鋼材の衝撃吸収エネルギーが著しく低下する傾向が知られており，低温下における脆性破壊の防止が重要といえる．北海道ではこれまで，低温下における板厚 40mm 以下の構造用鋼材を対象とした適用判定試験の研究成果[1.4)]を基に，道示の鋼種選定よりも厳しい独自の鋼種選定[1.5)]を整備してきた．しかし，これ以前に建設された経年橋梁の中には，衝撃特性の著しく劣る鋼材もあり，適切な維持管理を行うために，これらの材料特性を把握することが極めて重要である．

また，近年の橋梁では，少数主桁などの合理化桁が多く開発され，主要部材の厚板化が進んでいる．しかしながら，板厚 40mm を超える厚鋼板や溶接継手部を対象とした靭性に関する研究や文献は少なく，低温下における鋼材および溶接継手部の性能評価が課題となっている．

本論文では，以降，長期間供用された橋梁を経年橋梁，同鋼材を経年鋼材と称する．

1.2 既往の研究

旧北海道開発局土木試験所では，1960 年以降 25 年間に渡り，板厚 40mm 以下の構造用鋼材を対象として寒冷地における適用可否判定調査を実施[1.4)']してきた．この研究は，鋼道路橋で唯一，低温下における鋼材の靭性を継続的に評価した研究で，現在の北海道の鋼種選定の基になっている．研究では約 130 種類の供試体に対して，母材と溶接部（溶接金属部，熱影響部，ボンド部）を対象としてシャルピー衝撃試験を行い，低温下における適用可否の判定を行っている．試験結果の判定基準は，室温における 3 個の試験片の延性破面率がいずれも 100%の下で，規定温度における吸収エネルギーの平均は，最高吸収エネルギーの 50%以上とし，規定温度における吸収エネルギーは，前後の試験温度より直線補完で求める簡易な方法としている．また，北海道の最低使用温度-40℃を試験温度とした際の吸収エネルギーは，JIS の吸収エネルギー要求値（$vE_{(-40℃)}$≧27J,47J）を満たすことも判定基準としている．

試験の結果は，年代が古いものほど吸収エネルギー値は低く，ばらつきが大きく，特に昭和 40 年代前半の試験では，0℃で 27J を下回る吸収エネルギーの低い材料が存在した．古い時代は判定基準を満たさない材料も見られるが，昭和 40 年代後半以降は，安定した結果が得られている．また，溶接部については，さらに WES2805[1.6)]を適用し，設定した溶接欠陥が脆性破壊せずに許容されるか否かの判定を試み，試験の結果は，許容された欠陥と許容されない欠陥の両者が混在している．試験結果で判定基準を満たさない供試体が相当数あり，WES 規格を適用した場合の溶接部の適用可否の判定は，不明瞭な結果となっている．

1.3 研究の目的

低温下では衝撃吸収エネルギーが著しく低下することが知られており，過大荷重が付与されると脆性破壊の危険性は高くなる．このため，寒冷な地域に建設された鋼道路橋を安全に維持管理するためには，脆性破壊発生防止の観点から，使用安全性に対する評価の確立が急務である．

既往研究[1.4)']においては，脆性破壊に対する評価・判定基準が不明瞭であること，さらに，当時の試験結果は判定基準を満たさない供試体が相当数あり，適用可否の判定基準が曖昧であるなどの課題がある．維持管理において適切な補修･補強を行うためにも，経年鋼材の材料特性を把握する必要がある．このためには，経年鋼材の材料特性や衝撃特性などの基礎データの分析が不可欠である．一方，脆性破壊は初期欠陥が生じやすい溶接部が起点となることが多く，特に，厚鋼板溶接部のように，多層盛溶接においては入熱による更なる脆化や靭性低下が懸念されるため，低温下での適用性を把握することが重要である．しかしながら，これらを対象とした研究成果や文献は少なく，低温下での適用評価法が課題である．

これらの課題から，鋼道路橋における使用安全性の評価を研究の目的とした．

1.4 論文の構成

近年，鋼道路橋の経年橋梁では，損傷や機能の低下が数多く報告されており，補修補強によりこれらを適切に維持管理していくことの重要性が高まっている．鋼道路橋における既往の被災履歴では，地震時の衝撃や疲労により，鋼材や溶接継手の靭性劣化部を起点とする脆性的な破壊形態の発生が見られる．これらの破壊形態は，継続的観察により発見できるケースは稀で，そのほとんどが瞬時に亀裂発生を呈して崩壊に至る．特に北海道などの寒冷な気候の下では，鋼材の衝撃吸収エネルギーが著しく低下する傾向が知られており，低温下における脆性破壊の防止が重要である．

北海道ではこれまで，低温下における板厚 40mm 以下の鋼材の使用判定試験を実施した既往の文献を基に，道示の鋼種選定よりも厳しい独自の鋼種選定を整備して橋梁を建設してきた．しかし今後，建設後 50 年を越える橋梁が急増する中，計画的な維持管理に向けて，長期間供用された橋梁（以降，経年橋梁と称する）に使用される鋼材（以降，経年鋼材と称する）の継続使用の可否判定など，更なる検討が不可欠である．一方，近年の橋梁では，少数主桁などの合理化桁が多く開発され，厚板化が進んでいる．しかしながら，板厚 40mm を超える厚鋼板や溶接継手部を対象とした靭性に関する研究や文献は少なく，低温下における鋼材の性能評価が課題となっている．

これらの背景から，本研究では寒冷地において，鋼道路橋の安全な維持管理を目指し，経年鋼材の使用安全性の評価方法を提案することを目的として研究を行った．研究では，基礎実験として，経年鋼材と現在の厚鋼板を供試体として，材料試験，衝撃試験および一部の経年鋼材を対象にCTOD試験を実施した．試験の結果は，鋼材の遷移温度に着目して衝撃特性を評価することで，低温下における鋼材の使用可否判定が可能となることを示した．また，経年鋼材の材料特性から維持管理における留意点について考察し，寒冷地における鋼橋の点検手法の一提案を示した．

本研究は全7 章で構成し概要は以下のとおりである．各章の関連を図1.2に示す．

第 1 章では，低温下における鋼材の靭性評価手法に関する既往研究をレビューし，本研究の位置づけを行った．北海道では，既往の研究を基に鋼橋建設時の鋼種選定が整備されている．しかし，既往研究では，北海道の最低使用温度-40℃で JIS の靭性要求値（$vE_{(-40℃)}$≧47J など）を指標とするなど，脆性破壊に対する評価が不明瞭であること，試験結果が判定基準を満たさない供試体が相当数あり，適用可否の判定基準が不明瞭であるなど，課題について説明し，本研究の目的を述べている．

第 2 章では，鋼道路橋の主要部材に用いる鋼材に対して，JIS で要求される吸収エネルギーについて，設定の背景や基準の変遷について触れた．ここで要求される吸収エネルギーは，JIS 制定当時の諸外国の規格を準用したもので，制定後 50 年余り経過した現在においても当時の規格値が踏襲されていることを当時の諸外国の文献から紹介するとともに，日本溶接協会規格（WES）の鋼道路橋への適用について考察した．

第 3 章では，経年鋼材の脆性破壊発生有無の判定を目的として，北海道各地から採取

した経年鋼材を供試体として，化学組成，機械的性質，シャルピー衝撃試験および CTOD 試験を実施した結果について述べた．実験の結果，製鋼技術が未発達な時代の鋼材は，組成成分が劣悪なものもあり，著しく衝撃特性が劣る材料も見られた．試験結果は，WES 規格を準用して，エネルギー遷移温度から低温下での使用限界温度を求め，架橋地域の最低使用温度と比較することで，低温下での適用可否の判定が可能となることを示した．また，経年橋梁の主要部材の鋼材は薄板が多く，補修・補強などで衝撃試験を行う際，供試体厚が 10mm 以下の場合はフルサイズ変換により評価することの適正を示した．

第 4 章では，寒冷地における経年鋼材の相対的な靭性の傾向把握を目的として，第 3 章に示した経年鋼材の実験結果と既往文献の公表資料から，エネルギー遷移温度と化学成分の関係に着目して，使用安全性について考察した．1960 年代前半以前に製鋼された 400MPa 級の鋼材の化学成分は，C，S の含有量が多く Mn が少ない傾向と，遷移温度が高温側となる傾向の相関が見られ，衝撃性能が著しく劣る鋼材が存在する可能性を示した．また，炭素当量 Ceq と溶接割れ感受性組成 P_{CM} の値は，現在の JIS の要求値を満たしているが，評価式に含まれない S 量の多い時代の鋼種は，補修補強時の溶接性の指標として用いる場合に注意が必要であることを記した．

第 5 章では，厚鋼板における低温下での靭性評価を目的として，少数主桁で使用頻度の高い鋼種を供試体として，母材および溶接継手部の試験片を作製して衝撃試験を実施した結果について述べた．溶接試験片は，施工実績から入熱量を抑えた CO_2-MAG 溶接により作製した結果，最脆化部は Depo に現れる傾向を示した．試験の結果は Depo の遷移温度に着目して WES 規格を準用して，対象鋼材の使用限界温度を求め，架橋地域の最低温度分布と対比することで，適用判定が可能となることを示した．また，溶接条件や溶接材料の違いによる溶接部の衝撃特性への影響について考察した．

第 6 章では，寒冷地における経年鋼材の使用安全性の観点から，脆性破壊の防止を目的として，前章までの考察から，鋼道路橋における点検手法の一提案を示した．疲労亀裂や変形，初期欠陥が生じやすい部位に着目した外観調査と材料試験の 2 つの調査フローを示した．前者は，支承回りの応力集中部や支間中央の引張応力が卓越する部位を対象に母材や溶接部の傷を目視やカラーチェックで検出し，後者は，桁端部などから供試体を採取して，化学成分分析と衝撃試験を実施して評価対象鋼材の継続使用可否を評価するものである．また，材料試験結果は，第 4 章で考察した化学成分の遷移温度への影響図に反映することで，材料特性の傾向について考察することを提案した．

第 7 章は結論である．各章で得られた知見を総括し，今後の展望と課題を述べた．

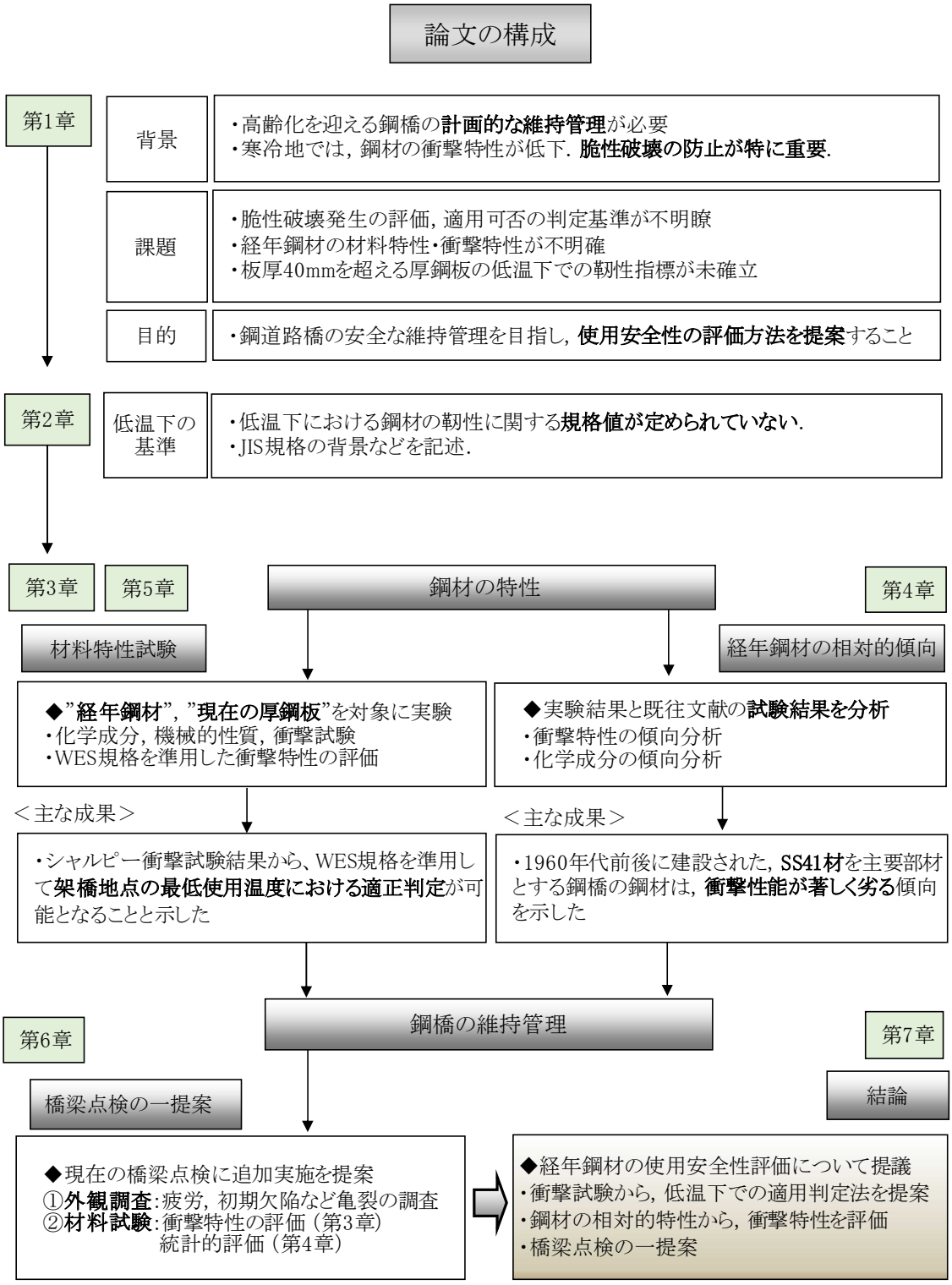

論文の構成
第1章
背景
・高齢化を迎える鋼橋の計画的な維持管理が必要
・寒冷地では，鋼材の衝撃特性が低下．脆性破壊の防止が特に重要．
課題
・脆性破壊発生の評価，適用可否の判定基準が不明瞭
・経年鋼材の材料特性・衝撃特性が不明確
・板厚40mmを超える厚鋼板の低温下での靭性指標が未確立
目的
・鋼道路橋の安全な維持管理を目指し，使用安全性の評価方法を提案すること
第2章
低温下の基準
・低温下における鋼材の靭性に関する規格値が定められていない．
・JIS規格の背景などを記述．
第3章
第5章
鋼材の特性
第4章
材料特性試験
経年鋼材の相対的傾向
◆”経年鋼材”，”現在の厚鋼板”を対象に実験
・化学成分，機械的性質，衝撃試験
・WES規格を準用した衝撃特性の評価
◆実験結果と既往文献の試験結果を分析
・衝撃特性の傾向分析
・化学成分の傾向分析
＜主な成果＞
＜主な成果＞
・シャルピー衝撃試験結果から、WES規格を準用して架橋地点の最低使用温度における適正判定が可能となることと示した
・1960年代前後に建設された，SS41材を主要部材とする鋼橋の鋼材は，衝撃性能が著しく劣る傾向を示した
鋼橋の維持管理
第6章
第7章
橋梁点検の一提案
結論
◆現在の橋梁点検に追加実施を提案
①外観調査:疲労，初期欠陥など亀裂の調査
②材料試験:衝撃特性の評価（第3章）
統計的評価（第4章）
◆経年鋼材の使用安全性評価について提議
・衝撃試験から，低温下での適用判定法を提案
・鋼材の相対的特性から，衝撃特性を評価
・橋梁点検の一提案

図 1.2　論文の構成

参考文献（第 1 章）

1.1) 国土交通省 北海道開発局：北海道橋梁長寿命化修繕計画（案），2012.

1.2) 北海道建設部：北海道橋梁長寿命化修繕計画，2010.

1.3) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅰ~Ⅴ，2012.

1.4) 北海道開発局土木試験所構造研究室：鋼材の低温域における溶接性と安定性に関する試験調査（鋼材のシャルピー衝撃試験結果の整理集計），1985.

1.5) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，2011.

1.6) 日本溶接協会：溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法 WES2805，1980.

第2章　低温下における鋼材の靭性指標

2.1　概説

脆性破壊は，小さな変形，高速伝播，平滑破面などの特徴を有し，荷重増加を伴わない状態で瞬時に生じる不安定破壊である．この脆性破壊の起こりやすさの指標となるのが，破壊靭性である．脆性破壊は，靭性劣化部に欠陥や亀裂があり，過大な引張応力が作用する条件下で発生することが知られている [2.1)].

a) 靭性劣化部：製鋼技術が未発達な時代の古い鋼材や溶接接合部など
b) 欠陥や亀裂：溶接欠陥，疲労亀裂，切欠き，応力集中部からの延性亀裂など
c) 引張応力：大地震などの衝撃で過大な引張応力を受ける部位など
d) 環境温度：低温下

鋼道路橋において，破壊靭性の指標として広く用いられているのが，シャルピー衝撃試験である．シャルピー衝撃試験は，V ノッチをもつ角棒試験片を 3 点曲げで衝撃的に破壊させたときの，吸収エネルギーと脆性破面率で評価される [2.2)]．シャルピー衝撃試験では，試験温度を変化させて試験を行うことで，吸収エネルギー遷移曲線と脆性破面遷移曲線が得られる．遷移曲線から得られるエネルギー遷移温度 vT_E，破面遷移温度 vT_S が破壊抵抗の指標となる．現状の多くの破壊靭性に対する要求値は，このシャルピー試験によって評価されている．

本章では，現状における鋼材の靭性指標の明確化を目的として，規格・基準の背景や変遷，思想について考察する．鋼道路橋に用いる鋼材は，安定した品質が確保されていることが前提条件であり，道示では，JIS で規格化された材料を用いることが規定されている．JIS では，鋼材の靭性指標として，ある試験温度におけるシャルピー吸収エネルギー値が要求されている．この要求値は，JIS 制定時における諸外国の規格を準用したもので, 制定後 50 年近く経過した現在においても当時の規格値が踏襲されている状況にあることを当時の文献から紹介した．また，脆性破壊に対する安全性の評価が可能な手法として，石油貯槽や原子力設備などの規格に用いられている日本溶接協会規格（WES）の鋼道路橋への適用について考察した．

2.2　鋼材の靭性評価に関する文献

2.2.1　英国船級協会ロイドが提示した鋼材の靭性評価基準値

JIS では，橋梁用鋼材の靭性要求値として，ある試験温度における吸収エネルギーを定めている．この指標は，1958 年，英国船級協会ロイド（以降，ロイド協会と略）が，英国で破壊した溶接船の脆性破壊調査を実施した結果[2.3)]を，当時の造船の材料規格に取り込んだことに由来することが各種文献[2.4)]に記述されている．本項では，当時の英国船級協会ロイドの靭性評価基準について紹介する．

(1) 当時の諸外国の研究

脆性破壊の問題は，1940 年ごろヨーロッパで冬期に溶接橋が折損した事故に端を発したといわれている．その後，第二次世界大戦中に，米国のリバティ型船の事故をはじめとして各国で溶接船の事故に対する原因究明が進められ，溶接欠陥を主体とする切欠きと低温が主要因であることが判明し，これらの研究をベースに脆性破壊特性評価のための試験法が次々と開発された．その代表的な試験法がシャルピー衝撃試験である．簡便な判定試験であることから，材料の靭性を評価するためのもっとも一般的な試験法として現在でも採用されている．

当時の諸外国が提示した，シャルピー衝撃試験における評価基準値を表 2.1 に示す．米国のリバティ船の事故調査では，吸収エネルギーが 21J（15ft-ldf）以下の場合に損傷が多いこと，また，国際溶接学会 IIW がフランス船の事故例を調査した結果から 27J（20ft-ldf）の値が得られたこと，さらに，ロイド協会が行った損傷した英国船の調査結果から 47J（35ft-ldf）が脆性破壊発生防止の目安となることが提示された．

ロイド協会が実施した当時の文献では，鋼材の靭性は，シャルピー吸収エネルギーのみでは評価できず，破壊試験の方がより脆性破壊事故の実状と良い相関関係を示したことを結論付けている．しかし当時は，頻繁に起こる溶接船の脆性破壊事故防止が急務であり，単純・迅速かつ経済的な試験方法として，シャルピー衝撃試験が採用された．ロイド協会は，米国の事故調査では鋼種による評価がなく，さらに調査した鋼材の種類として不足していたことを指摘し，多数の試料の調査結果に基づいて評価基準を設定したとされている．

表 2.1　シャルピー衝撃試験の評価基準値の推移（船舶の脆性破壊調査）

評価年度	評価団体	シャルピー吸収エネルギー
1947 年(昭和 22)	米国事故調査委員会	21J (15ft-ldf)
1955 年(昭和 30)	国際溶接学会 IIW	27J (20ft-ldf)
1958 年(昭和 33)	英国船級協会ロイド	47J (35tf-ldf)

(2) ロイド協会の評価基準値（1958 年）

脆性破壊が発生した船舶に使用されていた鋼板のシャルピー衝撃試験結果による吸収エネルギーと延性破面率の関係を図 2.1 に示す．横軸は吸収エネルギー，縦軸は延性破面率である．図中のシンボルは破壊形態を示しており，●印は延性破壊，あるいは，き裂が停止した鋼板，○印は脆性破壊した鋼板，×印は両者の中間的な破壊形態を呈したことを表す．なお，試験温度は対象鋼板が脆性破壊事故を起こした際の温度であり，0～+20℃が大半で 0℃以下は極めて少ない．この試験結果から，実験温度 0℃のシャルピー吸収エネルギー値 35ft-lb(47J)以下，かつ延性破面率 30%以下の場合に脆性破壊が発生する可能性が高いとロイド協会は判定した．図 2.1 の赤枠内がこれに該当する．

現在の JIS においても，一部の鋼材でシャルピー吸収エネルギー値 47J 以上を有することが，脆性破壊しない靭性領域の簡便な指標として踏襲されている．JIS 規格制定以降，この指標の基で建設された鋼橋には長い安全実績がある．しかしながら，これまでは標準的な気候の地域から寒冷地に至るまで，同じ指標の基で経験値から安全と判断してきたといえる．今後，補修補強により橋梁の長寿命化を推進するにあたり，性能評価の観点から，明確な新しい指標が求められる．

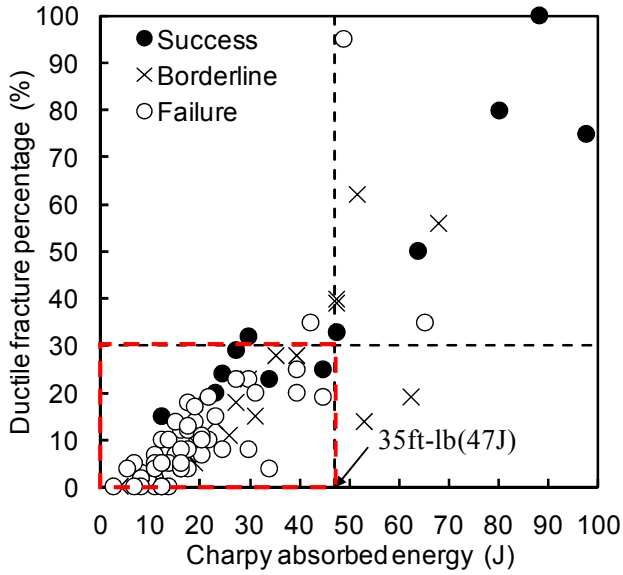


図 2.1　ロイド協会によるシャルピー衝撃試験結果 [2.3)]

2.2.2　JIS 規格における靭性要求値と変遷

(1)　現在の JIS における靭性要求値

鋼橋の主要部材に用いる構造用鋼材は，JIS-G-3106[2.5)],3114[2.6)]の SM 材に代表される．JIS における靭性の評価基準では，ある試験温度におけるシャルピー吸収エネルギーを要求している．現在の JIS の要求値を表 2.2 に示す．490MPa 級は，試験温度 0℃において，B 材は 27J 以上，C 材では 47J 以上を要求し，570MPa 級では試験温度-5℃で 47J 以上を要求している．ここで，動的試験であるシャルピー衝撃試験の試験温度は，環境温度とは異なる．

表 2.2　JIS 橋梁用鋼材における靭性要求値 [2.5), 2.6)]

JIS	鋼種	試験温度 ℃	シャルピー吸収エネルギー J
G 3106	SM400A	-	-
	SM400B	0	27以上
	SM400C	0	47以上
	SM490A	-	-
	SM490B	0	27以上
	SM490C	0	47以上
	SM490YA	-	-
	SM490YB	0	27以上
	SM520C	0	47以上
	SM570	-5	47以上

Vノッチ圧延方向

JIS	鋼種	試験温度 ℃	シャルピー吸収エネルギー J
G 3114	SMA400AW	-	-
	SMA400BW	0	27以上
	SMA400CW	0	47以上
	SMA490AW	-	-
	SMA490BW	0	27以上
	SMA490CW	0	47以上
	SMA570W	-5	47以上

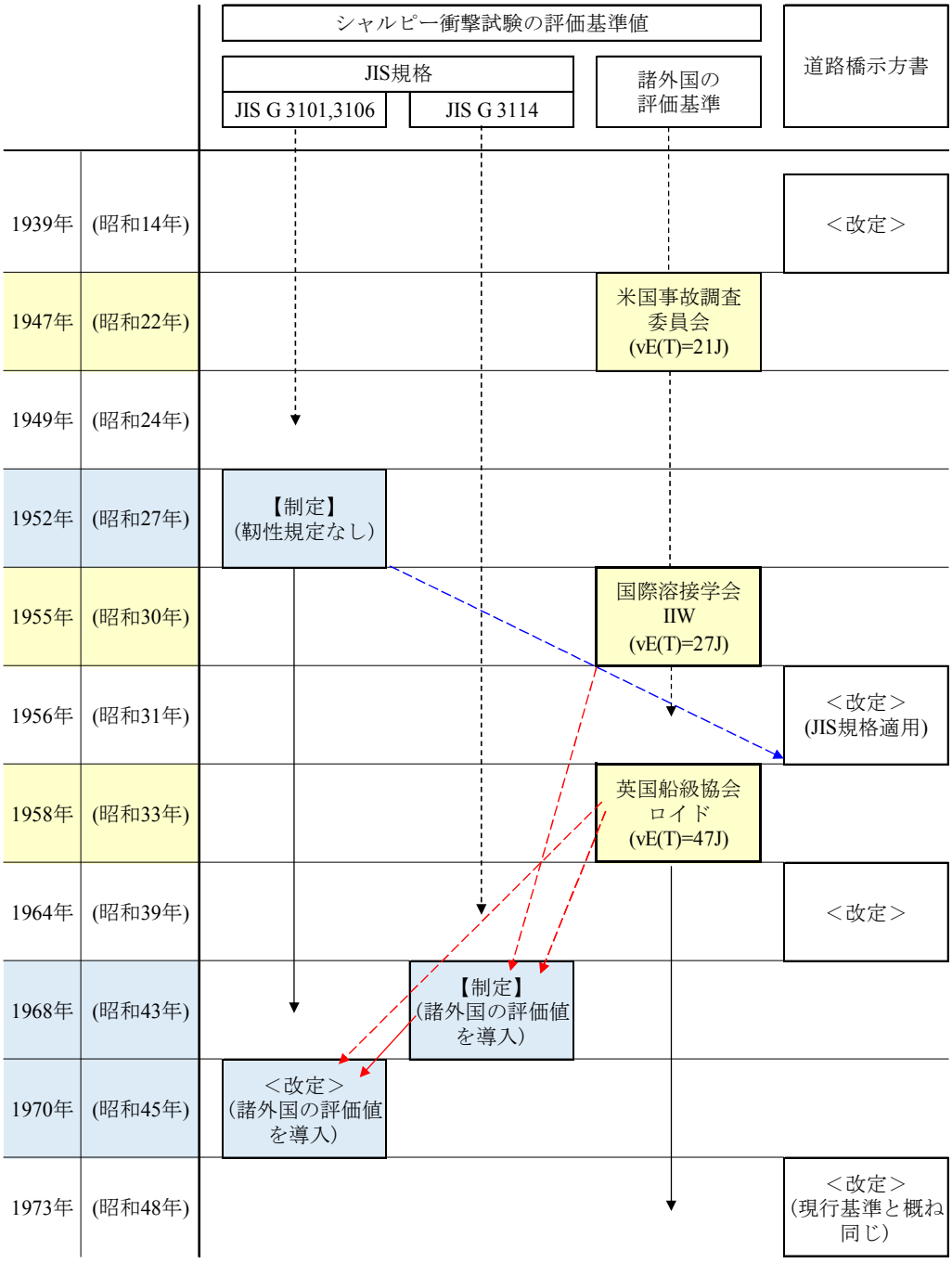
Vノッチ圧延方向

(2)　JIS および基準における靭性評価基準の変遷

日本の工業標準化制度は，古い歴史をもち幾多の変遷を経てきたが，工業標準化法の施行により 1949 年（昭和 24 年）から JIS への切り替えが開始された [2.7)]．

JIS- G-3101，JIS-G-3106 は，1952 年（昭和 27 年）に制定され，1956 年（昭和 31 年）道示にその規格の使用が規定された．当時の道示では，鋼材は JIS-G-3101 の SS41 に適合する材料の使用を規定している．しかし，この時代にはまだ JIS 規格に靭性の要求値はない．その頃，諸外国では前述した溶接船が折損した脆性破壊事故調査から，靭性の評価基準に対する研究が行われていた. JIS では, 昭和 43 年に JIS-G-3114 の制定に伴い，諸外国の靭性評価基準を取り入れた．その 2 年後には，JIS-G-3106 も諸外国の靭性評価基準を取り入れて改定された．この時代から，現在に至るまで JIS 規格の靭性要求値は変わっていない．規格，基準類の制定年次および改定年次の変遷を表 2.3 に示す．

表 2.3　規格，基準類の制定および改定年次の変遷



2.2.3　日本溶接協会規格（WES）

脆性破壊に対する安全性の評価が可能な手法として，石油貯槽や原子力設備などの規格に用いられている日本溶接協会規格（WES）の鋼道路橋への適用について考察する．

WES3003[2.8)]は，降伏点耐力 685MPa 以下の鋼板で，板厚 6mm 以上 100 以下，最低使用温度が 0℃以下-196℃以上の低温用圧延鋼板の鋼種認定を受けた鋼種への適用が基本とされている．低温用圧延鋼板とは，低温下で使用される容器設備及び構造用として，低温靭性及び溶接性を重視して製造された鋼材で，脆性破壊が特に問題となる圧力容器や海洋構造物などで使用されている．また，WES2805[2.9)]には，破壊靭性の評価として，限界CTOD値とシャルピー衝撃試験により得られる吸収エネルギーとの相関式が提案されている．このため，橋梁に用いられる鋼種に適用した場合，脆性破壊の観点から評価が可能となる反面，試験結果は極めて厳しい側の評価を与える可能性や，提案される相関関係の精度が低下することも考えられる．橋梁の鋼材判定に使用する場合，これらの影響要因を理解する必要がある．

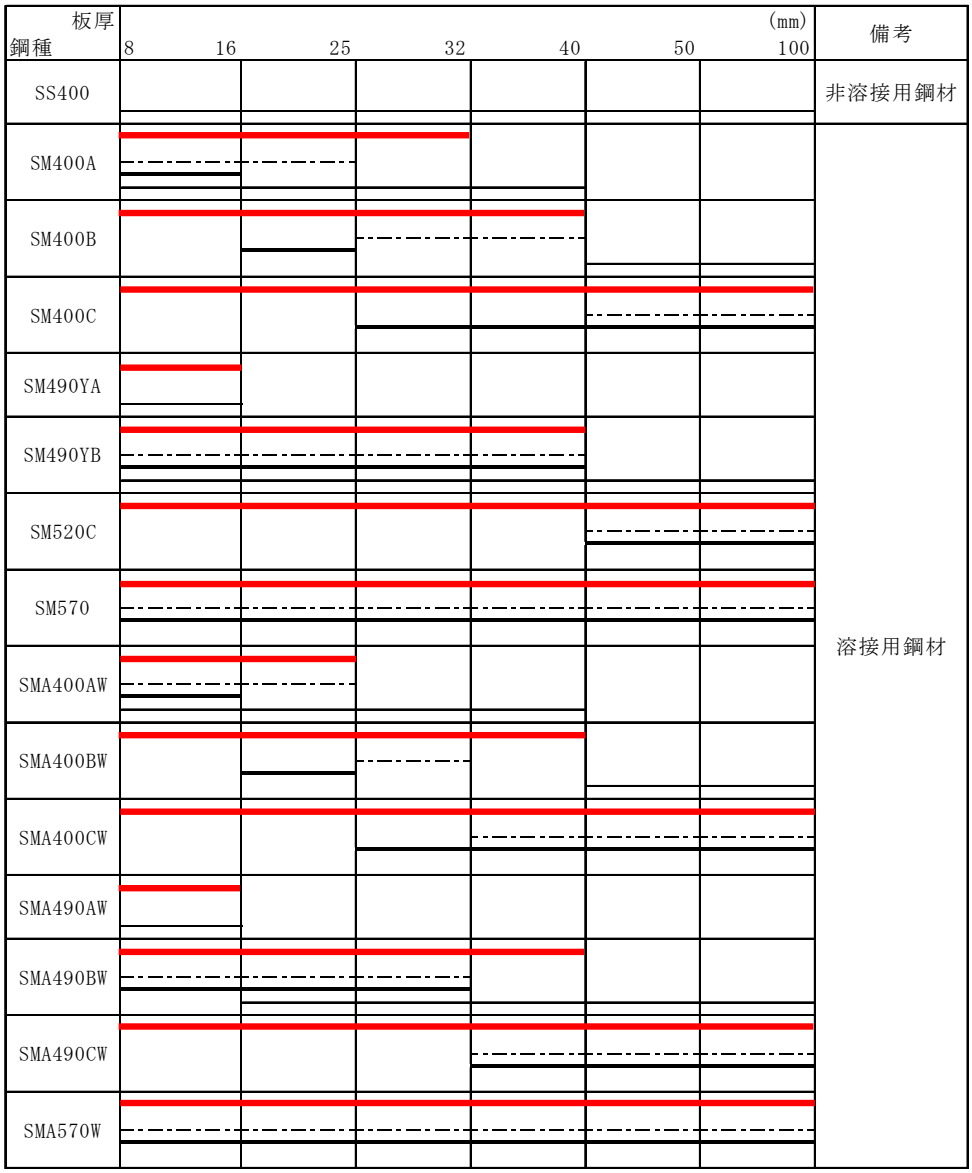
2.3 北海道の鋼道路橋における鋼種選定

鋼道路橋の鋼種選定は，道示Ⅱ[2.10)]の鋼種選定が基本原則とされている．ただし，気温が著しく低下する地方に架設される橋は，特に低温靭性に注意して鋼種選定を行う必要があるとされ，特に，引張力を受ける重要な溶接構造部材に対しては，その地方における最低気温を考慮して適切な靭性を確保することが望ましいとされている．

北海道では，早くから寒冷地における鋼種選定の確立を目的とした靭性実験が行われ，道示の規定よりも厳しい基準で鋼橋が建設されている．

現在の道示が規定する鋼道路橋の鋼種選定と北海道が採用[2.11)]している鋼種選定を同一の表に記載したものを表 2.4 に示す．横軸は板厚，縦軸は鋼種を示す．表中，赤線は道示の適用範囲を示している．道示では，平成 8 年版から鋼種選定表の適用板厚が 100m まで拡大されている．凡例のとおり，北海道では最低気温に応じて鋼種の適用範囲を細分し，かつ極低温下の地域においては道示よりも適用板厚を薄い側に規定している．これは，1.2 既往の研究の項で紹介した実験結果[1.4)']を基にしている．なお，板厚 40mm 以上100mm以下については，既往研究では対象外である．本表は道示を準用し，一律100mmまで許容している．このことからも，板厚 40mm を超える鋼材の適用判定手法の確立が重要である．

表 2.4　鋼種選定表 [2.10),2.11)]



凡例

選定条件	
・道路橋示方書Ⅱ 鋼種選定基準	
・最低気温-25℃以上の地域の主要部材 ・最低気温-35℃以上～-25℃未満の地域で圧縮応力を受ける主要部材 ・最低気温-45℃以上～-35℃未満の地域で圧縮応力を受ける主要部材	
・最低気温-35℃以上～-25℃未満の地域で引張応力を受ける主要部材	
・最低気温-45℃以上～-35℃未満の地域で引張応力を受ける主要部材	
・二次部材	

2.4 本章のまとめ

本章では，現状における鋼材の靭性指標の明確化を目的として，規格・基準の背景や変遷，思想について考察した．主な要旨は以下の通りである．

(1) JIS では，橋梁用鋼材の靭性要求値として，ある試験温度における吸収エネルギーを定めている．この指標は，1958 年，ロイド協会が英国で破壊した溶接船の脆性破壊調査を実施した結果を，当時の造船の材料規格に取り込んだことに由来する．当時の英国船級協会ロイドの靭性評価基準について紹介した．

(2) JIS 規格制定以降，この指標の基で建設された鋼橋には長い安全実績がある．今後，補修補強により橋梁の長寿命化を推進するにあたり，性能評価の観点から，明確な新しい指標が求められることを追記した．

(3) 脆性破壊に対する安全性の評価が可能な手法として，日本溶接協会規格（WES）の鋼道路橋への適用した場合，脆性破壊の観点から評価が可能となる反面，試験結果は極めて厳しい側の評価を与える可能性や，提案される相関関係の精度が低下する可能性ついて追記した．

(4) 鋼道路橋の鋼種選定は，板厚 40mm を超える鋼材の適用判定手法の確立が求められていることを記した．

参考文献（第 2 章）

2.1) 日本溶接学会：JWES 接合・溶接技術 Q&A1000，2013.

2.2) 日本工業規格：金属材料のシャルピー衝撃試験方法 JIS Z2242，2009.

2.3) J. Hodgson and G. M. Boyd：Britle Fracture in Welded Ships，The Institution of Naval Architects，Quarterly Transactions，Vol.100，No.3，pp. 141-180，1958.

2.4) 例えば，大田孝二ら：橋と鋼，建設図書，pp. 33-34，2000.

2.5) 日本工業規格：溶接構造用圧延鋼材 JIS G3106，2008.

2.6) 日本工業規格：溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 JIS G3114，2008.

2.7) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術，2009.

2.8) 日本溶接協会：低温用圧延鋼板判定基準 WES3003，1995.

2.9) 日本溶接協会：溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法 WES2805，1980.

2.10) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編，2012.

2.11) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，2012.

第3章　経年鋼材を用いた低温下における材料特性試験

3.1　概説

鋼道路橋の経年橋梁において，近年，損傷や機能の低下が顕在化してきており，今後，建設後 50 年を超える橋梁が急速に増加することからも，補修補強によりこれらを適切に維持管理していくことの重要性が高まっている．

北海道開発局土木試験所は，1960 年以降に製造された鋼橋に用いる構造用鋼材に対し，寒冷地における一連の使用可否判定調査を実施[3.1)]してきた．北海道は，冬期の最低気温が－40℃に達する寒冷地であると共に，地震多発地域である．1960 年代以前にこのような地域に架設された鋼橋は，脆性破壊の発生を防止するといった観点から，鋼材はどの程度の破壊靭性を有しているのか，さらには，鋼材に要求かつ必要な靭性は如何ほどであればよいのかなど不明な点も多々ある．経年橋梁を安全に維持管理するためにも，使用鋼材の破壊靭性を把握しておくことは重要である．

一方，鋼道路橋では低温下における鋼材の靭性は JIS 規格[3.2)]に代表されるが，JIS で要求されるシャルピー吸収エネルギーの最小値では，脆性破壊に対する指標として不明瞭である．これに対し，CTOD 試験[3.3)]などの破壊靭性試験を用いることで，脆性-延性破壊の境界温度（遷移温度）を精度よく求めることができ，シャルピー衝撃試験[3.4)]に代わる低温下での靭性試験となり得る可能性がある．しかしながら，CTOD 試験は実験費用が高価で試験方法も煩雑なため，実用的な手法とはなり難い課題がある．

本章では，経年鋼材の脆性破壊発生有無の判定を目的として，北海道各地において約 50 年以上供用された橋梁の撤去，架替えに伴い，橋梁に用いられていた鋼材（以後，経年鋼材と称す）を採取し，化学組成，機械的性質，シャルピー衝撃特性を調査すると共に，一部の経年鋼材に対しては，3 点曲げ CTOD 試験を実施した．また，特性評価のため，同グレードの現在の鋼材に対しても同様の実験を実施した．試験の結果は，簡易な試験方法でかつ脆性破壊に対して安全性の評価が可能な手法が実用上望まれる．そこで，シャルピー衝撃試験のエネルギー遷移温度に着目し，WES3003[3.5)]による判定基準を準用して，寒冷地における経年鋼材の脆性破壊発生の可能性を評価・判定する手法を提案[3.6)]した．また，経年橋梁の主要部材の鋼材は薄板が多く，シャルピー衝撃試験のフルサイズ試験片（10mm）を採取できない可能性がある．この場合，JIS[3.4)']ではサブサイズ（7.5mm）やハーフサイズ試験片（5mm）を用いるとされているが，フルサイズ試験片との関係は示されていない．このため，サブサイズやハーフサイズ試験片を用いてシャルピー衝撃試験を実施した際のフルサイズ変換についても検証を試みた．

3.2 供試鋼材の採取

古い時代に建設された多くの鋼橋を安全かつ効率的に維持管理するには，当時の鋼材の特性を把握する必要がある．これには，長い間供用された橋梁から試験片を採取することが有益と考えられる．

北海道各地に架設,供用されていた橋梁から,各種実験に用いる供試鋼材を採取した．供試鋼材の一覧を表 3.1 に，鋼材を採取した橋梁の架設位置ならびに，北海道の最低気温分布[3.7)]を図 3.1 に示す．また，各経年橋梁の外観を写真 3.1 に示す．

A 材および B 材は，冬期の最低気温が－35℃に達する北海道北見市および釧路市に建設され，50 年以上が経過した連続合成箱桁のマンホールから採取した鋼材である．C 材は，約 60 年前に芦別市（最低気温－35℃）に建設された連続鈑桁で，支点近傍のウェブから採取した鋼材である．D-W 材および D-F 材は，岩内町（最低気温－25℃）に約 55 年前に建設された連続合成鈑桁で，支点近傍の主桁ウェブ（-W 材）およびフランジ（-F 材）から採取した鋼材である．建設時図面から，鋼種は全て引張強度 400MPa 級鋼材に相当するものである．

なお，A 材および B 材を採取した橋梁は現在も供用中で，C 材および D 材を採取した橋梁は，新規橋梁の建設に伴い撤去されている．一方，比較材として用いる現在の鋼材として，経年鋼材と同じ強度レベルの P 材：SM400A（板厚 9mm）を選定した．

シャルピー衝撃試験に用いる試験片形状を図 3.2 に示す．JIS[3.4)']では，図 3.2(a)に示すフルサイズ試験片 10mm x 10mm の断面形状を基本とし，この試験片サイズが採取できない場合は，図 3.2(b)のハーフサイズ試験片などを使用する．また，JIS[3.2)']で要求するシャルピー吸収エネルギーは圧延方向のみ規格化されている．本実験でも図 3.2(c)のように圧延方向に試験片を採取した．

表 3.1　供試鋼材一覧

鋼材	架設地域	最低温度（℃）	建設年度	鋼種	板厚（mm）	供試体採取部位
A	北海道北見市	-35	1959	SM41W	6	ﾏﾝﾎｰﾙ
B	北海道釧路市	-35	1963	SS41	6	ﾏﾝﾎｰﾙ
C	北海道芦別市	-35	1952	SS41	10	主桁ｳｪﾌﾞ
D-W	北海道岩内町	-25	1958	SS41	8	主桁ｳｪﾌﾞ
D-F					19	主桁ﾌﾗﾝｼﾞ
P	現在の鋼材			SM400A	9	

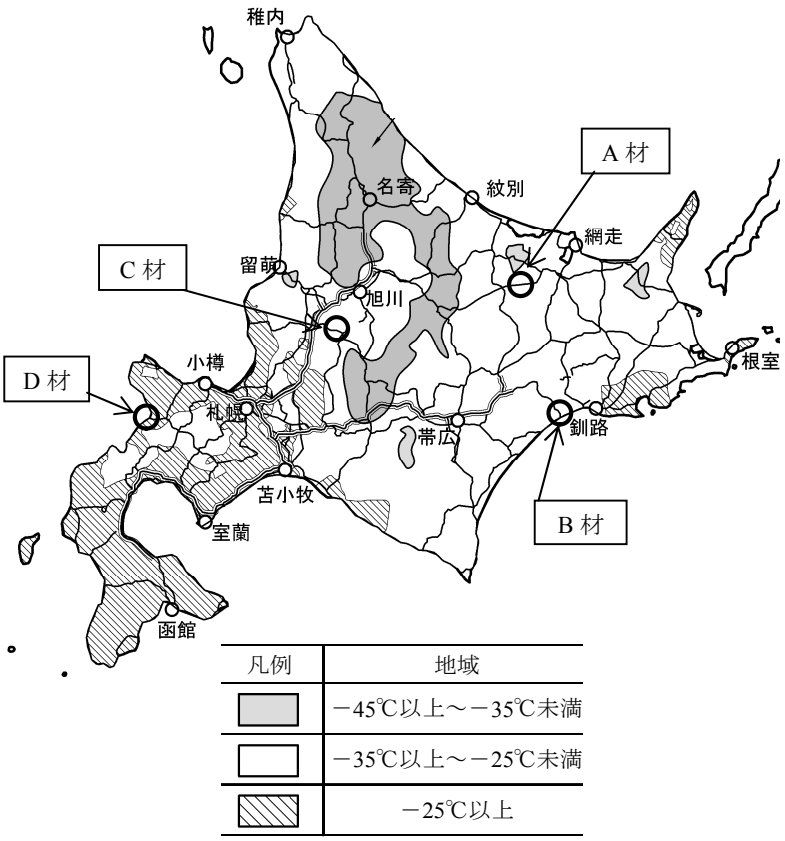
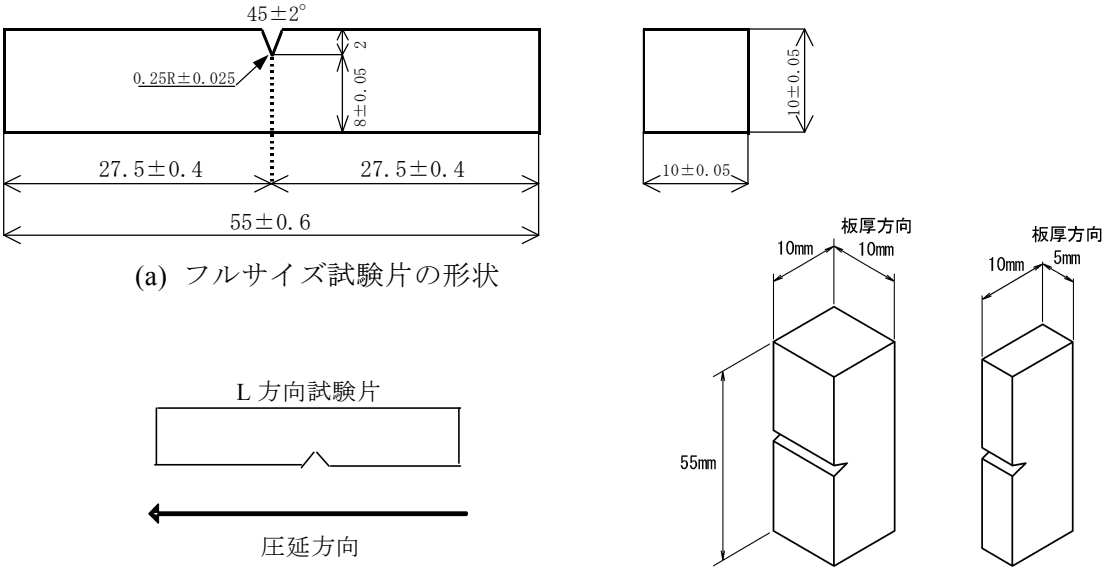


図 3.1　北海道の最低気温分布図 [3.7] と経年橋梁の架設位置



(a) フルサイズ試験片の形状

(b) 試験片厚さ

(c) 試験片の採取方向

図 3.2　シャルピー衝撃試験の試験片形状



(a) 経年橋梁 A（2 径間連続合成箱桁橋，1959 年建設）



(b) 経年橋梁 B（3 径間連続合成箱桁橋，1963 年建設）



(c) 経年橋梁 C（3 径間連続非合成鋼 I 桁橋，1952 年建設）



(d) 経年橋梁 D（3 径間連続合成鈑桁橋，1958 年建設）

写真 3.1　経年橋梁の外観

3.3　化学組成および機械的性質

供試鋼材の化学成分分析結果を表 3.2 に示す．供試鋼材は主として SS41 材であるが，経年橋梁においては主要部材に使用されている実績から，試験結果は現在の SM400A と対比した．D-W 材，D-F 材は同じ橋梁から採取したものであるが，化学成分の違いから全く異なる成分であることがわかった．

経年鋼材の化学成分は，現在の鋼材（P 材）と比べ，相対的に A 材，B 材，D-W 材に含まれる炭素量は同程度か少なく，特に A 材は当時の溶接構造用鋼材（SM41W）で炭素量が非常に少ない材料であった．C 材，D-F 材に含まれる炭素量は若干多いが，現在の SM400A の基準（0.23%以下）を満していた．C 材, D-F 材に含まれる Mn 量は SM400A の基準（2.5×C 以上）を満たしていなかった．また，現在の鋼材に比べ，経年鋼材には S が比較的多く，特に D-F 材は，SM400A の基準（0.035%以下）を超える量が含まれていた．これは，経年鋼材が製鋼された当時の脱硫技術が未発達であったことが原因と考えられる．なお，当時の SS41 の JIS 規格は満たしていた．本章では経年鋼材に溶接は実施していないが, 溶接性を示す炭素当量は全て 0.44%以下, 冷間割れ感受性組成は 0.28%以下であったことを参考までに記しておく．

各鋼材に対して実施した引張試験[3.8)]の結果を図 3.3 および表 3.3 に示す．引張試験は各鋼材につき 2 本の試験片を採取し実施した．各鋼材の 2 本の試験片の結果は同程度であったため，図 3.3 の応力－ひずみ曲線は，代表として各供試体とも 1 本の結果を示した．なお，表 3.3 の試験結果は各鋼材 2 本の平均値を記している．

試験の結果，経年鋼材は概ね SM400A の基準を満たすものであった．引張試験において，B 材はくびれが生じずに最大荷重時に破断したが，伸びは SM400A の基準を満足していた. D-F 材は現在の SM400A の JIS 規格値と対比すると, わずかに低い値を示した．

表 3.2　化学成分の分析結果

鋼材			化学成分分析結果 (%)							
			C	2.5xC	Mn	Si	P	S	Ceq	PCM
A	1959年	SM41W	0.05	0.13	0.33	0.014	0.007	0.022	0.10	0.08
B	1963年	SS41	0.16	0.40	0.56	0.070	0.013	0.022	0.27	0.21
C	1952年	SS41	0.23	0.58	0.47	0.010	0.013	0.018	0.32	0.27
D(Web)	1958年	SS41	0.09	0.23	0.37	0.002	0.007	0.020	0.17	0.13
D(Flg)	1958年	SS41	0.23	0.58	0.55	0.006	0.023	0.047	0.34	0.20
P	2011年	SM400A	0.15	0.38	0.69	0.100	0.024	0.007	0.28	0.20
JIS G 3106	(JIS 1952年)	SM41W	≦0.23		≧2.5xC	--	≦0.040	≦0.050	--	--
	(JIS 2013年)	SM400A	≦0.23		≧2.5xC	--	≦0.035	≦0.035	≦0.44	≦0.28
JIS G 3101	(JIS 1952年)	SS41	--		--	--	≦0.060	≦0.060	--	--
	(JIS 2010年)	SS400	--		--	--	≦0.050	≦0.050	--	--

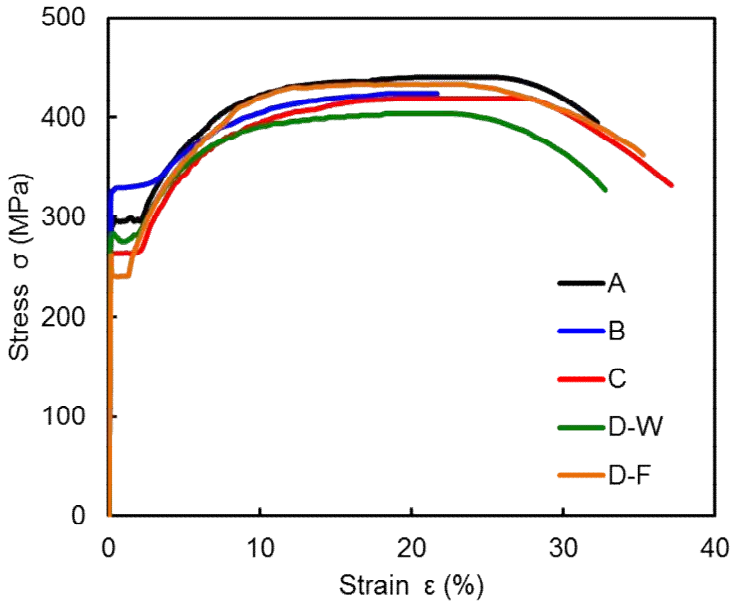


図 3.3　応力－ひずみ関係

表 3.3　引張試験の結果

鋼材			引張試験結果			
			降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
A	1959年	SM41W	316	424	21.2	21.2
B	1963年	SS41	284	440	25.7	32.3
C	1952年	SS41	267	424	22.3	37.0
D(Web)	1958年	SS41	274	404	22.9	31.6
D(Flg)	1958年	SS41	243	440	19.8	32.8
P	2011年	SM400A	382	469	--	25.0
JIS G 3106	(JIS 1952年)	SM41W	≧225	≧400	--	≧21
	(JIS 2013年)	SM400A	≧245	≧400	--	≧18
JIS G 3101	(JIS 1952年)	SS41	≧225	≧400	--	≧20
	(JIS 2010年)	SS400	≧245	≧400	--	≧17

3.4　シャルピー衝撃試験

3.4.1　シャルピー吸収エネルギーの遷移曲線

経年鋼材は基本的に板厚が薄く，D-F 材以外は厚さ 10mm の標準試験片（フルサイズ試験片）を採取することができなかった．このため，厚さ 7.5mm のサブサイズ，もしくは，5mm のハーフサイズ試験片を用いて実験を行った．ただし，試験片の厚さが実験結果に及ぼす影響を検討するため，供試体を十分に採取できた C 材からはサブサイズとハーフサイズ，D-F 材からはフルサイズ，サブサイズ，ハーフサイズの試験片を作製し，実験に供した．

シャルピー衝撃試験から得られた吸収エネルギーの遷移曲線を図 3.4 に，結果の一覧を表 3.4 に示す．図中の実線は，式（3.1）に示す WES2805 に提示されている吸収エネルギー遷移曲線の近似曲線[3.9]である．式（3.1）の係数 k_a およびエネルギー遷移温度 vT_E は，実験結果に最小二乗法を適用して決定した．

$$vE(T)=\frac{vE_{shelf}}{\exp[k_a(T-vT_E)]+1} \tag{3.1}$$

ここに，

$vE(T)$：シャルピー吸収エネルギー（J）

T　　：温度（℃）

vE_{shelf}：上部棚吸収エネルギー（J）

vT_E　：エネルギー遷移温度（℃）

k_a　　：定数

式(3.1)から求めた図 3.4 の吸収エネルギー近似曲線は，シャルピー衝撃試験結果の傾向を良く表現していることがわかる．

ところで，試験片の厚さが異なる場合，シャルピー吸収エネルギーの結果を直接比較することはできない．現在の鋼材（P 材）と同じサブサイズ試験（t7.5mm）を用いた C 材，D-F 材に着目した遷移温度を図 3.5 に示す．C 材の上部棚吸収エネルギーは P 材を上回っていたが，エネルギー遷移温度は約 30℃高温側であった．また，D-F 材については，上部棚吸収エネルギーが P 材の 50%程度，エネルギー遷移温度は約 50℃高く，P 材に比べてシャルピー衝撃特性が著しく劣っていた．なお，その他の経年鋼材のシャルピー衝撃試験結果の評価については，後述する．

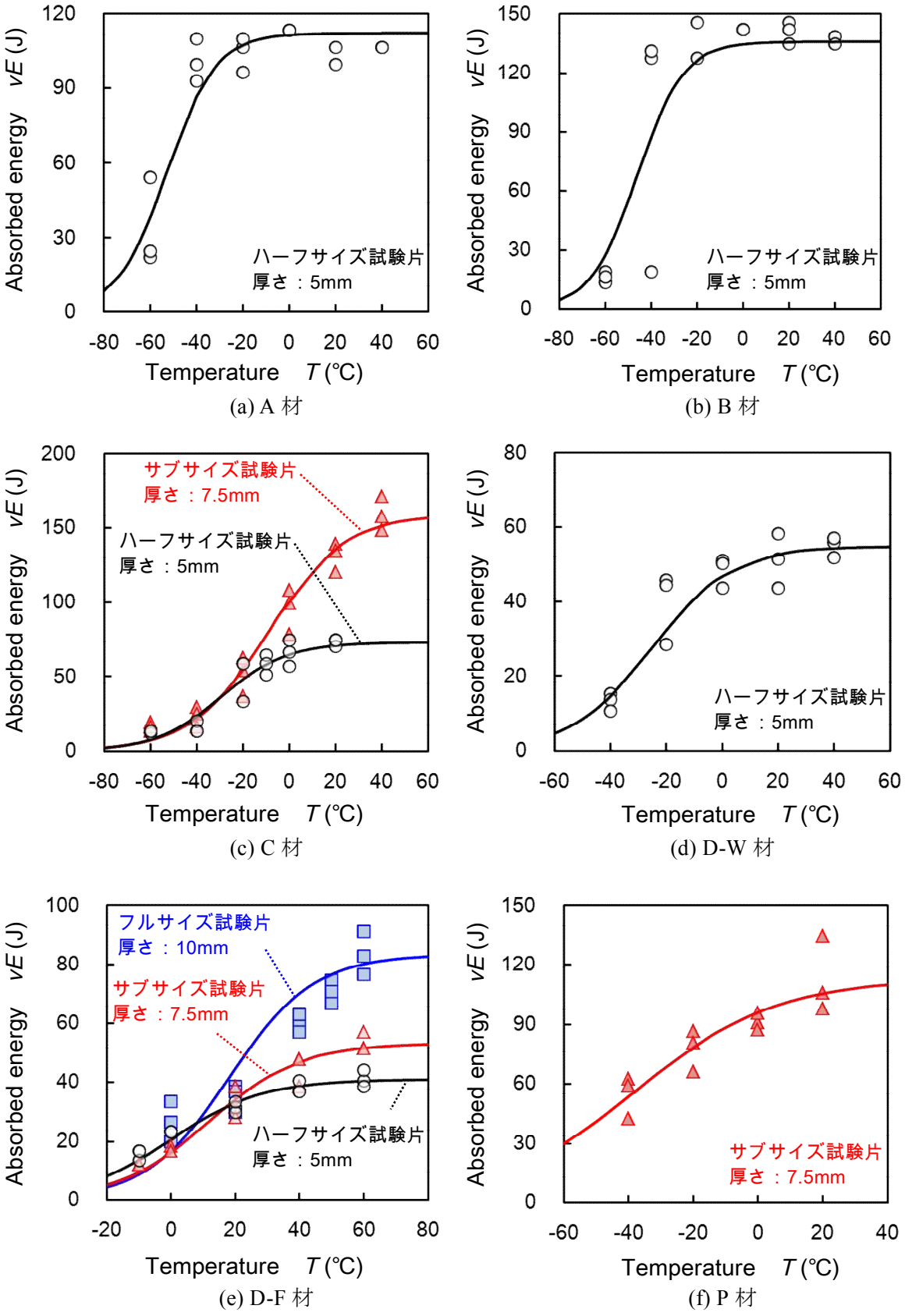


図 3.4　シャルピー吸収エネルギーの遷移曲線

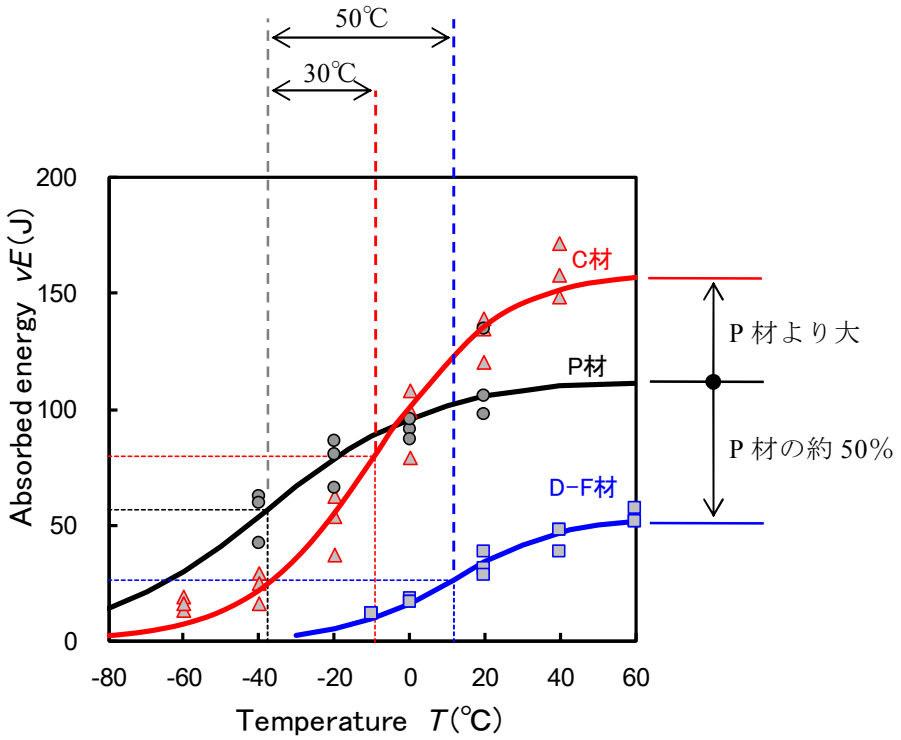


図 3.5　サブサイズ試験片(t7.5mm)の遷移温度

表 3.4　シャルピー衝撃試験の結果

鋼材	試験片厚さ	上部棚エネルギー vE_{shelf}		エネルギー遷移温度 vT_E	試験片厚さの違いによる遷移温度の差
		試験結果	フルサイズ変換値 3.10)		
	mm	J		℃	℃
A	5	108.9		-52.8	
B	5	136.0		-46.0	
C	7.5	159.1	212.1	-9.3	19.9
	5	73.3	146.6	-29.2	
D-W	5	54.9		-25.3	
D-F	10	83.5	83.5	18.2	6.5
	7.5	53.3	71.1	11.7	11.9
	5	41.0	82.0	-0.2	
P	7.5	150.4		-37.9	

フルサイズ変換；試験片厚さに比例
- 試験片厚(t7.5mm)　→ 10 / 7.5 =1.33 倍
- 試験片厚(t5.0mm)　→ 10 / 5.0 =2.00 倍

比例せず（同等とならず）

ほぼ比例する傾向

3.4.2　試験片の厚さがシャルピー衝撃試験結果に及ぼす影響

シャルピー衝撃試験片の厚さが試験結果に及ぼす影響について考察するため，同一の鋼材から異なる厚さのシャルピー試験片を採取することのできたC材およびD-F材に対する実験結果に着目する．

ASTM（American Society for Testing and Materials）による金属材料の各種試験基準（A370）では，厚さ10mm以下の試験片を用いる場合のシャルピー衝撃試験に対し，試験片厚さ（断面積）に比例した吸収エネルギーの要求値を設定[3.10]している．要求値の設定には安全率を含んでいるが，基本的には吸収エネルギーと試験片厚さが比例すると見なしている．前項，表3.4に，C材およびD-F材のサブサイズとハーフサイズ試験片の試験結果に対して，この方法で変換したフルサイズ試験片に相当する上部棚吸収エネルギーを示している．フルサイズ変換後の上部棚エネルギーは同等となるはずであるが，C材については試験片厚さと吸収エネルギー値が比例していない．なお，D-F材については，3種類の試験片ともフルサイズ変換後はほぼ同等な値となり，試験片厚さと吸収エネルギー値がほぼ比例関係となる傾向を示した．

一方，厚さの異なるシャルピー衝撃試験片から得られたエネルギー遷移温度の差に着目すると，C材では，サブサイズとハーフサイズ試験片の遷移温度差は19.9℃であった．D-F材では，フルサイズとサブサイズ試験片の遷移温度差は6.5℃，サブサイズとハーフサイズ試験片の遷移温度差は11.9℃であった．ここで，表中のエネルギー遷移温度は，試験結果の上部棚エネルギーにより求めた値である．

WES3003（低温用圧延鋼板判定基準）には，エネルギー遷移温度に基づく低温環境下における鋼材の使用可否判定方法が示されている．この中で，サブサイズ，ハーフサイズ試験片の遷移温度にそれぞれ10℃，20℃加算することで，フルサイズ試験片の遷移温度と見なす方法が示されている（vT_E(7.5mm)：+10℃，vT_E(5mm)：+20℃）．すなわちこれは，フルサイズ試験片に比べ，サブサイズ，ハーフサイズ試験片の遷移温度は10℃および20℃程度低くなることを意味している．ただし，これらの値にも安全率は含まれている．C材およびD-F材に対する実験結果はこの値と必ずしも整合していないが，試験片の厚さが薄くなるとエネルギー遷移温度が低下する傾向[3.11]は確認することができた．

鋼道路橋における経年鋼材の材料特性評価においてシャルピー衝撃試験を実施する場合，必ずしも実橋からフルサイズ試験片を採取できるとは限らない．むしろ経年橋梁は板厚の薄い鋼板で構成されるものが多く，試験片を採取できる部位が制限される場合はフルサイズ試験片を採取できる可能性は低くなる．シャルピー衝撃試験により経年鋼材の材料特性を評価する際，サブサイズ，ハーフサイズ試験片を用いた場合，試験片厚さが薄くなるほどエネルギー遷移温度が低下する試験結果の特徴を念頭に置いておく必要があることを一連の実験結果は示唆している．

3.5　3 点曲げ CTOD 試験

3.5.1　CTOD 試験の手順および結果

破壊靭性を評価するには WES1108 に示される CTOD 試験などの破壊試験を行う必要があるが，これには多大な時間と労力，すなわち，膨大な費用を要する．このため，限界 CTOD 値とシャルピー衝撃試験により得られる吸収エネルギーとの相関性を利用し，簡便に評価する手法が一般に用いられている．すなわち，WES2805 に提示されているように，吸収エネルギーの大きさ（27J，47J 等）そのものではなく，式(3.2)のシャルピー吸収エネルギーと限界 CTOD 値との関係を基本として，シャルピー衝撃試験の結果を用いて評価するものである．

$$\delta_{cr}(T) = \frac{1}{250} vE(T + \Delta T)$$
$$\Delta T = 87 - 0.10\sigma_{Y0} - 6\sqrt{t} \qquad (3.2)$$

ここに，

$\delta_{cr}(T)$：限界 CTOD 値（mm）
vE　：シャルピー吸収エネルギー（J）
T　：温度（℃）
σ_{Y0}　：常温における降伏応力（MPa）
t　：板厚（mm）

WES2805 では，シャルピー衝撃試験におけるエネルギー遷移温度 vT_E は，CTOD 試験における延性破壊－脆性破壊の境界となる温度に対応するとしている．すなわち，シャルピー衝撃試験による簡便な破壊靭性の評価においては，吸収エネルギーの大きさではなく，エネルギー遷移温度が最も重要な指標といえる．

ここでは，CTOD 試験とシャルピー衝撃試験結果の関係に基づき，シャルピー吸収エネルギーによる破壊靭性の簡便な評価の妥当性を明らかにすることを目的として．経年鋼材（C 材）に対して破壊靭性を評価する基本的試験である 3 点曲げ CTOD 試験を行った．3 点曲げ CTOD 試験の概要を図 3.6 に示す．

原厚のままの試験片の中央部に機械切欠きを設け，3 点曲げ繰返し載荷により機械切欠き先端に疲労予き裂を導入する．その後，所定の温度に保持した槽内で 3 点曲げ静的載荷を行い，荷重と切欠き部の開口変位の関係を得る．試験温度の範囲は-100℃～20℃とし，3 点曲げ静的載荷により試験片が脆性破壊する温度条件を明確にするため，適宜試験温度を選択して実験を実施した．-40℃における実験状況を図 3.7 に示す．

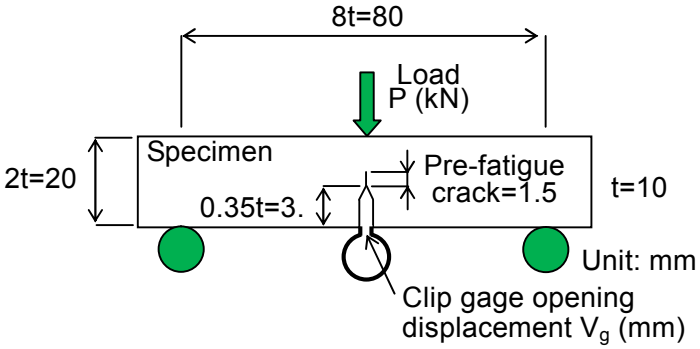


図 3.6　3 点曲げ CTOD 試験の概要

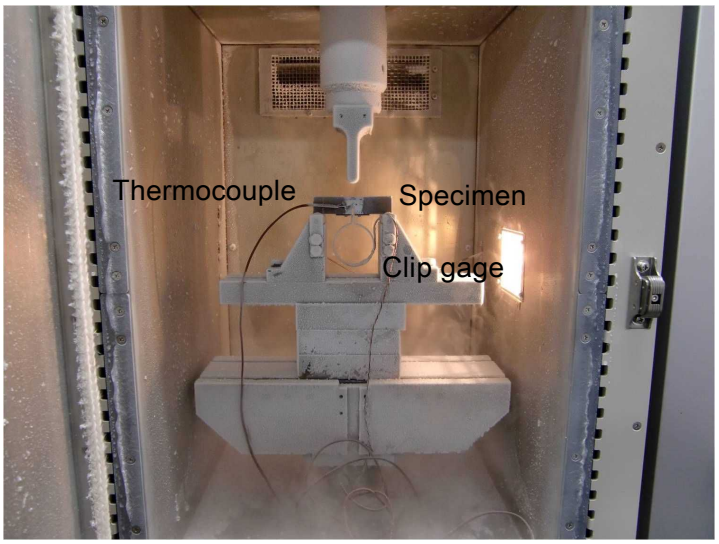


図 3.7　3 点曲げ CTOD 試験の状況（-40℃）

各試験温度条件下で得られた荷重とクリップゲージ開口変位の関係を図 3.8 および図 3.9 に示す．図 3.8 は試験温度が-40℃よりも高温側では脆性破壊が発生しなかったケースである. 図 3.9 は試験温度が-45℃よりも低温側で, 脆性破壊が発生したケースを示す. なお，全てのケースにおいて載荷中のポップイン破壊は観察されなかった．図中に実線で示す荷重とクリップゲージ開口変位の関係から, シンボルで示す最大荷重 P_m の時の開口変位 V_m を求めた．さらに，図中に点線で示すように V_m から弾性域の傾きによって求められる弾性変位量をオフセットし，変位の塑性成分 V_P を得た．この開口変位 V_P を用いて，式(3.3)により限界 CTOD 値を求めた.

限界 CTOD 値と試験温度との関係を図 3.10 に示す．図中，オープンシンボルは延性破壊，ソリッドシンボルは脆性破壊したことを表している．経年鋼材 C 材は，－40℃以上では脆性破壊しない結果となった.

$$\delta_{cr} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_Y E} + \frac{r_p(W-a_0)V_p}{r_p(W-a_0)+a_0+z} \tag{3.3}$$

$$K = \frac{YP_m}{BW^{1/2}}$$

$$Y\left(\frac{a_0}{W}\right) = 4\left[2.9\left(\frac{a_0}{W}\right)^{1/2} - 4.6\left(\frac{a_0}{W}\right)^{3/2} + 21.8\left(\frac{a_0}{W}\right)^{5/2} - 37.6\left(\frac{a_0}{W}\right)^{7/2} + 38.7\left(\frac{a_0}{W}\right)^{9/2}\right]$$

ここに，

σ_Y：試験温度における降伏応力または 0.2%耐力

E：ヤング率（200GPa）

ν：ポアソン比（0.3）

W：試験片幅（20mm）

B：試験片厚さ（10mm）

a_0：初期き裂長さ（本実験の場合，10.0mm）

z：ナイフエッジの高さ（本実験の場合，1.0mm）

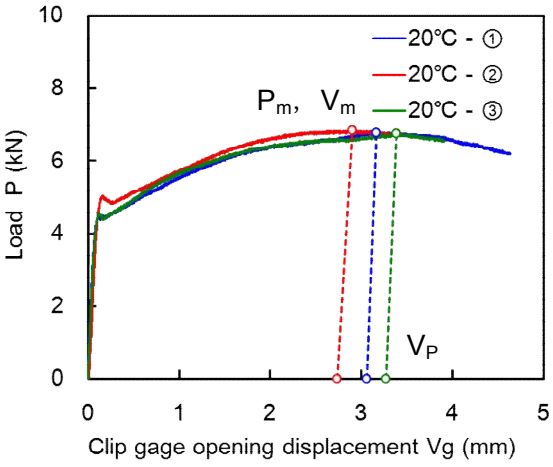
P_m：最大荷重

V_p：最大荷重 P_m の時の開口変位の塑性成分

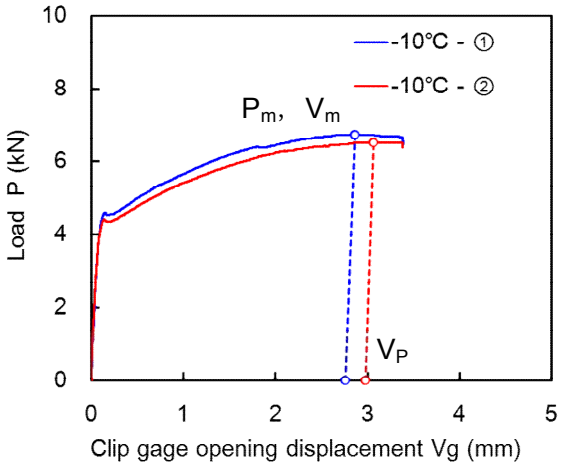
r_p：V_p に対する回転係数（=0.4）

なお，各試験温度における降伏応力または 0.2%耐力 σ_Y は，室温の降伏応力 $\sigma_{Y0}(MPa)$ から式(3.4)により計算した．式中の T は試験温度(℃)である．

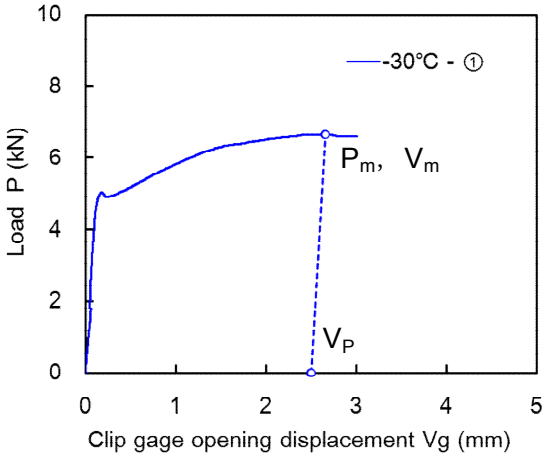
$$\sigma_Y = \sigma_{Y0}\exp\left\{(481.4 - 66.5\ln\sigma_{Y0}\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{293}\right))\right\} \tag{3.4}$$



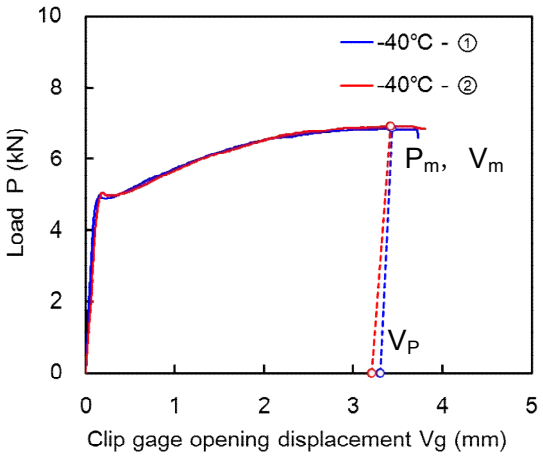
(a) 試験温度 20℃



(b) 試験温度-10℃

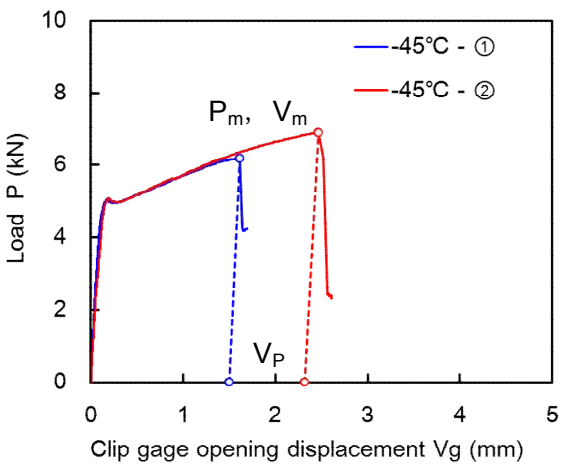


(c) 試験温度-30℃

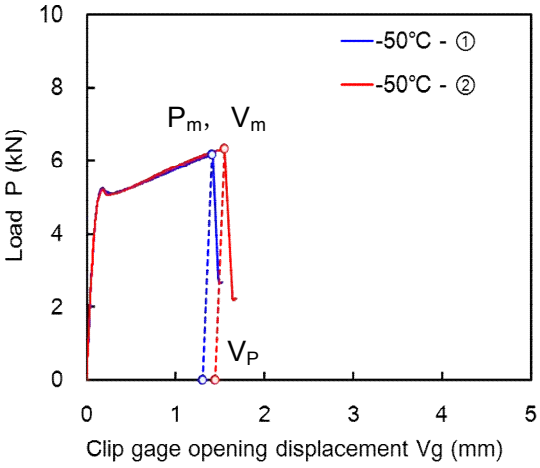


(d) 試験温度-40℃

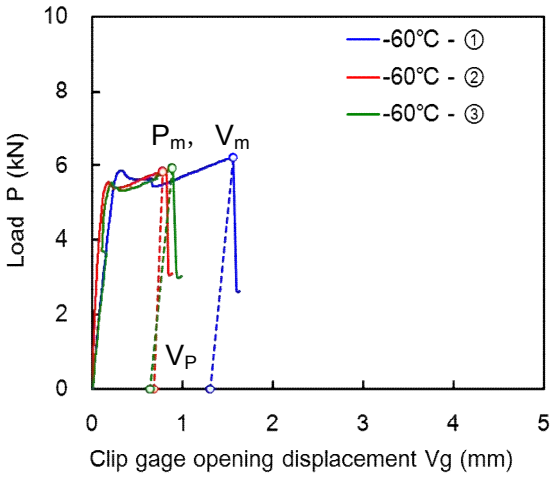
図 3.8　荷重－開口変位関係（試験温度-40℃以上）



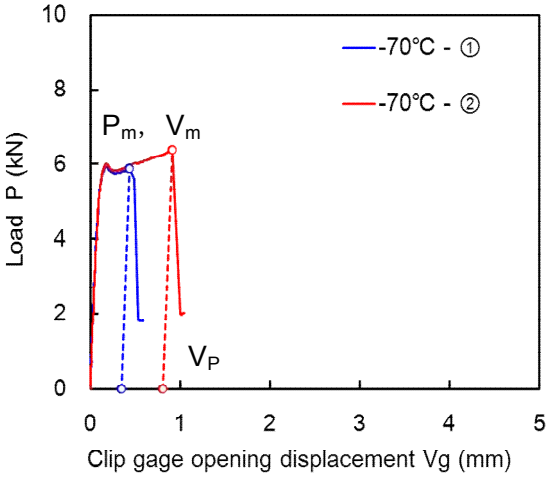
(a) 試験温度-45℃



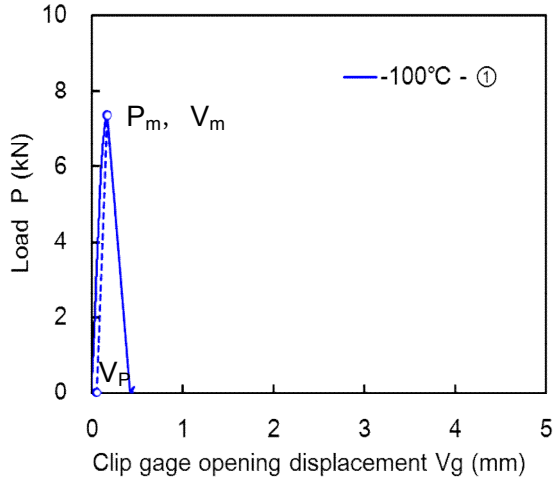
(b) 試験温度-50℃



(c) 試験温度-60℃



(d) 試験温度-70℃



(e) 試験温度-100℃

図 3.9　荷重－開口変位関係（試験温度-45℃以下）

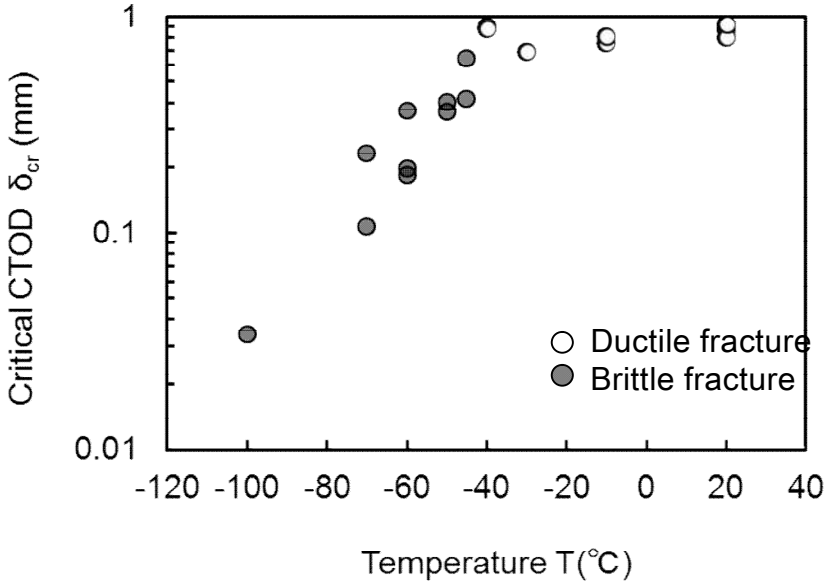


図 3.10　限界 CTOD 値－試験温度関係

3.5.2　厚さの異なるシャルピー試験片による遷移温度の交換の妥当性

3.5.1 に示したように, 限界 CTOD 値とシャルピー衝撃試験により得られる吸収エネルギーとの間には相関性があることが知られており，時間と労力を要する CTOD 試験の代用としてシャルピー衝撃試験を行い，破壊靭性を簡便に評価する手法が一般に広く用いられている．すなわち，式(3.2)のシャルピー吸収エネルギーと限界 CTOD 値との相関式を用いることで, シャルピー吸収エネルギーから限界 CTOD 値を推定することができる．ただしこれは，シャルピー衝撃試験の試験片厚さが 10mm，すなわちフルサイズ試験片を対象としたものであり，サブサイズやハーフサイズなど，フルサイズ試験片に比べ，薄い板厚の試験片を用いてシャルピー衝撃試験を行う場合は，得られた吸収エネルギーの遷移曲線をフルサイズ試験片の遷移曲線に換算する必要がある．しかし，この換算方法の正当性には不明な点が多々ある．

図 3.11(a)および(b)中の青色の実線は，C 材に対し実施したシャルピー衝撃試験から得られたサブサイズおよびハーフサイズ試験片の吸収エネルギーの遷移曲線（図 3.4(c)）を式(3.2)に適用し作成した限界 CTOD 値の推定遷移曲線（「変換なし」と記す）である．この推定遷移曲線による実験結果の再現精度は低いことがわかる．エネルギー遷移温度 vT_E に式(3.2)に示す ΔT を加算した温度（vT_E+ΔT）は延性破壊－脆性破壊の境界温度（－40℃）に対応するはずであるが，両者は乖離している．

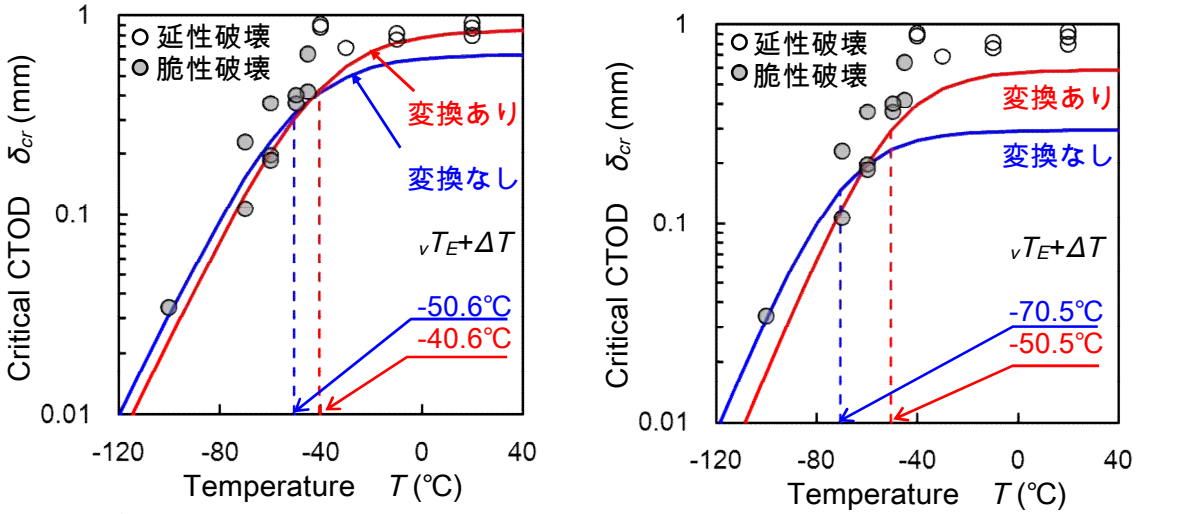
これに対し，吸収エネルギーが試験片厚さに比例する [3.10)']とし，さらに，サブサイズおよびハーフサイズ試験片のエネルギー遷移温度に 10℃および 20℃を加算する [3.5)']ことで，フルサイズ試験片の吸収エネルギー遷移曲線に変換した．この変換後の吸収エネル

ギー遷移曲線に式(3.2)を適用して得られた限界 CTOD 値の推定遷移曲線（「変換あり」と記す）を赤色の実線で示す．この推定遷移曲線は実験結果の傾向を比較的良く表現している．変換なしの場合と比べれば，$vT_E+\Delta T$ は延性－脆性破壊の境界温度（－40℃）に近い温度を示している．

以上，サブサイズおよびハーフサイズ試験片のシャルピー吸収エネルギーを，試験片の厚さに比例してフルサイズ試験片の吸収エネルギーに変換（サブサイズ：10/7.5 倍，ハーフサイズ：10/5 倍）すること，ならびに，エネルギー遷移温度にそれぞれ 10℃，20℃を加算してフルサイズ試験片のエネルギー遷移温度に変換することの正当性を結果は示唆している．

なお，サブサイズおよびハーフサイズ試験片のエネルギー遷移温度に上述の変換を行った場合でも，ハーフサイズ試験片よりもサブサイズ試験片の方が，エネルギー遷移温度による延性－脆性破壊の境界温度の推定精度は高い傾向を示した．

この傾向から，鋼道路橋における経年鋼材の材料特性評価においてシャルピー衝撃試験を実施する際，フルサイズ試験片が採取できず，サブサイズ，ハーフサイズ試験片を用いる場合，可能な限り原厚に近い試験片厚さを選定することの重要性を一連の実験結果は示唆している．



(a) サブサイズシャルピー試験結果による限界 CTOD 値の推定遷移曲線

(b) ハーフサイズシャルピー試験結果による限界 CTOD 値の推定遷移曲線

図 3.11　C 材に対する CTOD 試験結果

3.5.3　3 点曲げ CTOD 試験結果の再考

C 材に対する 3 点曲げ CTOD 試験の結果を再考する．WES2805 には，破壊靭性の評価として，限界 CTOD 値とシャルピー衝撃試験により得られる吸収エネルギーとの相関性を利用して簡便に評価する手法が式(3.2)に示されている．

$$\delta_{cr}(T)=\frac{1}{250}vE(T+\Delta T) \qquad \Delta T=87-0.10\sigma_{Y0}-6\sqrt{t} \tag{3.2}$$

ここに，

$\delta_{cr}(T)$：限界 CTOD 値（mm）

vE　：シャルピー吸収エネルギー（J）

T　：温度（℃）

σ_{Y0}　：常温における降伏応力（MPa）

t　：板厚（mm）

経年鋼材に対する適用性の確認を目的として，C 材に対して三点曲げ CTOD 試験[4.10)]を行った．限界 CTOD 値と試験温度との関係を図 3.11 に示す．図中，白抜きのシンボルは延性破壊，黒塗りのシンボルは脆性破壊したことを表している．CTOD 試験の結果から，C 材は，最低使用温度-40℃以上で脆性破壊は生じない結果となる．

一方，吸収エネルギーの遷移温度は，式(3.2)の ΔT を介して限界 CTOD 値に対応する傾向を示しており，本試験で用いた，供試鋼材においても相関性が確認できる．

シャルピー衝撃試験におけるエネルギー遷移温度 vT_E は，CTOD 試験における延性破壊－脆性破壊の境界となる温度に対応している．このため，シャルピー衝撃試験による簡便な破壊靭性の評価は，吸収エネルギーの大小よりも，エネルギー遷移温度が重要な指標であるといえる．

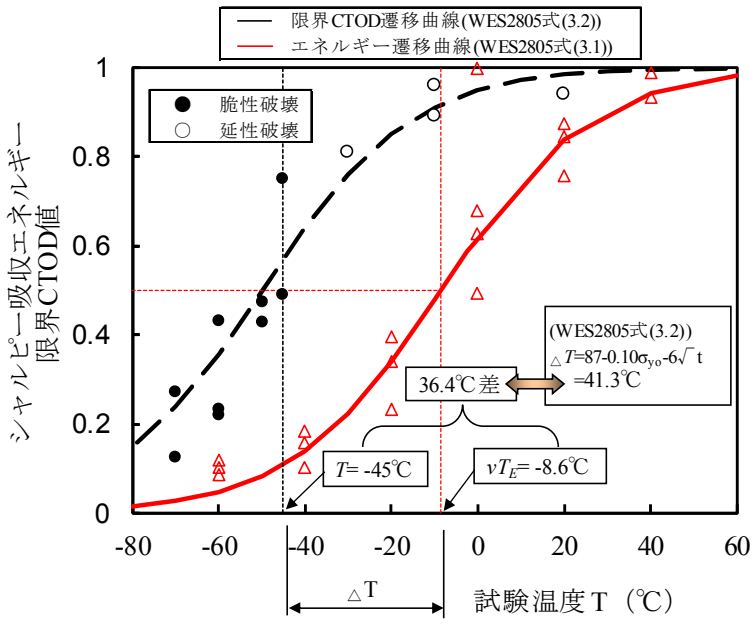


図 3.11　供試鋼材 C 材の限界 CTOD 値とエネルギー遷移温度の相関
（無次元化）

3.6 経年鋼材に対する脆性破壊発生有無の評価・判定法の提案

WES3003 では, 式(3.5)により低温下における鋼材の脆性破壊発生の可能性, すなわち, 使用可否を判定する.

$$ {}_{V}T_{E}req = T + 166.3 - 0.13\sigma_{Y0} - 6\sqrt{t} - \begin{cases} \dfrac{17976}{\sigma_{Y0}}\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{Y0}} + 0.6\right) & \sigma_{Y0} \leqq 390 \\ 0.45\sigma_{Y0}\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{Y0}} + 0.6\right)\exp\left(-\dfrac{\sigma_{Y0}}{294}\right) & \sigma_{Y0} > 390 \end{cases} \tag{3.5} $$

ここに,

${}_{V}T_{E}req$：エネルギー遷移温度の要求値（℃）

σ　：使用応力（許容応力）（MPa）

σ_{Y0}　：公称降伏応力（MPa）

t　：板厚（mm）

T　：最低使用温度（℃）

上式より，評価対象鋼材のエネルギー遷移温度の要求値（${}_{V}T_{E}req$）が求められる.

シャルピー衝撃試験により得られたエネルギー遷移温度（${}_{V}T_{E}$）が要求値（${}_{V}T_{E}req$）より低ければ, その鋼材は温度 T の環境下で脆性破壊することなく使用可能と判定される.

ここで，前章で述べたフルサイズ変換を行う．サブサイズおよびハーフサイズ試験片を用いてエネルギー遷移温度（${}_{V}T_{E}$）を求めた場合, エネルギー遷移温度の要求値（${}_{V}T_{E}req$）は式(3.5)で求めた値からサブサイズは 10℃，ハーフサイズは 20℃差し引いて評価する（vT_{E}(7.5mm)：-10℃，vT_{E}(5mm)：-20℃）．使用可否の判定は，エネルギー遷移温度の要求値 ${}_{V}T_{E}req$ を，シャルピー衝撃試験から得られたエネルギー遷移温度 ${}_{V}T_{E}$ に置き換えることで，評価対象鋼材の使用限界温度 T'を求め，架橋地点の最低使用温度と比べて評価するものである.

経年鋼材に対し，上述の手法で使用の可否を判定した結果を表 3.5 に示す.

現在も供用されている橋梁から採取した A 材，B 材の使用限界温度（－60℃以下）は現在の鋼材（P 材）の使用限界温度（－58℃）よりも低く，実環境の最低温度（－35℃）において十分に使用可能と判定できる.

一方，既に撤去された経年橋梁に使用されていた C 材，D 材は，実環境の最低使用温度よりも高温側で脆性破壊が発生する危険性があると判定される．ただし，C 材に対して実施した CTOD 試験の結果では，最低使用温度（－35℃）以上で脆性破壊することはなかった．以上から，WES3003 による低温下における鋼材の使用可否判定手法は，破壊靭性試験に比べて，厳しい評価を示唆しており．本手法は低温下における鋼材の新しい靭性評価法と成り得る可能性を示した.

表 3.5 経年鋼材の使用可否判定の検討

鋼材	板厚 t	最低使用温度 T	シャルピー試験片厚さ	エネルギー遷移温度（実験値） vT_E	エネルギー遷移温度（要求値） $vT_E\,req$	使用可否判定 $vT_E < vT_{E\,req}$	エネルギー遷移温度（変換後） $vT_E{}'$	使用限界温度 T_{min}	備考
	mm	℃	mm	℃	℃		℃	℃	
A	6	-35	5	-52.8	-21.2	○	-32.8	-67	供用中
B	6	-35	5	-46	-21.2	○	-26	-60	
C	10	-35	7.5	-9.3	-15.5	×	0.7	-28	撤去済
			5	-29.2	-25.5	○	-9.2	-38	
D-W	8	-25	5	-25.3	-13.5	○	-5.3	-48	
D-F	19		10	18.2	-2.7	×	18.2	-4	
			7.5	11.7	-12.7	×	21.7	0	
			5	-0.2	-22.7	×	19.8	-2	
P	9	―	7.5	-37.9	―	―	-27.9	-59	比較材

vT_E ：シャルピー衝撃試験による吸収エネルギー遷移曲線から求めた遷移温度（フルサイズ変換前）

$vT_E\,req$ ：式(3.5)から求まる最低使用温度(T)におけるエネルギー遷移温度の要求値（フルサイズ変換後）

$vT_E{}'$ ：エネルギー遷移温度(vT_E)のフルサイズ変換後

T_{min} ：$vT_E{}'$を用いて式(3.6)から求めた使用限界温度

	単位	A材	B材	C材		D-W材	D-F材			P材
		SM41W	SS41	SS41		SS41	SS41			SS400
t ：供試体板厚	mm	6	6	10	10	8	19	19	19	9
t' ：試験片厚	mm	5	5	7.5	5	5	10	7.5	5	7.5
T ：最低遭遇温度	℃	-35	-35	-35	-35	-25	-25	-25	-25	---
σ_{yo} ：降伏点応力度(σy)	MPa	245	245	245	245	245	245	245	245	245
σ ：許容応力度	MPa	140	140	140	140	140	140	140	140	140
$vT_E req$ ：要求遷移温度	℃	-1.2	-1.2	-5.5	-5.5	6.5	-2.7	-2.7	-2.7	---
フルサイズ変換値※	℃	-20	-20	-10	-20	-20	0	-10	-20	---
$vT_E req$ ：遷移温度（フルサイズ変換後）	℃	-21.2	-21.2	-15.5	-25.5	-13.5	-2.7	-12.7	-22.7	---
vT_E ：遷移温度（実験結果）	℃	-52.8	-46.0	-9.3	-29.2	-25.3	18.2	11.7	-0.2	-37.9
フルサイズ変換値※	℃	20	20	10	20	20	0	10	20	10
$vT_E{}'$ ：遷移温度（フルサイズ変換後）	℃	-32.8	-26.0	0.7	-9.2	-5.3	18.2	21.7	19.8	-27.9
T_{min} ：最低使用温度	℃	-66.6	-59.8	-28.8	-38.7	-36.8	-4.1	-0.6	-2.5	-58.4

フルサイズ変換値※：シャルピー試験片厚に応じて遷移温度に加算する温度（$vT_E(t'7.5)$=10℃、$vT_E(t'5.0)$=20℃）

3.7　本章のまとめ

北海道各地で約 50 年以上供用された経年橋梁に用いられていた経年鋼材（SS41 相当）に対し，化学組成，機械的性質，シャルピー衝撃試験および CTOD 試験など，一連の実験を実施した．得られた主な結果は以下の通りである．

(1) 経年鋼材の化学成分について，SM400A の規格と比較すると，特に S 量が多く含まれている鋼材があった．機械的性質は概ね SM400A の基準を満たしていたが，引張試験において，くびれが生じずに最大荷重時に破断したものがあった．また，現在の SM400A に比べ，シャルピー衝撃特性が劣る経年鋼材が存在することを示した．

(2) 経年鋼材の一種類に対して 3 点曲げ CTOD 試験を実施した結果，この経年鋼材については－40℃以上では脆性破壊しないことを確認した．一方，サブサイズおよびハーフサイズ試験片から得られたシャルピー吸収エネルギーの遷移曲線から限界 CTOD 値の遷移曲線を推定した結果，推定精度が低い結果となった．

(3) サブサイズおよびハーフサイズ試験片の吸収エネルギーをフルサイズ変換して，吸収エネルギーの遷移曲線に変換した．これを用い，限界 CTOD の遷移曲線を推定すると，必ずしも整合しないものの，一部の鋼材においては実験結果を比較的精度良く再現することができた．また，原厚に近い試験片のエネルギー遷移曲線を用いた方が，延性－脆性破壊の境界温度の推定精度が高いことがわかった．

(4) 供試鋼材 C 材に対して三点曲げ CTOD 試験を実施した結果，吸収エネルギー遷移温度は ΔT を介して限界 CTOD 値に対応しており，本試験に関して，経年鋼材においても相関性が高いことを確認した．エネルギー遷移温度 vT_E は，CTOD 試験における遷移温度に対応するため，エネルギー遷移温度が重要な指標であることを示した．

(5) 経年鋼材の材料特性評価においてシャルピー衝撃試験を実施する際，サブサイズ，ハーフサイズ試験片を用いた場合，試験片厚さが薄くなるほどエネルギー遷移温度が低下する特徴を念頭に置いておく必要があることを記した．また，可能な限り原厚に近い試験片厚さを選定することの重要性を一連の実験結果は示唆した．

(6) WES3003 を準用し，寒冷地における経年鋼材の脆性破壊発生有無の可能性を判定した．現在も供用されている経年橋梁から採取した鋼材の使用限界温度（－60℃以下）は，実環境の最低温度（－35℃）において十分に使用可能であることがわかった．

(7) 既に撤去された経年橋梁に使用されていた鋼材は，最低使用温度よりも高温側で脆性破壊する可能性があると判定された．D-F 材は，採取した供試鋼材で最も古く，シャルピー衝撃特性は，他の供試鋼材よりも劣る結果を示した．なお，D 材建設当時の鋼材規格に衝撃値の規定がなく，当時としては使用性に問題のない鋼材であった．なお，これらの鋼材のうち一種類に対して実施した CTOD 試験では，最低使用温度以上では脆性破壊しない結果となった．この結果は，WES3003 による手法は鋼材の破壊靭性を厳しく評価・判定する可能性を示唆し，本手法は低温下における鋼材の新しい靭性評価法と成り得る可能性を示した．

参考文献（第 3 章）

3.1) 北海道開発局土木試験所構造研究室：鋼材の低温域における溶接性と安定性に関する試験調査（鋼材のシャルピー衝撃試験結果の整理集計），1985.

3.2) 日本工業規格：溶接構造用圧延鋼材 JIS G3106，2008．溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 JIS G3114，2008.

3.3) 日本溶接協会：き裂先端開口変位（CTOD）試験方法 WES1108，1995.

3.4) 日本工業規格：金属材料のシャルピー衝撃試験方法 JIS Z2242，2009.

3.5) 日本溶接協会：低温用圧延鋼板判定基準 WES3003，1995.

3.6) 金裕哲，廣畑幹人，松縄秀範，表真也，三田村浩：寒冷地における経年鋼材に対する脆性破壊発生有無の評価・判定，鋼構造年次論文報告集，Vol.20，pp.599-606，2012.

3.7) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，2012.

3.8) 日本工業規格：金属材料引張試験方法 JIS Z2241，2011.

3.9) 日本溶接協会：溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法 WES2805，2007.

3.10) American Society for Testing and Materials：A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products，2010.

3.11) 例えば，日本金属学会強度委員会：金属材料の強度と破壊，1964.

第4章　経年鋼材の使用安全性に関する評価

4.1　概説

近年，橋梁の延命化策として予防保全型管理への転換が推進されている．鋼橋においても，腐食や経年変化に伴う劣化が顕在化するなど，これらを適切に維持管理していくことの重要性が指摘されている.北海道では,多くの橋梁が高度経済成長期に建設され,今後，急速に高齢化が進む [4.1),4.2)]ことから修繕や架替えにかかる費用が大きな財政負担となることが予想され，重要課題となっている．従来の事後保全型の維持管理を継続した場合，安全・安心の確保のための適切な維持管理を続ける事が困難となることが危惧されている.

北海道は，冬期の最低気温が－40℃近くに達する寒冷地であると共に地震多発地域でもある．鋼橋では地震により主桁端部の損傷が数多く報告 [4.3)]されている．鋼材は，低温下において衝撃特性が著しく低下することが知られている．第 3 章に示した化学組成や遷移温度が劣る経年橋梁においては，溶接継手部に内在する初期欠陥や疲労き裂等の応力集中部の存在下で，環境温度が低下した場合に過大荷重が付与されると，脆性破壊が発生する危険性が高くなる.そのため,これらの地域に架設された鋼橋の維持管理には,脆性破壊発生防止の観点から，経年鋼材の材料特性を把握しておくことが重要である．しかし，現在までに寒冷地における経年鋼材の材料特性について研究成果や文献がほとんど無い状況が続いている.

これまでの実験結果や既往文献から，経年鋼材の衝撃特性に影響する要因として，化学成分や製鋼技術などが関与することが知られている [4.4)]．本章では，寒冷地における経年鋼材の使用安全性について評価・検討 [4.5)]することを目的として，第 3 章で示した経年鋼材を用いた材料特性試験の結果 [4.6)]と既往文献の公表資料 [4.7)]を用いて，エネルギー遷移温度と化学成分の関係に着目して，経年鋼材の相対的な靭性の傾向を考察した.

4.2 JIS における低温下での使用条件の検証

従来から多くの規定は経験則に基づくシャルピー衝撃値により規定されてきた．シャルピー吸収エネルギーは，靭性評価において相対的な指標といわれている．しかし，JIS の靭性要求値を基に建設された鋼橋には長い安全実績があり，シャルピー吸収エネルギーが靭性評価において相対的な指標とされる所以である．そこで，JIS の靭性要求値と低温下での使用条件について検証を試みた．

鋼橋の主要部材に用いる構造用鋼板は，JIS-G-3106,3114 の SM 材に代表される．この規格では，シャルピー衝撃試験で，規定した試験温度に対する吸収エネルギーが要求[4.8)]されている．JIS で要求する試験温度と吸収エネルギーを表 4.1 に示す．シャルピー衝撃試験は動的試験のため，要求される試験温度（$vT_{(0℃)}$，$vT_{(-5℃)}$）は，外気温（使用温度と称する）とは異なる．そこで，JIS で要求される試験温度に対応する使用温度を知ることで，要求される吸収エネルギーとの関係に意味を持つ．WES3003 式 (3.5)のエネルギー遷移温度の要求値（${}_{V}T_{E}req$）と最低使用温度（T）を，試験温度と使用温度に置き換えて式(4.1)に示す．

$$T = {}_{V}T - 166.3 + 0.13\sigma_{Y0} + 6\sqrt{t} + \frac{17976}{\sigma_{Y0}}\left(\frac{\sigma}{\sigma_{Y0}} + 0.6\right) \tag{4.1}$$

ここに，

${}_{V}T$　：試験温度（℃）

σ　：使用応力（許容応力）（MPa）

σ_{Y0}　：公称降伏応力（MPa）

t　：板厚（mm）

T　：使用温度（℃）

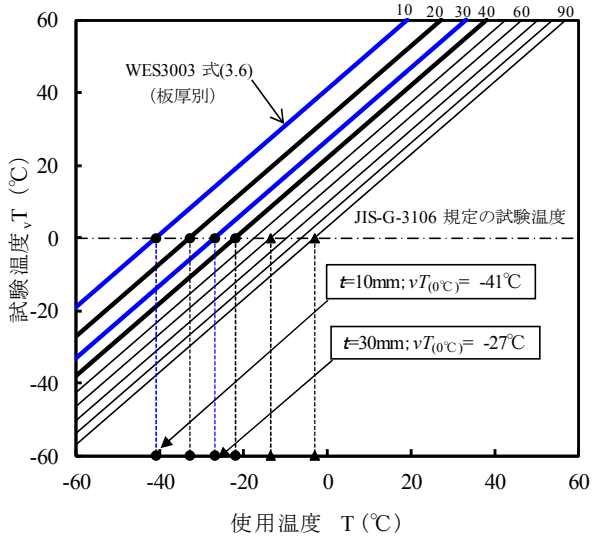
表 4.1　JIS の規格する橋梁用鋼材の靭性要求値[4.8)]

JIS	鋼種	試験温度 ℃	シャルピー吸収エネルギー J
G 3106	SM400B	0	27以上
	SM400C	0	47以上
	SM490B	0	27以上
	SM490C	0	47以上
	SM490YB	0	27以上
	SM520C	0	47以上
	SM570	-5	47以上
G 3114	SMA400BW	0	27以上
	SMA400CW	0	47以上
	SMA490BW	0	27以上
	SMA490CW	0	47以上
	SMA570W	-5	47以上

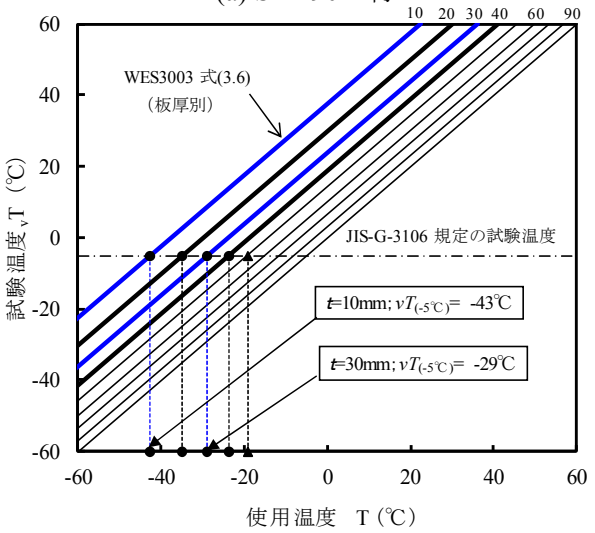
Vノッチ圧延方向

式(4.1)を用いて，試験温度（$vT_{(0℃)}$ ，$vT_{(-5℃)}$）に対応する使用温度との関係を，母材板厚をパラメータとして図 4.1 に示す．図中，縦軸はシャルピー衝撃試験の試験温度で，横軸は使用温度を，破線は規定の試験温度 $vT_{(0℃)}$，$vT_{(-5℃)}$を示す．この図から，490MPa 級鋼の場合，板厚 10mm では使用温度-41℃，板厚 30mm では-27℃に相当する．570MPa 級鋼においても同様のことがいえる．すなわち，板厚 30mm 程度よりも薄い鋼板については，JIS の要求試験温度に対応する使用温度は，約-30℃以下に相当するといえる．

ここで，北海道の最低気温分布図[4.9]を図 4.2 に，設計温度変化範囲[4.9]を表 4.2 に示す．最低温度が-30℃よりも高温側の地域は，図 4.2 から北海道全面積の 85%に相当する．すなわち，経年橋梁は薄板で構成されることが多く，JIS の要求試験温度で要求される吸収エネルギーを有する鋼材は，長い安全実績からも低温下においても一定の安全性を有する相対的指標といえる．

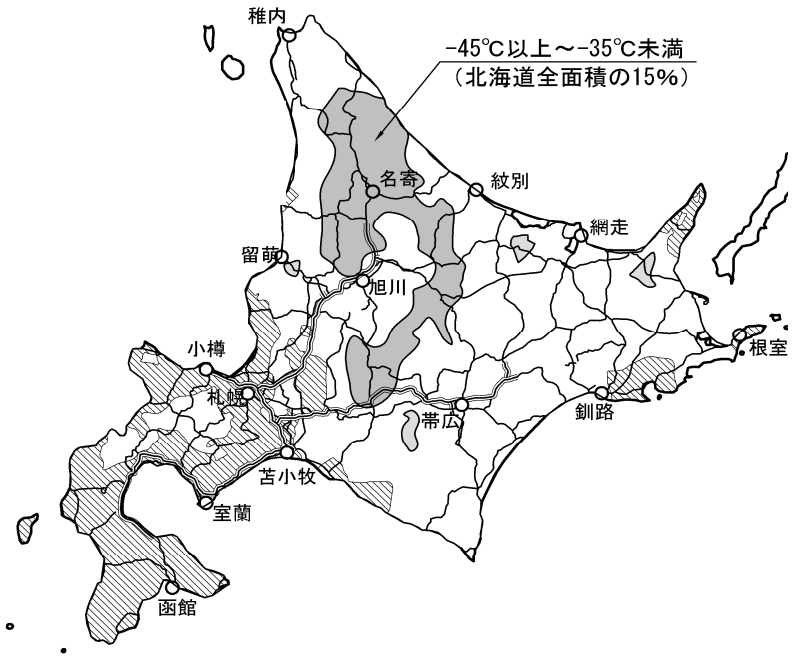


(a) SM490Y 材



(b) SM570 材

図 4.1　JIS の規定する試験温度に対応する使用温度



凡例	地域	面積比	
	－45℃以上～－35℃未満	15%	
	－35℃以上～－25℃未満	63%	85%
	－25℃以上	22%	

図 4.2　北海道の最低温度分布 [4.9)]

表 4.2　鋼橋の設計温度変化範囲 [4.9)]

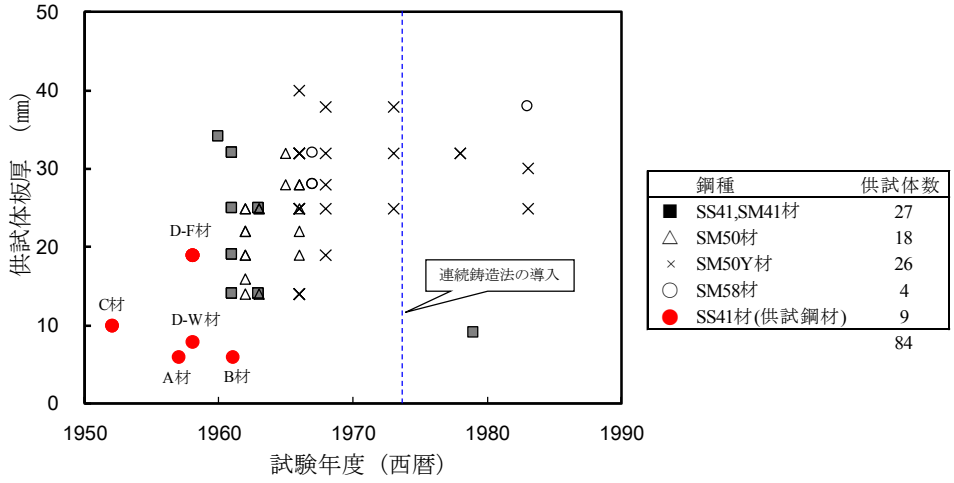
地域	設計温度変化範囲（℃）		
	最低温度	最高温度	温度変化
－45℃以上～－35℃未満	- 40	+ 40	80
－35℃以上～－25℃未満	- 30	+ 40	70
－25℃以上	- 20	+ 40	60

4.3　経年鋼材の相対的な靭性評価

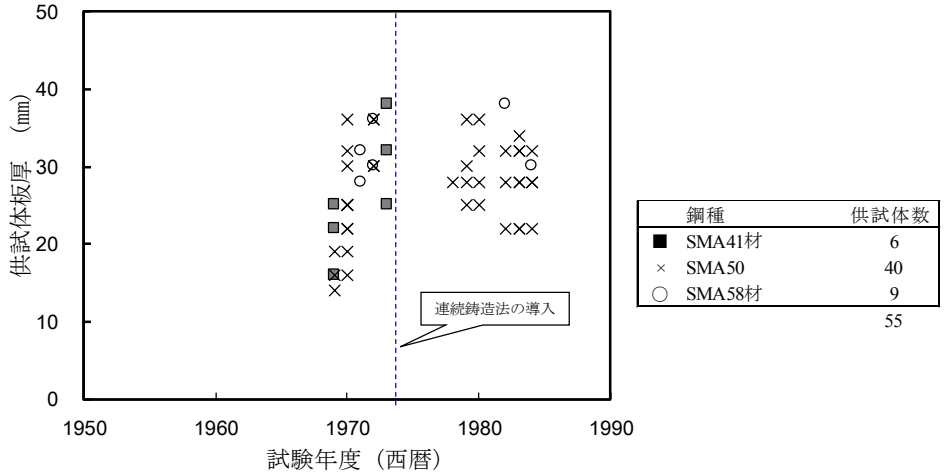
経年鋼材の靭性評価には，より多くの経年鋼材を用いた試験結果が必要である．ここでは，経年鋼材の鋼種ごとの特性について相対的指標を得ることを目的として，供試鋼材の試験結果と北海道の鋼種選定の基となった既往のシャルピー衝撃試験の結果 [4.7)]をあわせて考察する．

4.3.1　供試体の試験年度

図 4.3 に，全データの試験年度（供試鋼材は建設年度）と供試体の鋼種別の板厚分布を示す. 既往の試験結果は, 1960 年から 1985 年までの 25 年間にわたり実施されてきた. 図中，青色の破線は，従来の造塊法から連続鋳造法が導入されたといわれる [4.4)']1970 年代半ばを示している．この時代を境に，S 量が急激に低下したといわれている [4.4)']．



(a) 普通鋼材



(b) 耐候性鋼材

図 4.3　シャルピー衝撃試験の試験年度と供試体板厚の分布

4.3.2　エネルギー遷移温度と最低使用温度の関係

全ての供試体の母材および溶接部のエネルギー遷移温度（$_{\nu}T_E$）と供試体の母材板厚との関係を，最低使用温度をパラメータとして図 4.5 に示す．既往文献の試験結果は，WES2805 式(3.1)を用いて，吸収エネルギーに最小 2 乗法を適用してエネルギー遷移温度 $_{\nu}T_E$ を求めた．また，サブサイズ試験片およびハーフサイズ試験片を用いた試験結果はフルサイズ変換後の遷移温度で図示した．WES3003 式(3.5)から求めた最低使用温度との関係を示す．

図中，実線および破線は，最低使用温度（-40℃,-30℃,-20℃）の限界線を示す．黒色の実線は設計応力を許容応力度の上限とした場合，赤色の破線は設計応力を許容応力度の 80%とした場合の限界線である．設計応力を 20%低減した場合，400MPa 級鋼で約 10℃ほど最低使用温度が高温側に移行することがわかる．すなわち，発生応力が許容応力に対して余裕がある部位に使用されている鋼材は，脆性破壊に対する危険性が低下する．しかしながら，図 4.5(a)の 400MPa 級の鋼種では，多くの供試体の遷移温度が赤点線よりも高温側に点在しており，設計応力に余裕がある部位に使用されていても，低温下において脆性破壊に対して危険性が高いといえる．特に D-F 材は極めて高温側の遷移温度を示しており，図 4.6 に示す吸収エネルギー遷移曲線からも著しく衝撃特性が劣る鋼材であることが分かる．

一方，母材と溶接部の遷移温度に着目すると，図 4.5(a),(e)の 400MPa 級は，相対的に溶接部よりも母材の遷移温度が高温側に見られる．これは当時の 400MPa 級の鋼種は，母材の品質が低い材料が多く存在することを示唆しているといえる．これら，400MPa 級の実験はすべて，図 4.4 の試験年度から 1960 年代前半以前の鋼材で，JIS 規格のシャルピー吸収エネルギー要求値が規格化される前に製鋼された鋼材である．

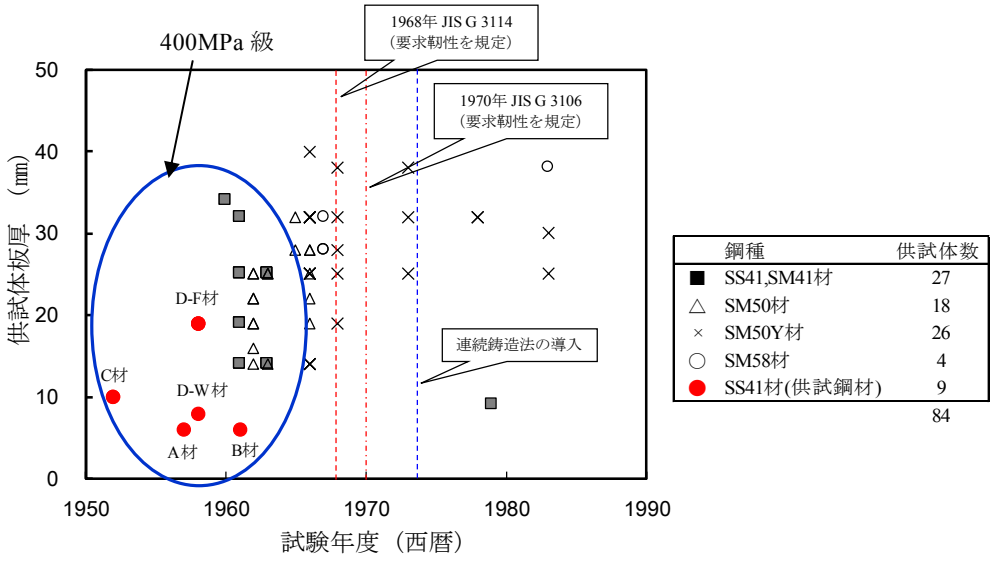


図 4.4　シャルピー衝撃試験の試験年度と供試体板厚の分布

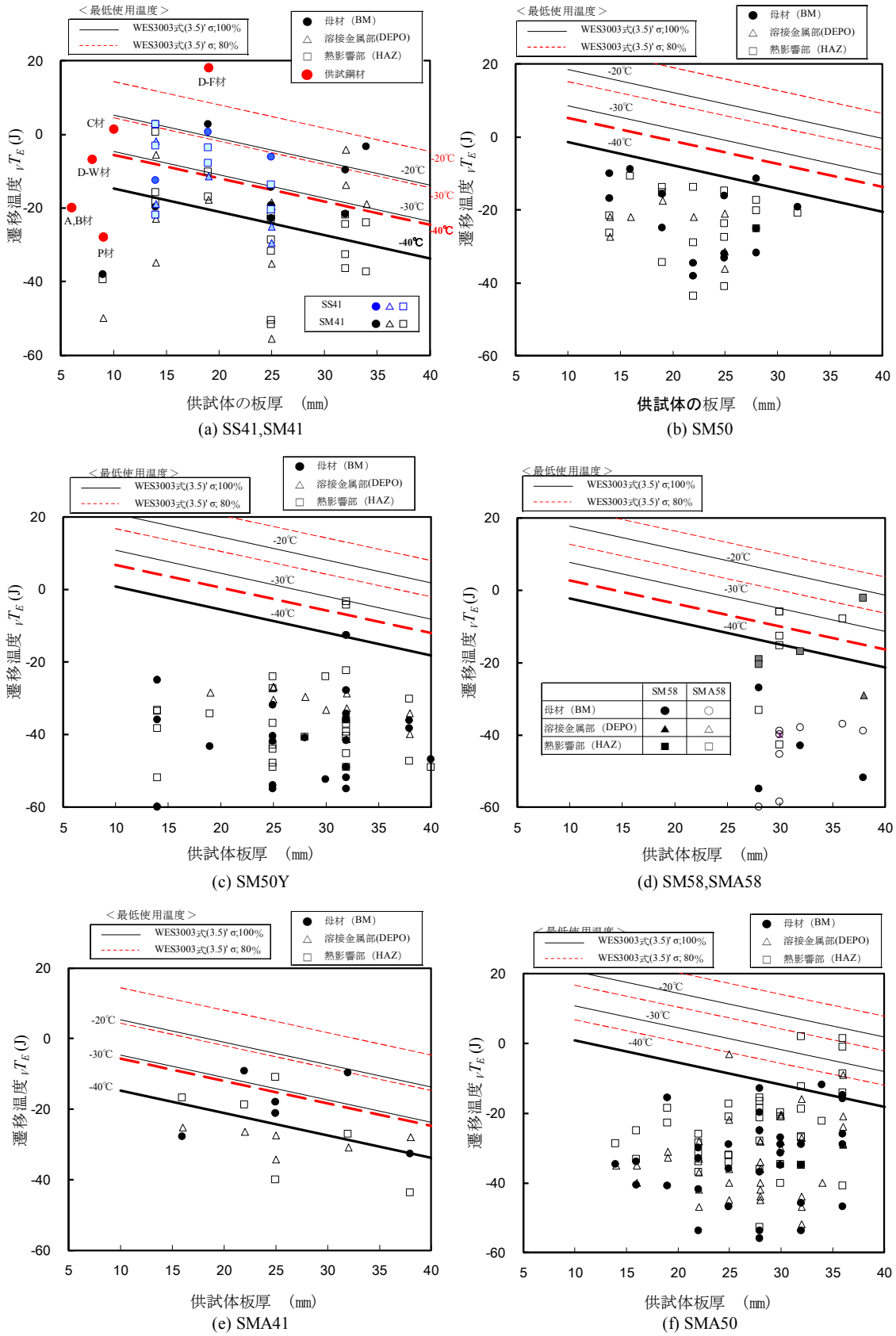


図 4.5　エネルギー遷移温度と最低使用温度

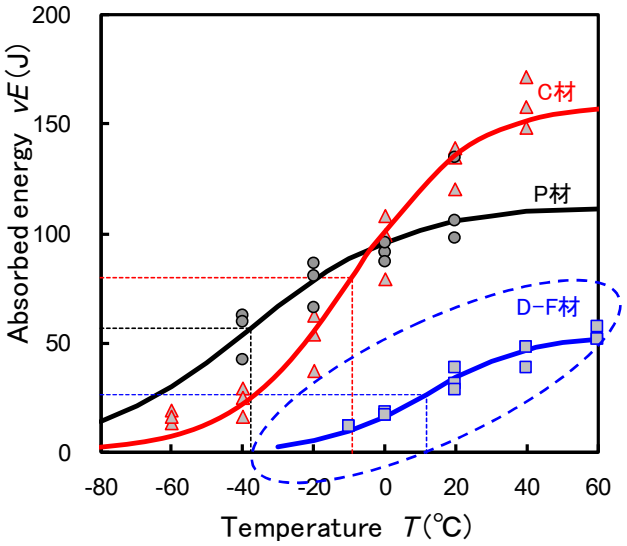


図 4.6　経年鋼材の吸収エネルギー遷移曲線図
（試験片厚 7.5mm）

4.3.3　JIS の要求試験温度における吸収エネルギーとの関係

全ての供試体の母材および溶接部の吸収エネルギーと供試体板厚の関係を図 4.7 に示す．図中点線は，現在の JIS で規定される吸収エネルギー要求値（$vT_{(0℃)}$≧27J など）を現す．SS41 材や SM400A 材など，現在の JIS 規定で吸収エネルギーの要求値が規定されていない鋼種も含めた．母材と溶接部を同一図で表現したため，全体的にどの鋼種もばらつきが大きく見える．吸収エネルギーの要求値は厳しいレベルではないが，図 4.7 (a)の 400MPa 級と図 4.7 (b)の 490MPa 級では，一部の母材で吸収エネルギーの要求値を下回る鋼材がある．これらの鋼材は，図 4.4 から，1960 年代前半以前の鋼材である．

また，図 4.10(a),(b)以外の鋼種においては，母材よりも溶接部（特に HAZ）の吸収エネルギーが下限値として表れており，母材としては比較的高い吸収エネルギーを有しているといえる．JIS 規格で吸収エネルギーの要求値が規格化される以前の鋼材は，衝撃特性が低い可能性があることを示唆した．

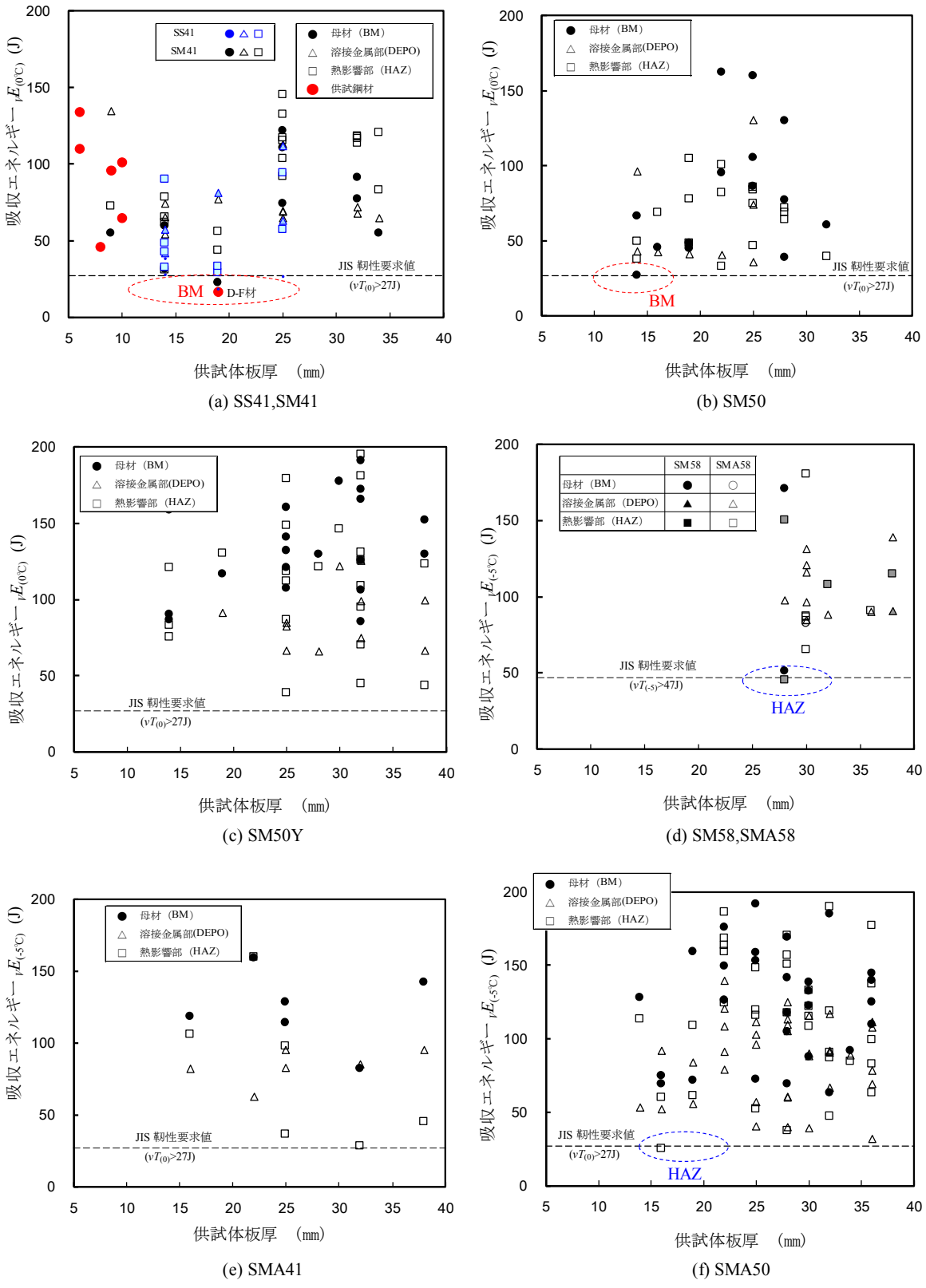


図 4.7　吸収エネルギーと供試体の板厚

4.3.4　化学成分によるエネルギー遷移温度への影響

第 3 章に示した経年鋼材の化学成分を再掲し表 4.3 に示す．建設当時の JIS（1952 年）の成分規格は満たしていることがわかる．すなわち，これら経年鋼材が製鋼された時代に許容された鋼材は，現在において D-F 材のように著しく劣ると評価される鋼材も多く存在する可能性を示しているといえる．

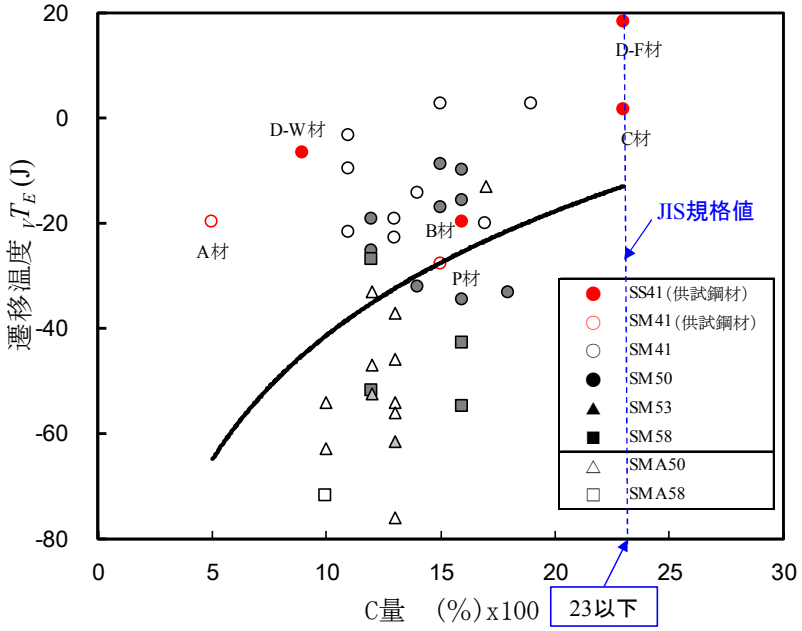
図 4.8 は，化学成分のエネルギー遷移温度への影響として，靭性への影響が大きいとされる C 量，Mn 量と遷移温度の関係を示す．なお，既往文献[4.7)']では，化学成分の記録が残されていないものが多い．C 量は増加により延性，靭性が劣化し溶接性に悪影響を及ぼし，Mn 量は増加により伸びや靭性を損なうことなく強度は上昇することが知られている．図中，赤色で示した第 3 章の実験に用いた経年鋼材のうち，特に D-F 材は，他の供試体に比べ C 量が多く，Mn 量が少なく，遷移温度が高温側に現れており，これらの一般的傾向と一致する．

図 4.9 には，溶接性などへの影響が大きいとされる P 量，S 量と遷移温度の関係を示す．P は溶接時の高温割れの原因となり，S は靭性，溶接性，加工性，板厚方向の材料特性にも悪影響を及ぼすとされている．図中，P 量は，ばらつきが大きく遷移温度への明確な影響は確認できない．一方，S 量は，増加により遷移温度が高温側に推移する傾向が現れている．特に，1960 年代前半以前の 400MPa 級の鋼材は S 量が多い傾向にある（青枠内）．これは，連続鋳造法が導入された以前の時代で，S 量が多く含まれる一般的傾向[4.4)']と一致している．

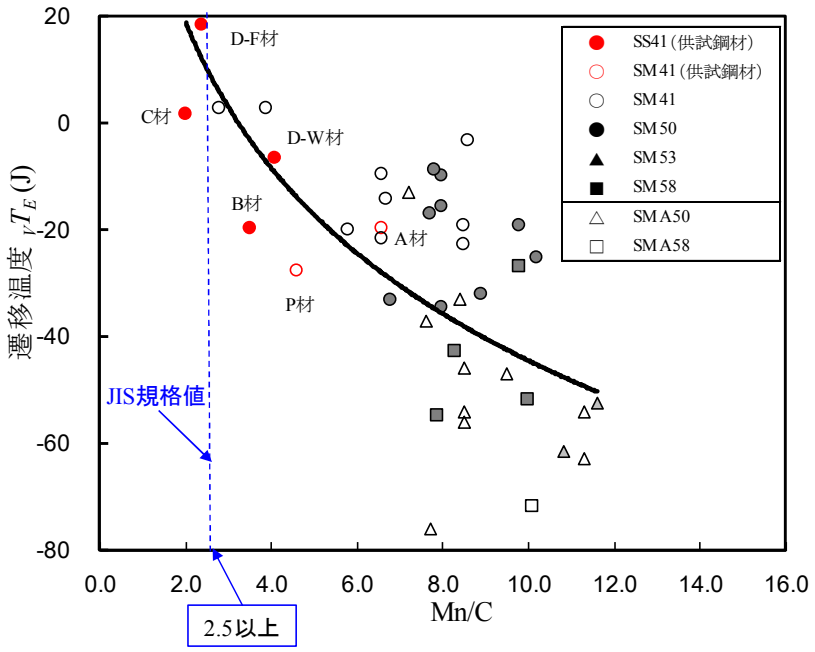
図 4.10 には, 炭素当量 Ceq, 溶接割れ感受性組成 P_{CM} と遷移温度の関係を示す. なお, 算定に必要な全成分を調査していないものが多く，本図は参考として掲載した．両者とも低温割れに及ぼす化学成分の影響を定量的に評価したもので，数値が大きいほど低温割れが生じやすい．本図から判断すると，Ceq,PCM とも低い数値を示しており，溶接性に問題はないといえる．ただし，評価式には，P，S が含まれないため，これらの含有量が多い，1960 年代以前の特に 400MPa 級の鋼材については，溶接性の指標として用いる場合，十分が必要であることを参考に記す．

表 4.3　経年鋼材の化学成分

鋼材			化学成分分析結果（%）							
			C	2.5xC	Mn	Si	P	S	Ceq	P_{CM}
A	1959年	SM41W	0.05	0.13	0.33	0.014	0.007	0.022	0.10	0.08
B	1963年	SS41	0.16	0.40	0.56	0.070	0.013	0.022	0.27	0.21
C	1952年	SS41	0.23	0.58	0.47	0.010	0.013	0.018	0.32	0.27
D(Web)	1958年	SS41	0.09	0.23	0.37	0.002	0.007	0.020	0.17	0.13
D(Flg)	1958年	SS41	0.23	0.58	0.55	0.006	0.023	0.047	0.34	0.20
JIS G 3106	(JIS 1952年)	SM41W	≦0.23		≧2.5xC	--	≦0.040	≦0.050	--	--
	(JIS 2013年)	SM400A	≦0.23		≧2.5xC	--	≦0.035	≦0.035	≦0.44	≦0.28
JIS G 3101	(JIS 1952年)	SS41	--		--	--	≦0.060	≦0.060	--	--
	(JIS 2010年)	SS400	--		--	--	≦0.050	≦0.050	--	--

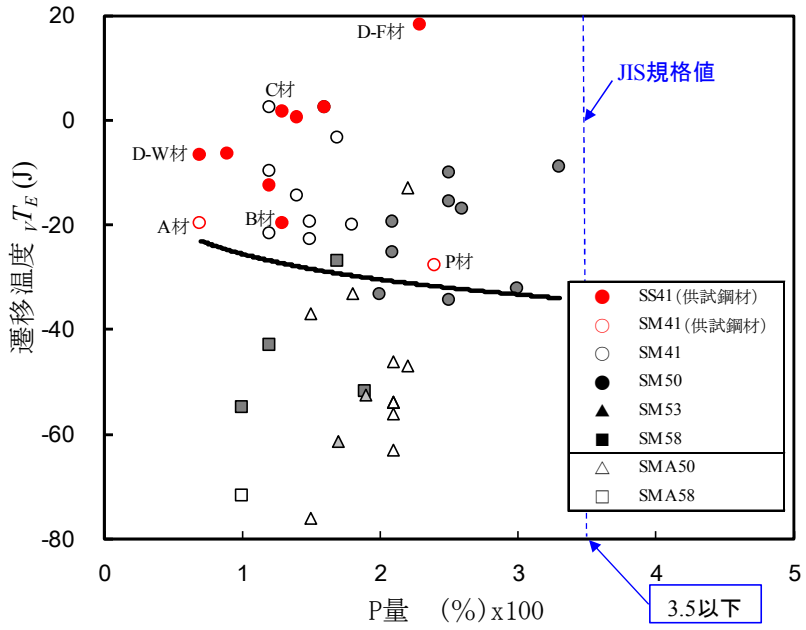


(a) 遷移温度におよぼすC量の影響

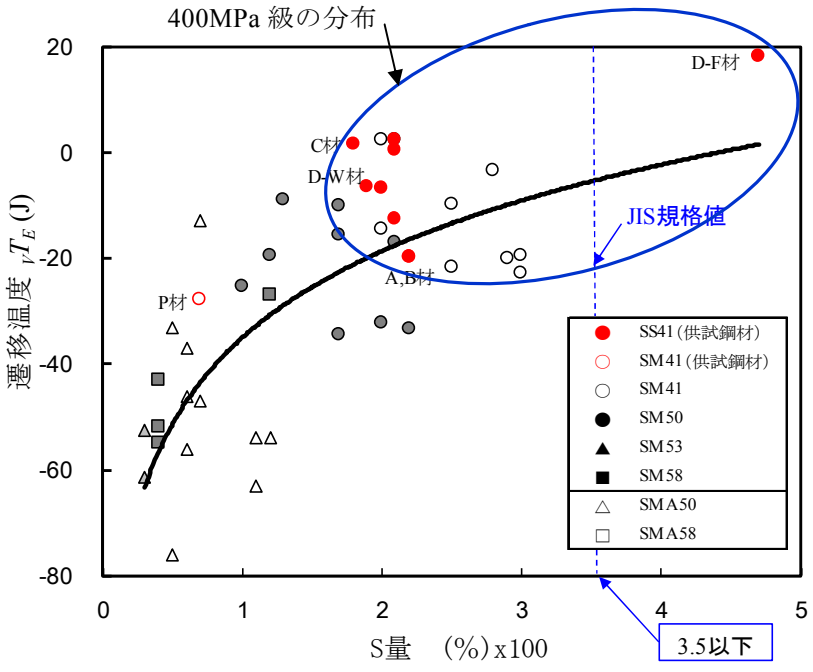


(b) 遷移温度におよぼすMn量の影響

図 4.8　化学成分のエネルギー遷移温度への影響
（C，Mn）

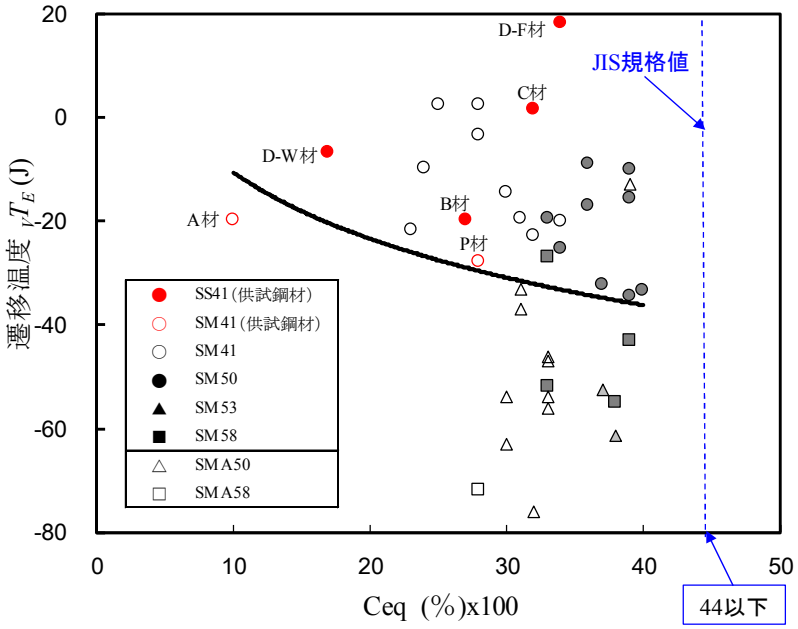


(a) P量の影響



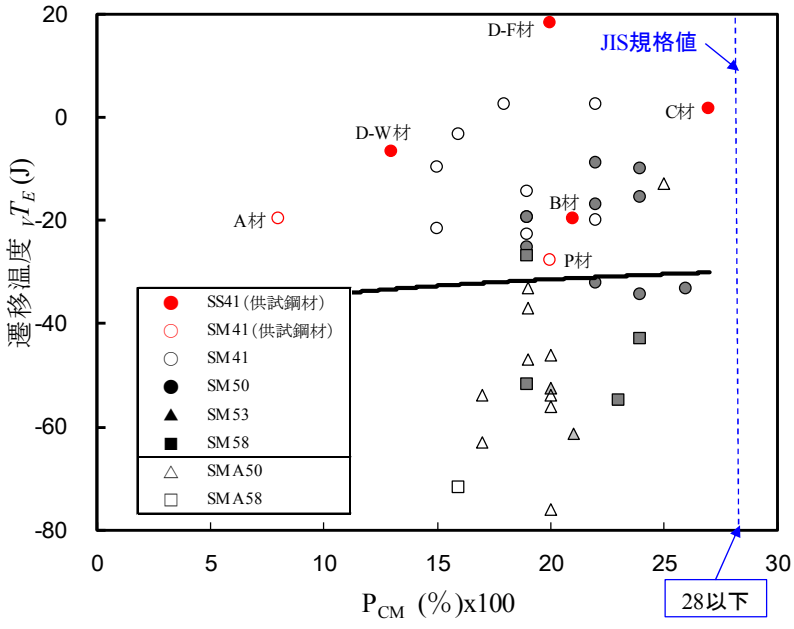
(b) S量の影響

図 4.9　化学成分のエネルギー遷移温度への影響
（P，S）



$$\left(C_{eq} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \right)$$

(a) Ceq の影響



$$\left(P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \right)$$

(b) P_{CM} の影響

図 4.10　化学成分のエネルギー遷移温度への影響
（Ceq，P_{CM}）

4.3.5　経年鋼材の相対的指標

本章で整理した 1960 年代前半以前の 400MPa 級の鋼材は，相対的に母材の遷移温度が高く，靭性が低いといえる．これは，製鋼された当時は，脱酸技術が未発達（リムド鋼）であった影響や，現代に比べて化学成分の規定がゆるいことが考えられる．化学成分の規定は，1959 年の JIS 改定で SM 材に C，Si，Mn の成分規定が設けられ，衝撃値も規定されて，ほぼ現在に近い規定に整備された．すなわち，これ以前に製鋼された鋼材は，C 量，Mn 量などの規定がないため，著しく遷移温度が高く靭性が劣る鋼材が存在する可能性があるといえる．

以上，1960 年代以前に建設された，SS41 材を主要部材に用いている橋梁は，衝撃性能が著しく劣る鋼材が存在することを相対的に示した．なお，これ以降に製鋼された板厚 30mm 程度以下の鋼材は，前項，“4.2 JIS における低温下での使用条件の検証”で記述したように，低温下においても一定の安全性を有するものといえる．

4.4 本章のまとめ

経年鋼材の相対的な靭性の傾向を把握する目的で，第 3 章に示した実験結果と既往文献の公表資料から，経年鋼材のエネルギー遷移温度と化学成分の関係に着目して，使用安全性について考察した．得られた主な結果は以下の通りである．

(1) エネルギー遷移温度と母材板厚の関係について WES3003 を用いて算出した使用限界温度に着目すると，1960 年代前半の 400MPa 級鋼は，相対的に使用限界温度が高温側に現れていた. また, 吸収エネルギーが JIS の要求値を大きく下回る鋼材もあり，低温下において脆性破壊の可能性があることを考察した．
(2) 遷移温度と化学成分の関係に着目すると，1960 年代前半の 400MPa 級鋼は，C，S の含有量は多く，Mn は少ない傾向を示し，遷移温度が高温側となる傾向に相関性が見られた．これらの結果から，1960 年代前半以前に製鋼された 400MPa 級の鋼材は，製鋼技術が未発達な時代のため，化学成分に S の含有量が多く，衝撃性能が著しく劣る鋼材が多く存在する可能性を示した．
(3) 炭素当量 Ceq と溶接割れ感受性組成 P_{CM} の値は，現在の JIS の要求値を満たしているが，評価式に含まれない S 量の多い時代の鋼種は，補修補強時の溶接性の指標として用いる場合に注意が必要であることを記した．
(4) JIS の靭性要求値と低温下での使用条件について検証を試みた．JIS に規定される衝撃試験の試験温度（$vT_{(0℃)}$，$vT_{(-5℃)}$）は動的試験のため使用温度に変換すると，板厚 30mm 以下の鋼板は使用温度が-30℃程度以下に相当することが解った．これは北海道の最低気温分布から 85%の地域を網羅する温度である．経年橋梁は薄板で構成されることが多く，JIS の靭性要求値は，低温下においても一定の安全性を有する相対的指標といえることを考察した．
(5) 北海道では過酷な気象条件のもと，建設後 50 年を越える橋梁が今後急増する中，多くの経年橋梁を効果的に維持管理する手法が望まれている．建設年度と主要部材の材質調査を行うことで，寒冷地における脆性破壊の危険性を知り，維持管理計画につなげていくことが重要であることを追記する．

参考文献（第 4 章）

4.1) 国土交通省 北海道開発局：北海道橋梁長寿命化修繕計画（案），2012.

4.2) 北海道建設部：北海道橋梁長寿命化修繕計画，2010.

4.3) 公益社団法人：土木学会誌，阪神・淡路大震災特集第 4 回，1995.

4.4) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術，2009.

4.5) 松縄秀範，表真也，三田村浩，林川俊郎：寒冷地における経年鋼材に対する使用安全性の評価，鋼構造年次論文報告集，Vol.21，pp.832-839，2013.

4.6) 金裕哲，廣畑幹人，松縄秀範，表真也，三田村浩：寒冷地における経年鋼材に対する脆性破壊発生有無の評価・判定，鋼構造年次論文報告集，Vol.20，pp.599-606，2012.

4.7) 北海道開発局土木試験所構造研究室：鋼材の低温域における溶接性と安定性に関する試験調査（鋼材のシャルピー衝撃試験結果の整理集計），1985.

4.8) 日本工業規格：溶接構造用圧延鋼材 JIS G3106，2008．溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 JIS G3114，2008.

4.9) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，2011.

第5章　少数主桁に用いる厚鋼板の低温下における材料特性試験

5.1　概説

北海道ではこれまで，板厚 40mm 以下の構造用鋼材を対象とした既往研究[5.1]から，道示の鋼種選定[5.2]よりも厳しい独自の鋼種選定を使用してきた．近年，施工の省力化，工期短縮および構造の簡略化による維持管理の容易性などから，少数主桁などの合理化桁が多く開発されている．これら合理化桁では，従来構造に比べ主桁本数の削減や細幅化が図られ，主要部材に板厚 40mm 以上の厚鋼板を適用する事例が増加している．道示では，製鋼技術の進歩と合理化桁の開発推進を背景に，平成 8 年版で適用板厚が 100mm まで拡大された．板厚 40mm 以上の厚鋼板を使用することにより，道示の最大ボルト列数の規定や高力ボルト製造面から，現場継手がボルト継手から溶接継手に移行するケースが増加する（写真 5.1）．脆性破壊は初期欠陥が生じやすい溶接部が起点となることが多く，厚鋼板溶接部の低温下での適用性を把握することが特に重要である．しかし，これらを対象とした研究成果や文献は少なく，板厚 40mm を超える厚鋼板の低温下での適用評価法が課題である．

本章では，厚鋼板の低温下における適用可能性について評価・判定を行うことを目的として，脆性破壊防止の観点から，限界 CTOD 値とシャルピー吸収エネルギーとの相関を考慮して提案されている WES3003 の鋼板判定基準[5.3]を準用し，シャルピー衝撃試験を用いて評価する手法を示した．ここで，WES3003 の規格は，基本的には母材に対する材質判定基準である．しかし，道示の溶接施工試験の項[5.4]では，溶接金属部および HAZ 部は母材の規格値以上とされていることを尊重し，溶接部についても WES3003 の規格を準用した．



写真 5.1　合理化橋梁による現場溶接継手例

5.2　厚鋼板を用いた実験計画

5.2.1　実験対象

道示適用範囲の橋梁は，SM 規格の鋼材が用いられ，設計製作の体系は，SM 規格下限の鋼材が使用されても要求性能が満たされることを前提に構成されている．近年，$vT_{(-40℃)}$≧100J を要求する高降伏点鋼材が JIS 化されるなど，高機能鋼材の実績も増えているが，本章では道示の規格体系を基本として，実験の対象鋼材を JIS G 3106（SM 材），JISG3114（SMA 材）とした．また，低温下の対象を，図 5.1 に示す北海道の最低気温分布図 [5.5]から，表 5.1 に示す最低気温の設計温度 [5.5]が最も低い-40℃とした．

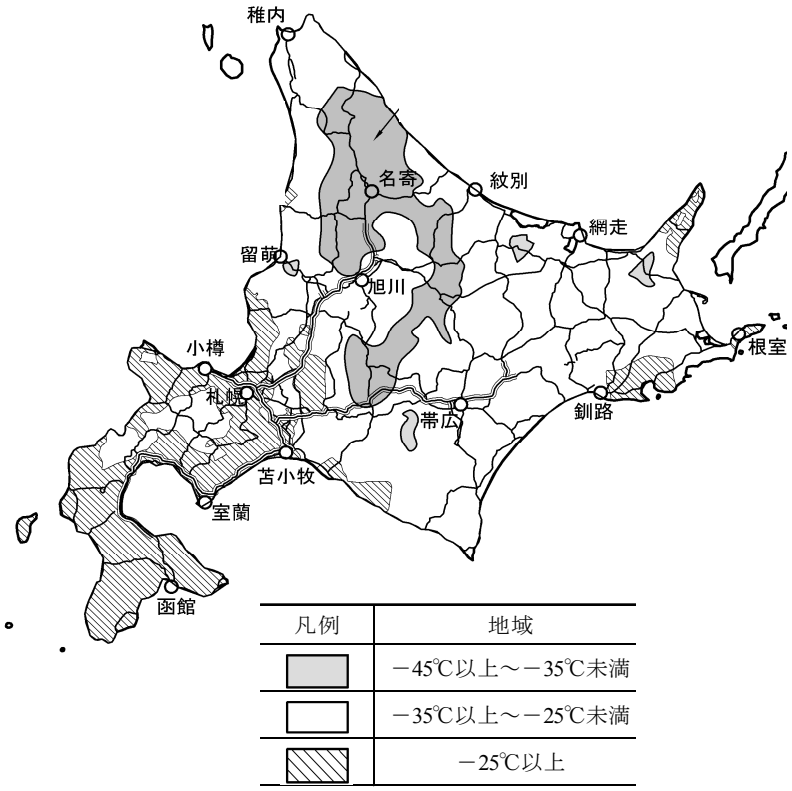


図 5.1　北海道の最低温度分布 [5.5]

表 5.1　鋼橋の設計温度変化範囲 [5.5]

地域	設計温度変化範囲（℃）		
	最低温度	最高温度	温度変化
－45℃以上～－35℃未満	- 40	+ 40	80
－35℃以上～－25℃未満	- 30	+ 40	70
－25℃以上	- 20	+ 40	60

5.2.2　供試体

供試体は，少数主桁橋において引張応力が支配的な主桁フランジで使用実績が多い 490MPa ，570MPa 級の厚鋼板および溶接部とした．供試体は，実際に少数主桁橋の製作に用いた鋼板のうち，40mm 以上の厚鋼板を対象として入手した．供試体一覧を表 5.2 に，試験片の作製を図 5.2 に示す．溶接部は，溶接金属部，ボンド部，熱影響部（以降，Depo，Bond，HAZ）に分けて試験片を作製した．溶接供試体の作製は，実績が多い材料で，平均的な溶接条件を再現し，一般性を有することを目標として，少数主桁の現場溶接条件の情報を収集[5.6),5.7),5.8)]して，再現性の高い溶接条件を設定した．

表 5.2　供試体一覧表

鋼種		板厚 (mm)	40 ～49	50 ～59	60 ～69	70 ～79	80 ～89	90 ～
SM520C	SM520C-H	56		○				
	SM520C-H	69			○			
	SM520C-H	77				○		
SM570	SM570TMC-H	41	○					
	SM570TMC-H-EX	70				○		
	SM570TMC-H	88					○	
	SM570Q-Z35S-H	90						○
SMA490W	SMA490CW-H	79				○		
SMA570W	SMA570WTMC-H	74				○		

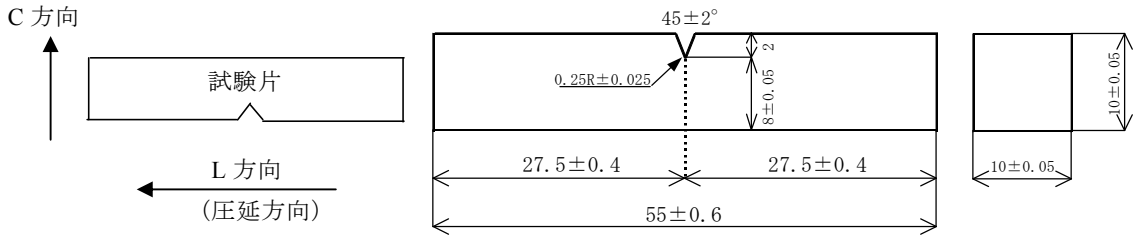


図 5.2　試験片の作製

5.2.3　実験ケース

シャルピー衝撃試験方法は, JIS Z 2242 に準じて実施した. 実験ケースを表 5.3 に示す. 溶接条件と溶接材料をパラメータとして，11 ケースの実験を行った．施工条件と溶接材料の相違によるシャルピー吸収エネルギーへの影響を検証する目的で，3 種類の溶接条件と，2 種類の溶接材料（標準溶材，低温溶材）を用いた．ここで，溶接材料は母材強度以上の溶材選定が基本であるが，母材よりも低強度な溶材を用いた場合の靭性への影響を検証する目的で，アンダマッチとなる条件を設定した．なお，CASE-5,6(t=41mm)は，ミルシートが入手できず参考とした．母材と溶接材料の機械的性質および化学成分の一覧を，表 5.4，表 5.5 に示す.

＜アンダマッチの実験ケース＞

溶接条件-1：CASE-3

溶接条件-2：CASE-7,8

溶接条件-3：CASE-11

＜参考の実験ケース＞

溶接条件-2：CASE-5,6

表 5.3　実験ケース

		材質	板厚 (mm)							母材	溶金部 (Depo)		ボンド部 (Bond)		熱影響部 (HAZ)		
			板厚	40～49	50～59	60～69	70～79	80～89	90～		標準溶材	低温溶材	標準溶材	低温溶材	標準溶材	低温溶材	
溶接条件-1	Case-1	SM 520C	56		○					○	○		○		○		
	Case-2		69			○				○	○		○		○		
	Case-3	SM 570	88					○		○		○		○		○	※
	Case-4		90						○	○	○		○		○		
溶接条件-2	Case-5	SM 570	41	○						○		○					
	Case-6										○						
	Case-7	SM 520C	77				○			○		○		○		○	※
	Case-8										○						※
	Case-9	SMA570W	74				○			○	○		○		○		
溶接条件-3	Case-10	SM570	70				○			○	○				○		
	Case-11	SMA490W	79				○			○	○				○		※

○：実験ケース　　※：アンダマッチ

表 5.4　厚鋼板供試体,使用溶材の機械的性質

材質		板厚 (mm)		機械的性質 降伏点 MPa	引張強さ MPa	伸び %	絞り %	衝撃値 J	使用材料	
SM520C	-H	56	母材	438	557	33	---	0℃281	ミルシート転記	
			溶材	490	570	31	---	室温120	標準 (JIS Z 3312:YGW11相当)	MG-50
	-H	69	母材	371	538	35	75	0℃296	ミルシート転記	
			溶材	490	570	31	---	室温120	標準　(JIS Z 3312:YGW11相当)	MG-50
	-H	77	母材	422	580	33	---	0℃147	ミルシート転記	
			溶材	520	570	26	---	-40℃80	低温用(JIS Z 3313:YFL-C504X相当)	DW-55E
				490	570	31	---	室温120	標準　(JIS Z 3312:YGW11相当)	MG-50
SM570	TMC-H	41	母材	---	---	---	---	---	ミルシート入手できず	
			溶材	520	570	26	---	-40℃80	低温用(JIS Z 3313:YGW21相当)	DW-55E
				490	570	31	---	室温120	標準　(JIS Z 3312:YGW11相当)	MG-50
	TMC-H-EX	70	母材	556	647	31	---	-5℃254	ミルシート転記	
			溶材	590	670	26	---	-5℃120	低温用(JIS Z 3313:YGW21相当)	MG-60
	TMC-H	88	母材	548	665	29	75	-5℃233	ミルシート転記	
			溶材	520	570	26	---	-40℃80	低温用(JIS Z 3313:YFL-C504X相当)	DW-55E
	Q-Z35S-H	90	母材	534	636	27	66	-5℃241	ミルシート転記	
			溶材	590	670	26	---	-5℃120	低温用(JIS Z 3313:YGW21相当)	MG-60
SMA490 CW	-H	79	母材	495	610	29	---	-5℃319	ミルシート転記	
			溶材	510	590	26	---	室温℃140	標準　(JIS Z 3320:YFA-50W相当)	DW-50W
SMA570 W	TMC-H	74	母材	495	610	29	---	-5℃319	ミルシート転記	
			溶材	520	610	26	---	-5℃110	標準 (JIS-Z-3315:YGA-58W相当)	MG-W588

（上段：母材、下段：溶接材料）　　：母材強度を下回る

表 5.5　厚鋼板供試体,使用溶材の化学成分

材質		板厚 (mm)	化学成分（%） C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Pcm	Ceq	溶接材料
SM520C	-H	56	0.13	0.34	1.34	0.009	0.003	0.01	0.12	0.05	0.01	0.21	0.38	（母材）
			0.08	0.51	1.10	0.01	0.01	---	---	---	---	---	---	MG-50
	-H	69	0.15	0.38	1.39	0.013	0.002	0.21	0.16	0.03	0.05	0.26	0.42	（母材）
			0.08	0.51	1.10	0.01	0.01	---	---	---	---	---	---	MG-50
	-H	77	0.16	0.45	1.54	0.009	0.004	0.04	0.02	0.03	0	0.26	0.44	（母材）
			0.05	0.4	1.42	0.012	0.001	---	0.41	---	---	---	---	DW-55E
			0.08	0.51	1.10	0.01	0.01	---	---	---	---	---	---	MG-50
SM570	TMC-H	41	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	（母材）
			0.05	0.4	1.42	0.08	0.001	---	0.41	---	---	---	---	DW-55E
			0.08	0.51	1.10	0.01	0.01	---	---	---	---	---	---	MG-50
	TMC-H-EX	70	0.08	0.31	1.58	0.01	0.003	0.02	0.01	0.02	0.09	0.18	0.36	（母材）
			0.08	0.51	1.39	0.012	0.009	0.29	---	---	---	---	---	MG-60
	TMC-H	88	0.09	0.16	1.45	0.001	0.002	0.03	0.18	0.48	0.09	0.20	0.46	（母材）
			0.05	0.40	1.42	0.012	0.001	---	0.41	---	---	---	---	DW-55E
	Q-Z35S-H	90	0.13	0.26	1.31	0.009	0.001	0.10	0.19	0.17	0.09	0.24	0.42	（母材）
			0.08	0.51	1.39	0.012	0.009	0.29	---	---	---	---	---	MG-60
SMA490CW	-H	79	0.08	0.17	1.33	0.007	0.002	0.30	0.12	0.45	0	0.20	0.41	（母材）
			0.06	0.35	1.06	0.013	0.008	0.39	0.54	---	---	---	---	DW-50W
SMA570W	TMC-H	74	0.08	0.17	1.33	0.007	0.002	0.30	0.12	0.45	0	0.20	0.41	（母材）
			0.06	0.53	0.93	0.01	0.012	0.42	0.55	0.56	---	---	---	MG-W588

（上段：母材、下段：溶接材料）

5.2.4　溶接条件

溶接条件は，少数主桁の施工実績の情報を収集し，汎用性を考慮した実績から，溶接法は 100%CO_2-MAG 溶接とした．設定した溶接条件は，施工効率や靭性向上を期待したケースを想定し，表 5.6 に示す 3 種類とした．溶接部の靭性は入熱依存性を有し，入熱量が高いほど結晶粒が粗大化し靭性は低下する傾向にある [5.9]．施工実績から入熱量は最大で 3000J/mm 程度と低く制限し，同様にパス間温度も設定した．溶接条件の設定方針を表 5.7 に示す．

溶接条件-1 は，施工効率を高める目的で，電流を高めに設定し溶接工数の低減を図った．なお，本溶接条件では溶接部の靭性改善が見られなかった．この原因の分析を受けて溶接条件-2 を設定した（5.3 シャルピー衝撃試験結果参照）．

溶接条件-2 は，溶接金属中の窒素巻き込み量を抑制し，溶接部の靭性向上を目的として，CO_2 量を多く，電流，電圧を低めに，溶接速度を一定とした．溶接条件-3 は，溶接条件-1,2 の施工性と靭性向上の中間的な溶接条件の設定を目標として，平均的な CO_2 量や電流とした．溶接後のマクロ試験 [5.10]では，溶接条件-1，3 に欠陥は見られず，材質や板厚によらず良好な継手が得られた．一方，溶接条件-2 では，ほとんどのケースでブローホールの介在が見られた．欠陥は，溶接施工法の良否と密接な関係があることが知られており，多層盛溶接においては，電流や電圧を過度に抑えた場合，溶接欠陥を誘発する可能性があることを示した．マクロ試験結果を表 5.8 に示す．

表 5.6　溶接条件表

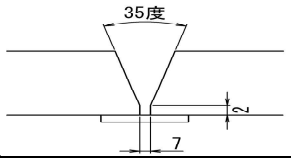
溶接条件			溶接条件-1	溶接条件-2	溶接条件-3
溶接法		--	100%CO_2-MAG溶接		
開先形状	開先角度	度			
	ルートギャップ	mm			
	ルートフェース	mm			
予熱温度		℃	100～150		
パス間温度		℃	230以下		
ワイヤ径		mm	1.2		
CO2量		l/m	25	30	25
電流		A	320	280	300
電圧		V	34	30	35
溶接速度		mm/min	250～350	250	200～350
入熱量		J/mm	1860～2600	2,000	1800～3150

表 5.7　溶接条件の設定方針

			条件の引用	
溶接法				現場溶接の実績から溶接を選定
開先形状	形状	--	※1	橋梁メーカー各社の過去の文献（技報など）を参考
	開先角度	度		
	ルートギャップ	mm		
	ルートフェース	mm		
予熱温度		℃	※2	道示Ⅱ 表-17.4.5予熱温度の標準
パス間温度		℃	※3	JIS規格 溶着金属の衝撃試験の項から引用
溶接材料		--		JIS規格の要件による
ワイヤー径		mm		JIS規格 溶着金属の衝撃試験の項から引用
CO_2量		l/m		溶接の施工性・品質面から設定
電流		A	※4	道示Ⅱ 17.4.4 溶接施工法に示される 入熱制限7,000J/mm以下 入熱量Q(J/mm)= 電流(amp)×電圧(volt)×60 / 溶接速度(mm/min)
電圧		V		
溶接速度		mm/min		
入熱量		J/mm		

※1　橋梁メーカーの過去の文献（技報など）を参考.

※2　道示の標準値は 80～100℃程度.

※3　1) 道示にパス間温度の規定は無い.

2) JIS-Z-3312,3313,3315 等の“溶接金属”の衝撃試験を実施する場合は 100～150℃程度.

3) 本州四国連絡橋公団の基準では 230℃以下．200℃程度を目標とた施工事例もある.

※4　1) CO2，電流，電圧，溶接速度の関係は，溶接の施工性と品質面から設定される.
各種現場条件に対して容易に再現できる溶接条件とするる.

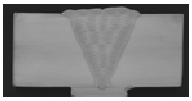
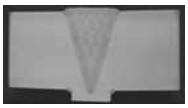
2) 入熱量は，道示規定では 7000J/mm 以下は熱影響を受ける母材(HAZ)から決まる値.
ガスシールド溶接では，Depo の靭性低下を勘案し入熱制限が必要.
一般に最大でも 3～4000J/mm 以下.

3) CO2 量が不足すると，窒素の巻き込みが多くなり，靭性が低下する.
標準 25(l/m)に対して，高めに設定することが効果的．拡散性水素量を低減でき，低温割れを生じにくくできるため，寒冷地での現場溶接に適する.

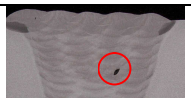
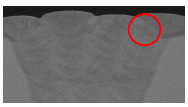
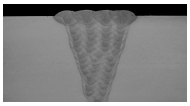
4) 電流を上げると，溶接工数低減に繋がり，施工側として効果的.

表 5.8　マクロ試験結果

(a)　溶接条件-1

ケース	鋼種	板厚 (mm)	溶材	溶接部のマクロ試験結果	
CASE-1	SM520C	56 mm	標準	欠陥なし	
CASE-2		69 mm	標準	欠陥なし	
CASE-3	SM570	88 mm	低温用	欠陥なし	
CASE-4		90 mm	標準	欠陥なし	

(b)　溶接条件-2

ケース	鋼種	板厚 (mm)	溶材	溶接部のマクロ試験結果	
CASE-7	SM520C	77	低温	欠陥有り	
CASE-8			標準	欠陥有り	
CASE-6	SM570	41	標準	欠陥有り	
CASE-9	SMA 570W	74	標準	欠陥なし	

5.3 シャルピー衝撃試験結果

実験に用いた試験片は，道示に従い，BM，Depo，HAZ，Bond に対して，図 5.3 に示す供試体の 1/4t を基本として採取した. 試験の結果は, 吸収エネルギーの大小ではなく，遷移温度に着目した．なお，脆性破面率からの考察はここでは除外する．

全ての試験結果の遷移温度の一覧を表 5.9 に示す．表中の遷移温度は，上部棚吸収エネルギーの 50%にの試験温度に相当する（図 5.4 に図示）．また，試験ケースごとに，最も遷移温度が高温側を呈した試験部位（Depo）を着色して示した．薄板や大入熱溶接の場合，溶接部の靭性が母材に比べて著しく劣化する HAZ や Bond の脆化が問題となる事例が多い．本実験では最脆化部は Depo に移行する傾向を示した．これは，低入熱溶接と厚鋼板による入熱の冷却速度が影響しているものと考えられる．

図 5.4~5.6 は，最脆化部となる傾向を呈した Depo の吸収エネルギー遷移曲線を示す．図中のシンボルは，各温度で 3 体実施した試験値を，曲線は，第 3 章式(3.1)の吸収エネルギー遷移曲線の近似曲線を示す．試験結果は，最脆弱部を示した Depo に着目した．

溶接条件-1 では，標準溶材を用いた Case-4 の遷移温度-22℃に対して，低温溶材を用いた CASE-3 の遷移温度が-20℃と，遷移温度の改善は見られなかった（表 5.9 赤枠部）．これは，低温溶材を用いた CASE-3 は，アンダマッチの溶材を用いていることが要因の 1 つと考えられる．他の要因を探るため，溶接条件-1 の CASE-2 と CASE-3 に着目して Depo 部の化学成分分析を行い，使用した溶材成分と対比した．化学成分の対比を表 5.10 に示す．この結果，窒素（N）の含有量が CASE-2：161ppm，CASE-3 :92ppm と溶接材料が当初から有する 30～40ppm に比べ，高い数値を示した．CO_2 量のシールドが完全であれば窒素（N）の侵入は生じないはずであるが，分析結果は高い値を示した．また，図 5.7 に示す顕微鏡組織観察では，介在物（MnO）が多数生成しているものの，CO_2 溶接によるもので特異現象は認められない．ゆえに，溶接条件-1 において遷移温度の改善が見られない傾向は，CO_2 量のシールド量が不足することで，気中の窒素（N）の巻き込み量が多くなり，靭性の劣化が進む傾向を示したものと考えられる．

溶接条件-2 の低温溶材を用いた CASE-5,7 は，期待通りに遷移温度は低温域を示す傾向が見られた．しかし，標準溶材を用いた CASE-6,8,9 は，靭性向上を目的とした溶接条

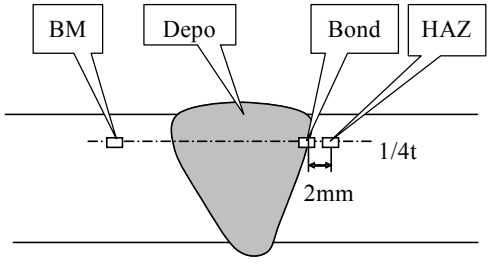
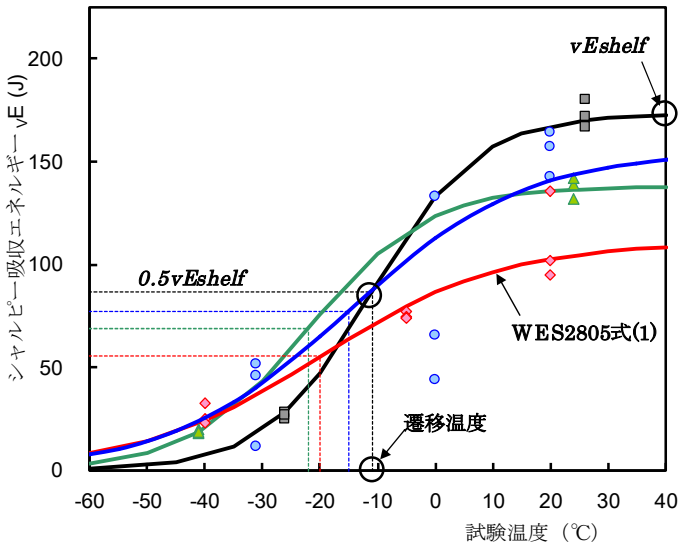


図 5.3　溶接部の試験片採取位置

表 5.9　遷移温度一覧表

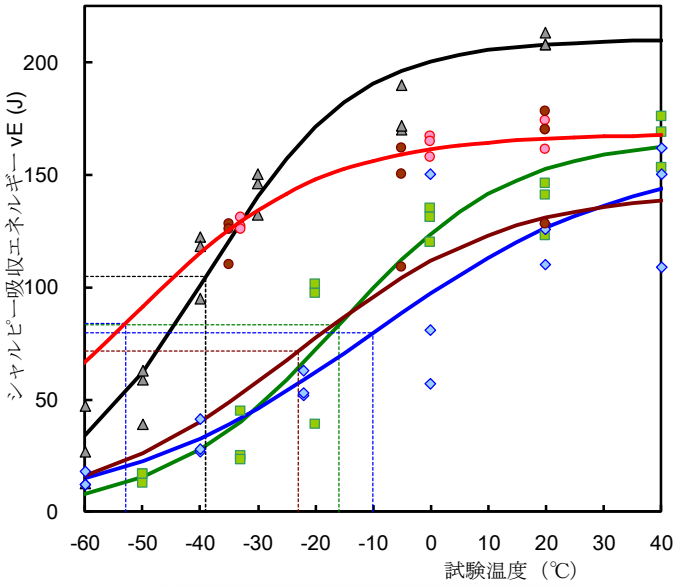
		材質	板厚 (mm)	吸収エネルギー 遷移温度 （℃）							
				母材	溶接金属部 (Depo)		ボンド部 (Bond)		熱影響部 (HAZ)		
					標準溶材	低温溶材	標準溶材	低温溶材	標準溶材	低温溶材	
溶接条件-1	CASE-1	SM520C	56	-40	-11		-34		-68		
	CASE-2		69	-45	-15		-20		-46		
	CASE-3	SM570	88	-40		-20		-42		-50	※
	CASE-4		90	-53	-22		-32		-52		
溶接条件-2	CASE-5	SM570	41	-112		-39					
	CASE-6				-10						
	CASE-7	SM520C	77	-35		-53		-39		-34	※
	CASE-8				-16						※
	CASE-9	SMA570W	74	-60	-23		-32		-102		
溶接条件-3	CASE-10	SM570	70	-64	-24				-38		
	CASE-11	SMA490CW	79	-38	-18				-25		※

※：アンダマッチ



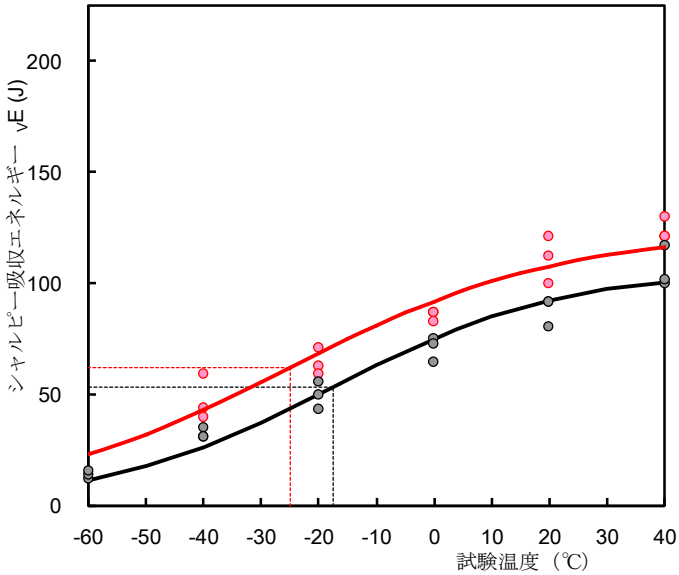
	鋼種	板厚 (mm)	溶接材料	遷移温度	凡例
CASE-1	SM520	56	汎用	-11	■
CASE-2		69	汎用	-15	●
CASE-3	SM570	88	低温用	-20	◆
CASE-4		90	汎用	-22	▲

図 5.4　エネルギー遷移温度（溶接金属部；溶接条件-1）



	鋼種	板厚 (mm)	溶接材料	遷移温度	凡例
CASE-5	SM570	41	低温用	-39	▲
CASE-6			汎用	-10	◆
CASE-7	SM520	77	低温用	-53	●
CASE-8			汎用	-16	■
CASE-9	SMA570W	74	汎用	-23	●

図 5.5　エネルギー遷移温度（溶接金属部；溶接条件-2）



	鋼種	板厚 (mm)	溶接材料	遷移温度	凡例
CASE-10	SM570	70	汎用	-24	●
CASE-11	SMA490W	79	汎用	-18	●

図 5.6　エネルギー遷移温度（溶接金属部；溶接条件-3）

件の効果は見られなかった（表 5.9 青枠部）．溶接条件-3 は，溶接条件-1，2 と同様に，遷移温度は-20℃程と他の溶接条件と比べ特筆すべき現象は見られなかった．

アンダマッチにより遷移温度が高温側を示した CASE-3,8,11 は，母材の遷移温度も高温側を示しており，アンダマッチ溶材の影響のみが靭性低下の要因ではなく，極厚板においては母材そのものの性能に十分留意して選定する必要があることを示唆している．

これらの結果から，オーバーマッチした溶材の選定を基本として，CO_2量を意識した溶接施工試験を実施し，架橋地点の低温領域に適した溶材の選定，ならびに，良質な母材を用いることで，厚鋼板溶接部の脆化を抑制できる可能性があることを示した．

表 5.10　Depo の化学成分分析（溶材カタログ値と比較）

	Case-2 SM520 (t=69)		Case-3 SM570 (t=88)	
	標準溶材(MG-50)		低温溶材(DW-55E)	
	Depo分析値	※1) 溶材標準値	Depo分析値	※2) 溶材標準値
C	0.046	0.080	0.038	0.050
Si	0.510	0.510	0.510	0.400
Mn	1.170	1.100	1.580	1.280
P	0.015	0.010	0.012	0.012
S	0.013	0.010	0.009	0.010
Cr	0.030	---	0.030	---
Ni	0.010	---	0.410	0.410
Cu	0.270	---	0.020	---
Mo	---	---	---	0.290
O	0.044	---	0.059	---
N	0.0161	0.003～0.004	0.0092	0.003～0.004

※1); JISZ3312；YGW11相当

※2); JISZ3313；YFL-C504R相当

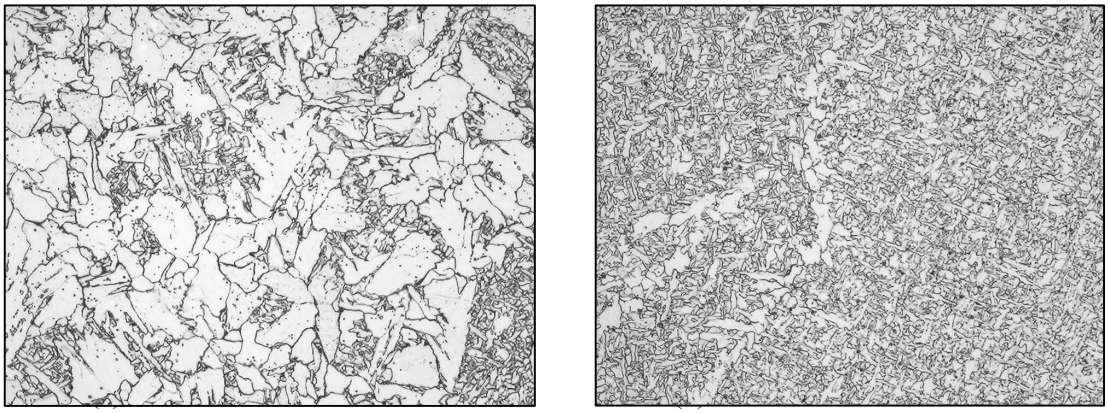


図 5.7　Depo 顕微鏡組織観察

5.4 厚鋼板の適用評価法に関する提案

5.4.1 WES3003 鋼種判定基準の準用

WES3003 式(5.2)は，限界 CTOD 値とシャルピー吸収エネルギーとの相関を考慮して，シャルピー試験温度の要求値を与える式として提案されている．第 3 章に示した経年鋼材を用いた靭性試験[5.11)]では，シャルピー衝撃試験によるエネルギー遷移温度が，3 点曲げ CTOD 試験の延性-脆性破壊の境界温度に対して ΔT を介して対応するとして，WES2805 に提案される相関式の再現精度が高いことを確認してきた．この試験結果からも，シャルピー衝撃試験の遷移温度に着目することで，破壊靭性面からもある一定の評価を与えることが可能である．WES3003 の鋼板判定基準に提案されるエネルギー遷移温度の要求値 ${}_{V}T_{E}req$ を実験結果の遷移温度 ${}_{V}T_{E}$ に置き換えることで，使用限界温度 T を求めることができる．これを算定式(5.1)に示す．

$$T''={}_{V}T_{E}-166.3+0.13\sigma_{Y0}+6\sqrt{t}+\begin{cases}\dfrac{17976}{\sigma_{Y0}}\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{Y0}}+0.6\right) & \sigma_{Y0}\leqq 390(\mathrm{MPa}) \\ 0.45\sigma_{Y0}\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{Y0}}+0.6\right)\exp\left(-\dfrac{\sigma_{Y0}}{294}\right) & \sigma_{Y0}>390(\mathrm{MPa})\end{cases} \tag{5.1}$$

ここに，

${}_{V}T_{E}$ ：シャルピー衝撃試験結果によるエネルギー遷移温度（℃）

σ ：使用応力（許容応力）（MPa），

σ_{Y0} ：公称降伏応力（MPa）

t ：板厚（mm）

T' ：使用限界温度（℃）

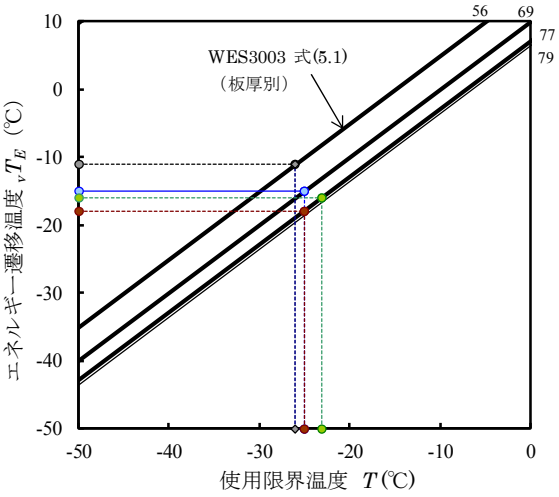
使用限界温度（T'）よりも高温な環境下において，脆性破壊することなく適用可能と判定できる．この式を用いて，シャルピー衝撃試験結果から，厚鋼板の低温下での適用可能性について評価する手法を試みた．

少数主桁などのプレートガーダーは，現場継手位置で断面決定する設計手法をとるため，使用応力は許容応力に対して余裕が少ない場合が多い．本章では，使用応力（σ）は便宜的に道示で規定される許容応力を用いて評価した．

5.4.2　厚鋼板の低温下での靭性評価法

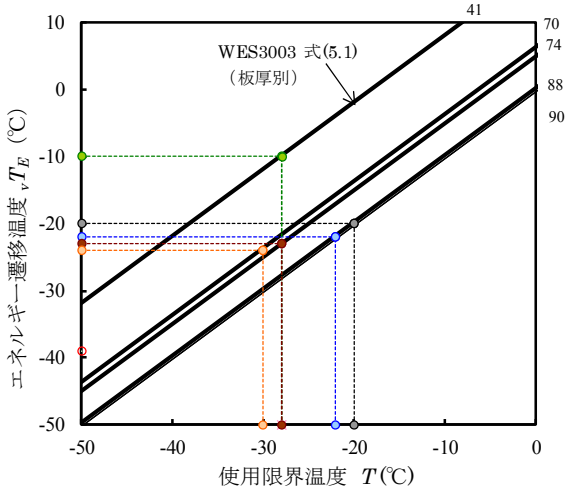
厚鋼板に対して実施したシャルピー衝撃試験の結果から，低温下での適用可能性を評価する一提案として，その適用事例を示す．

現場継手に溶接構造を採用した場合を想定して，溶接部で最脆化部となった Depo に着目して評価した．式(5.1)から求めたエネルギー遷移温度と使用限界温度との関係を，鋼種別に図 5.8 に示す．図中，実線は，式(5.1)にエネルギー遷移温度，板厚，降伏応力および使用応力を代入して得られた直線で，遷移温度と使用限界温度は一次関数で現される．本図から，求めた使用限界温度を北海道の最低温度分布（図 5.1)と対比することで，架橋地域での適用判定が可能となる．



	鋼種	板厚	溶材	遷移温度(℃)	使用限界温度(℃)	凡例
Case-1	SM520C	56mm	標準	-11	-26	
Case-2	SM520C	69mm	標準	-15	-25	
Case-7	SM520C	77mm	低温用	-53	-60	
Case-8	SM520C	77mm	標準	-16	-23	
Case-11	SMA490CW	79mm	標準	-18	-25	

(a) SM520MPa 級



	鋼種	板厚	溶材	遷移温度(℃)	使用限界温度(℃)	凡例
Case-3	SM570	88mm	低温用	-20	-20	
Case-4	SM570	90mm	標準	-22	-22	
Case-5	SM570	41mm	低温用	-39	-57	
Case-6	SM570	41mm	標準	-10	-28	
Case-9	SMA570W	74mm	標準	-23	-28	
Case-10	SM570	70mm	標準	-24	-30	

(b)　SM570MPa 級

図 5.8　遷移温度と使用温度の関係図（Depo）

低温下での適用可能性を評価する一提案として，その適用事例を示す.

【適用事例】

対象鋼材：SM520C,t56mm（実験 CASE-1）

STEP-1：シャルピー衝撃試験によりエネルギー遷移温度を求める

→　図 5.9 より，エネルギー遷移温度：$_{\nu}T_E$ = -11℃（最脆弱部:Depo）

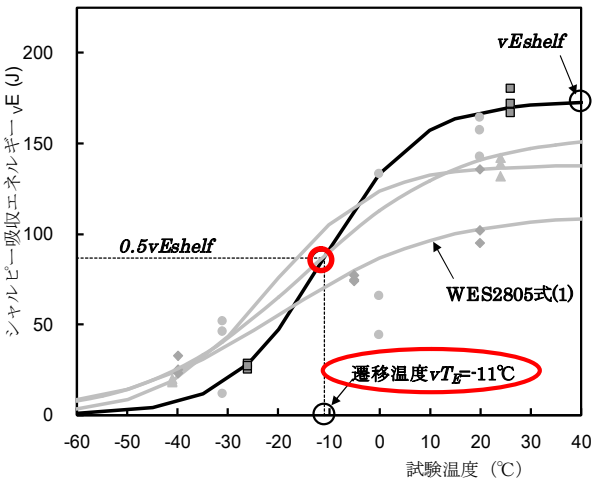


図 5.9　遷移温度と使用温度の関係図

STEP-2：WES 式(5.1)を用いて，使用限界温度を求める

→　使用限界温度：T'=-26℃

STEP-3：架橋地域の最低気温と比較

→　架橋地域の設計最低温度（図 5.1）：T=-20℃（札幌市の場合）

STEP-4:適用判定

→　適用判定：T'(-26℃)≦ T(-20℃)　∴適用可能

これと同様の手法で求めた，全試験ケースの使用限界温度の一覧を表 5.11 に，使用限界温度と板厚との関係を図 5.10 に示す．図中，破線（赤色）は，北海道の設計最低温度-40℃（表 5.1)'を現す.

図 5.10(a)BM（母材）の使用限界温度は，全試験ケースで-40℃以下となり，北海道のどの地域においても適用可能と判定できる．なお，本試験では，板厚 80mm 付近では，遷移温度が高温側に移行する傾向が見られた.

図 5.10(b)Depo（溶接金属部）では，青色を標準溶材，赤色を低温溶材として図示した．標準溶材を用いた試験ケースでは，使用限界温度が-20℃から-30℃と高温側を示す

傾向となった．一方，低温溶材では，試験ケースが少なく，さらに，CASE-3 はアンダマッチ溶材を用いており，一般論としては言及できない．しかしながら，標準溶材に比べ，使用限界温度は低温側となる傾向は見られる．この結果は，厚鋼板を用いた主要部材の現場継手に溶接構造を採用する場合，低温溶材を用いることの有効性を示唆している．なお，実際の施工に際しては，溶接施工試験の実施が不可欠である．また，設計段階においては，鋼材の使用応力を低減することや，地震時慣性力が集中する支点部付近の引張フランジに溶接継手を設けないことなど，脆性破壊発生の防止に効果がある手法を実践することが重要である．

提案した適用判定法は，切欠き試験片による材料の耐衝撃性を基に評価している．このため，初期欠陥や疲労亀裂などの応力集中部が生じていない場合，適用判定が不可であっても即座に脆性破壊を生じるものではない. ゆえに, 適用判定が不可となる鋼板で, これらの応力集中部があり，低温下で過大な荷重が作用する場合，脆性破壊の危険性が高いといえる．

以上，低温下での指標が示されていない厚鋼板の適用判定法として，シャルピー衝撃試験を用いて, 簡易的に評価を行うことができる手法の一提案を示した[5.12)]. 本手法は，工場製作段階での確認試験や，維持管理面での補修補強材料の判定など，実用的な手法と成り得る可能性がある．

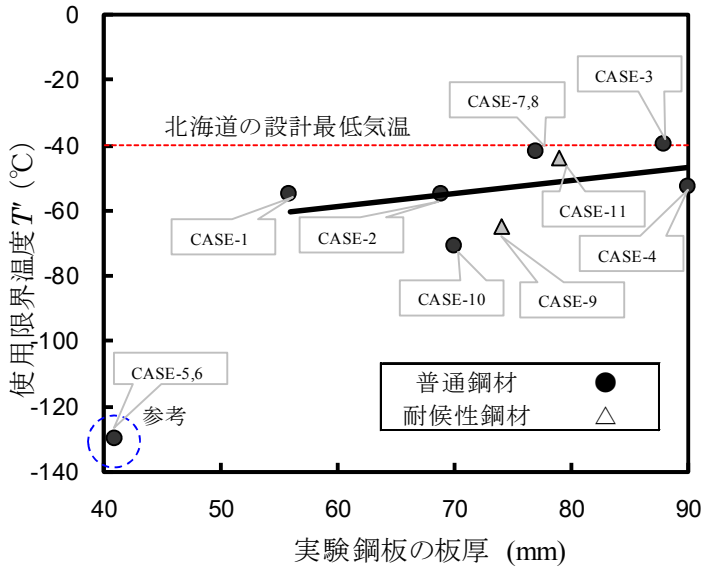
表 5.11　使用限界温度 一覧表

（Depo）

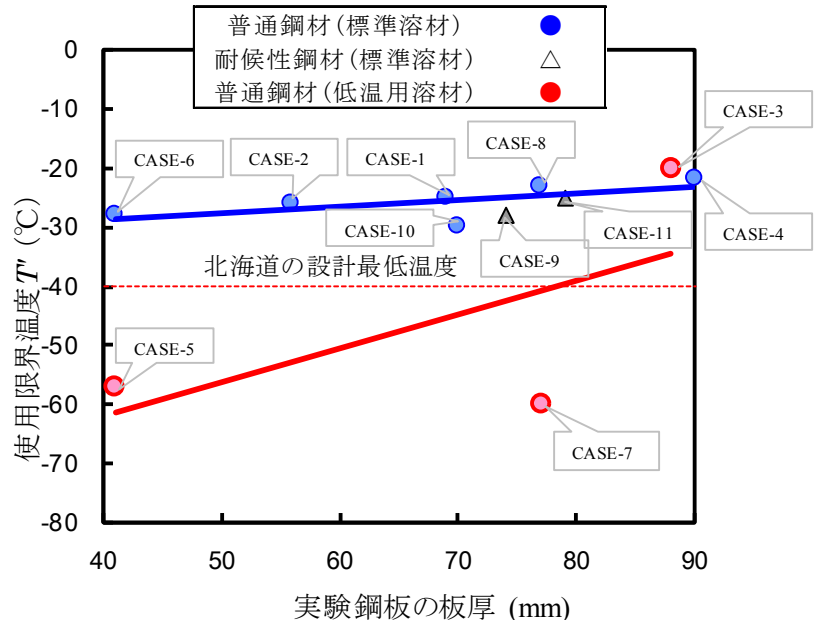
溶接条件	実験ケース	材質	溶接材料	最低使用温度（実験板厚別）　℃									備考
				41 mm	56 mm	69 mm	70 mm	74 mm	77 mm	79 mm	88 mm	90 mm	
条件-1	CASE-1	SM520C	標準			-25							
	CASE-2		標準		-26								
	CASE-3	SM570	低温用								-20		※1
	CASE-4		標準									-22	
条件-2	CASE-5	SM570	低温用	-57									※2
	CASE-6		標準	-28									※2
	CASE-7	SM520C	低温用						-60				※1
	CASE-8		標準						-23				※1
	CASE-9	SMA570W	標準					-28					
条件-3	CASE-10	SM570	標準				-30						
	CASE-11	SMA490CW	標準							-24			※1

※1：アンダマッチ

※2：ミルシートなし



(a) BM（母材）



(b) Depo（溶接金属部）

図 5.10　供試体板厚と使用限界温度の分布

5.5　厚鋼板の鋼種選定における一提案

板厚 40mm を超える厚鋼板を用いる場合の鋼種選定に関する留意点を記す．道示の溶接施工試験の規定では，入熱制限を超える溶接法や施工実績がないなどの特異な条件において溶接施工試験の実施が求められている．すなわち，実績が多い溶接法で実績の多い構造の橋梁を製作する場合，溶接施工試験が行われていないのが現状である．この溶接施工試験には衝撃試験も含まれる．これまで建設された鋼少数主桁の溶接施工試験で実施された衝撃試験では，JIS 規格の母材に対する吸収エネルギー要求値（$vT_{(0℃)}$≧27J など）が指標[5.13)]とされており，低温下での評価は行われていない．

本章に示した衝撃試験の結果から，厚鋼板溶接部で最脆弱部を示した Depo の遷移温度における吸収エネルギーは最低値でも $vT_{(0℃)}$≧50J を示している（図 5.4~5.6）．しかし，WES3003 を準用した使用限界温度は-20℃から-30℃の範囲と高温側を示し，北海道の最低使用温度-40℃の地域に適用した場合，脆性破壊の危険性があると判定された（図 5.10）．これは，脆性破壊面から判定した結果であり，今後建設される鋼橋は，明確な性能評価の観点からもクリアすべき指標と考える．このため，厚鋼板の現場継手に溶接継手を採用する場合，製作段階において，溶接施工試験としてシャルピー衝撃試験を行い，低温下における溶接法や溶接条件の適用可否について判定を行うことが望まれる．この際，本項で提案する WES 規格を準用した判定を満たさない場合は，溶接条件の見直しや低温溶材，低温用鋼の使用などの検討がを要する．一方，設計時においては，発生応力の低減や現場溶接継手を設けない（高強度高力ボルトの採用）などの配慮が必要となる．設計時の構造細目としては，応力集中や地震時慣性力が集中する支点部付近には溶接継手を設けないなど，脆性破壊防止に効果的な対策を講じることも重要である．

この意図を踏まえ，厚鋼板の低温下における靭性評価のフロー（案）を図 5.11 に示す．

なお，現行基準では，厚鋼板の現場溶接継手を低減する意図から，高力ボルト列数が 12 列まで拡大された．しかし，現時点では高力ボルトの市場性に変化はなく，ボルト首下長さは従来と同様に 145mm であるため，母材板厚は 55mm 前後から溶接継手構造に移行する可能性があることを参考に記す．

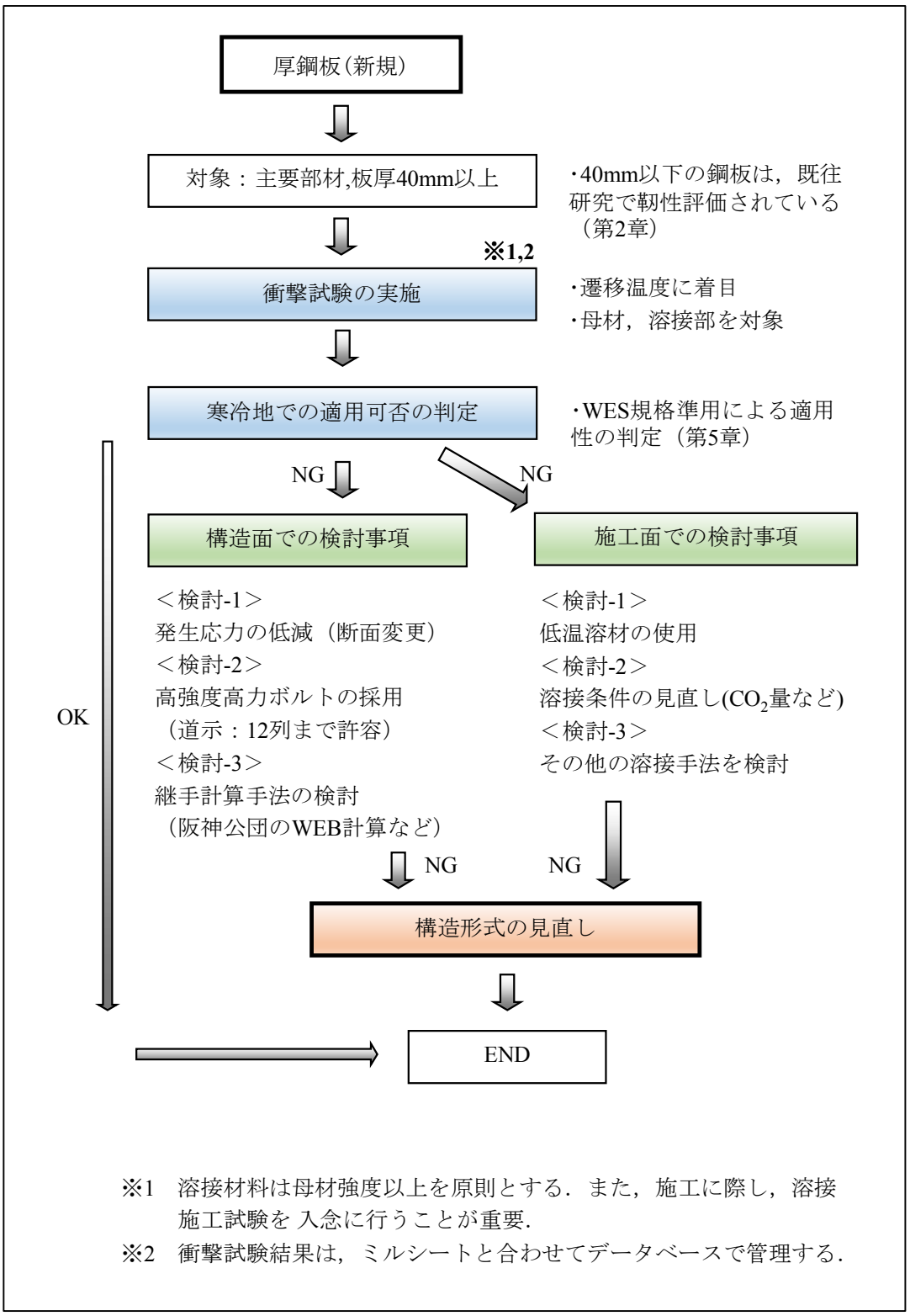


図 5.11　厚鋼板の低温下における靭性評価のフロー（案）

5.6 本章のまとめ

少数主桁などの合理化桁に適用される厚鋼板は低温下での靭性指標が整備されていない．このため，厚鋼板の低温下での適用性について評価・判定することを目的として，シャルピー衝撃試験結果から，簡易的に適用性を評価できる手法の一提案を示した．

得られた主な結果は以下の通りである．

(1) シャルピー衝撃試験に際し，溶接試験片のマクロ試験を行った結果，特定の溶接条件に溶接欠陥が見られた．多層盛溶接において，電流や電圧を過度に抑えた場合，溶接欠陥を誘発する可能性を示唆した．

(2) 薄板や大入熱溶接では，溶接部の靭性が母材に比べて著しく劣化する HAZ や Bond の脆化が問題となる事例が多い．本試験では最脆化部は Depo に移行する傾向を示した．低入熱溶接と厚鋼板による入熱の冷却速度が影響しているものと考えられた．

(3) アンダマッチ溶材を用いた試験では，低温溶材を用いても遷移温度が高温側を呈した．Depo の化学成分を分析した結果，CO_2 量が不足すると，気中の窒素（N）の巻き込み量が多くなり，靭性の劣化が進む可能性を示唆した．

(4) オーバーマッチした溶材の選定を基本として，CO_2 量を意識した溶接施工試験を実施し，低温領域に適した溶材の選定ならびに，良質な母材を用いることで，厚鋼板溶接部の脆化を抑制できる可能性を示唆した．

(5) WES3003 の算定式を準用して，シャルピー衝撃試験結果から，厚鋼板の低温下での適用可能性について評価する手法を試みた．この式では，遷移温度から使用限界温度を求めることができる．使用限界温度を最低温度分布と対比することで，架橋地域での適用判定が可能になることを示した．

(6) 母材（BM）の使用限界温度は，全ての試験で-40℃よりも低温側となり，北海道のどの地域においても適用可能と判定できる．なお，本試験では，厚板になるほど遷移温度が高温側に移行する傾向が見られ，極厚板の低温下での使用には留意が必要であることを示唆した．

(7) 溶接金属部（Depo）の使用限界温度は，標準溶材の場合，-20℃から-30℃の範囲と高温側を示した．低温溶材は，標準溶材に比べ，使用限界温度は低温側となる傾向がある．低温溶材を用いることの有効性を示した．

(8) 実際の施工に際しては，溶接施工試験の実施が不可欠であること，設計段階において使用応力の低減や構造詳細に留意するなど，脆性破壊発生の防止に効果がある手法を実践すべきであることを考察した．

(9) 厚鋼板を用いた新橋の母材と溶接部を対象とした，低温下における衝撃特性判定のフロー（案）を示した．

(10) 本手法は，工場製作段階での確認試験や，維持管理面での補修補強材料の判定，実績が少ない材料の適用判定など，実用的な手法と成り得る可能性を示唆した．

参考文献（第 5 章）

5.1) 北海道開発局土木試験所構造研究室：鋼材の低温域における溶接性と安定性に関する試験調査（鋼材のシャルピー衝撃試験結果の整理集計），1985.

5.2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編，鋼種の選定，pp117-121，2012.

5.3) 日本溶接協会：低温用圧延鋼板判定基準 WES3003，1995.

5.4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編，溶接施工法，pp458-471，2012.

5.5) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，2011.

5.6) 小森武，押山和徳，尾辻亨：第二東名高速道路 共栄ランプ橋（鋼上部工）工事，サクラダ技報，No.11，2000.

5.7) 藤田敏明，湯田誠，米山徹，多田賢：橋梁用高機能鋼材の加工性・溶接性について，川田技報，Vol.25，2006.

5.8) 中村隆志，石川一平，長岡睦巳，恒遠恭一：第二黒部谷橋工事報告て，クリモト技報，No.48，2003.

5.9) 日本溶接協会 溶接情報センター：WEB 版 接合・溶接技術 Q&A1000，2013.

5.10) 日本工業規格：鋼のマクロ組織試験方法 JIS G0553，2008.

5.11) 金裕哲，廣畑幹人，松縄秀範，表真也，三田村浩：寒冷地における経年鋼材に対する脆性破壊発生有無の評価･判定, 鋼構造年次論文報告集, Vol.20, pp.599-606, 2012.

5.12) 松縄秀範，表真也，三田村浩，林川俊郎：少数主桁に用いる厚鋼板の低温下での適用評価法に関する一提案，鋼構造年次論文報告集，Vol.21，pp.770-776，2013.

5.13) 宮内博英，高橋昭一，川尻克利，林芳文，遠藤裕幸：耐候性 2 主桁橋の現場溶接施工法に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集，第 53 号(A)，pp.246-251，1997.

第6章　鋼道路橋における点検手法の一提案

6.1　概説

橋梁点検は，国土交通省が定めた点検要領[6.1)]に代表される．

点検の第一目的は，橋梁の現状を把握し，橋梁の安全性や使用性に悪影響を及ぼしている重大な損傷を早期に発見して適切な措置をとることである．第二の目的は，維持管理の基礎資料を蓄積し，継続的かつ効果的な点検や計画的な補修・補強を行うことにある．今後，維持管理の重要性がさらに高まることは明白であり，随時，新しい知見を取り入れた点検手法が望まれている．

第 3 章，第 5 章で実施したシャルピー衝撃試験および CTOD 試験は，切欠きや疲労き裂等の応力集中部から発生する脆性破壊に対する材料の抵抗性（靭性）を評価するものである．第 4 章で取り扱った経年鋼材の中には，靭性に関連する材料特性である化学組成やシャルピー吸収エネルギーおよびエネルギー遷移温度が著しく劣るものが存在した．このような経年鋼材を使用している鋼道路橋において，溶接継手部に内在する初期欠陥（ブローホールやアンダーカット）や疲労き裂等の応力集中部が存在し，環境温度が低下した場合に過大荷重が付与されると，脆性破壊が発生する危険性が高くなる．

鋼道路橋の維持管理において，脆性破壊発生の有無を評価・判定する観点から，以下の項目が重要となる．

① 橋梁に使用されている材料の各種特性（靭性）を把握しておくこと

② 橋梁設置環境の最低温度を明確にしておくこと

③ 溶接継手部の初期欠陥や疲労き裂の有無を点検すること

特に，建設から長い年月が経過した橋梁については，建設当時の使用材料等のデータが不十分である可能性がある．そのため，橋梁の点検や補修時期に合わせて鋼材サンプルを採取し，一連の材料特性評価試験を実施しておくことが，その後の維持管理において有効になる．

経年鋼材は，現在と比べると材料品質は劣るが，一方で現在でも重大な損傷がなく供用されている橋梁も多くあるのは事実である．“古い時代に建設されたもの＝悪いもの“ではなく，これらの経年橋梁には，構造的欠陥や初期欠陥による亀裂発生の有無など，材料特性評価と合わせて外観点検手法を充実させることが必要と考える．これらの背景の下，本章では，脆性破壊の防止を目的として，定期点検や臨時点検などにおいて，疲労亀裂などの生じやすい部位の外観調査と材料試験の 2 つの調査を併用する点検手法の一提案を示す．

6.2 経年橋梁における点検手法の提案

6.2.1 外観調査（案）

近年，全国的に鋼床版や鋼製橋脚の隅角部は，疲労亀裂が生じた事例が多く報告[6.2)]されている．鋼床版下面のUリブの内在亀裂は，目視での検出が困難であり，超音波探傷を用いる手法[6.3)]や橋梁上を車両が通過した際の構造材料に生じる応力変動による微少な温度変動を赤外線サーモグラフィーで遠隔から計測する手法[6.4)]など研究が行われている．一方，北海道においては，重交通路線の一部の長大橋において，鋼床版の疲労亀裂が見られるものの，疲労亀裂の発生事例は少ない状況にある．

鋼床版の疲労亀裂に関しては，独立行政法人土木研究所が調査マニュアル（案）を平成21年に作成している．本章ではこれを除く橋種を対象として，脆性破壊発生の防止を目的とした主桁下フランジの亀裂や変形など，外観点検の実施を提案する．

なお，点検に際し，大地震時などに脆性破壊に対する危険性が高い橋梁など，調査対象とする橋梁の絞り込みが必要であることや，供用下では調査効率が低下するなど，検討課題がある．そこで，外観調査として，まず，寒冷地特有の気象条件や環境条件，構造性などを勘案したハザードマップを作成することで，計画的・集中的な管理が可能になるもと考える．ハザードマップで考慮すべきポイントと課題については後述する．外観調査では，支承回りの応力集中部や支間中央の引張応力が卓越する部位に限定して，健全性を目視点検により判定し，外観変状が見られる場合は詳細調査として浸透探勝試験による亀裂の検出を行い，補修補強検討に移行する．また，外観調査に合わせて，材料試験用の試料採取を計画する．これら，外観調査のフロー（案）を図6.1に示す．

6.2.2 材料試験（案）

調査対象橋梁の脆性破壊発生の可能性について評価・判定することを目的として，材料試験を提案する．供試体は，構造的に支障とならない桁端部などから採取して，化学成分分析，引張試験および衝撃試験を実施する．化学成分と引張試験の結果は，建設時および現在のJIS規格と照合し，衝撃試験の結果は，第3章，第5章に示したWES規格準用により脆性破壊発生の可能性について判定する．これらの材料試験と衝撃試験の結果は，化学成分による遷移温度への影響として，第4章に示した図に反映することで，材料特性の傾向について考察が可能となる．このように，外観調査に合わせて材料試験を実施し，さらに基礎実験データを蓄積することで，経年橋梁の適切な補修・補強や使用安全性の確保につながるものと考える．材料試験のフロー（案）を図6.2に示す．

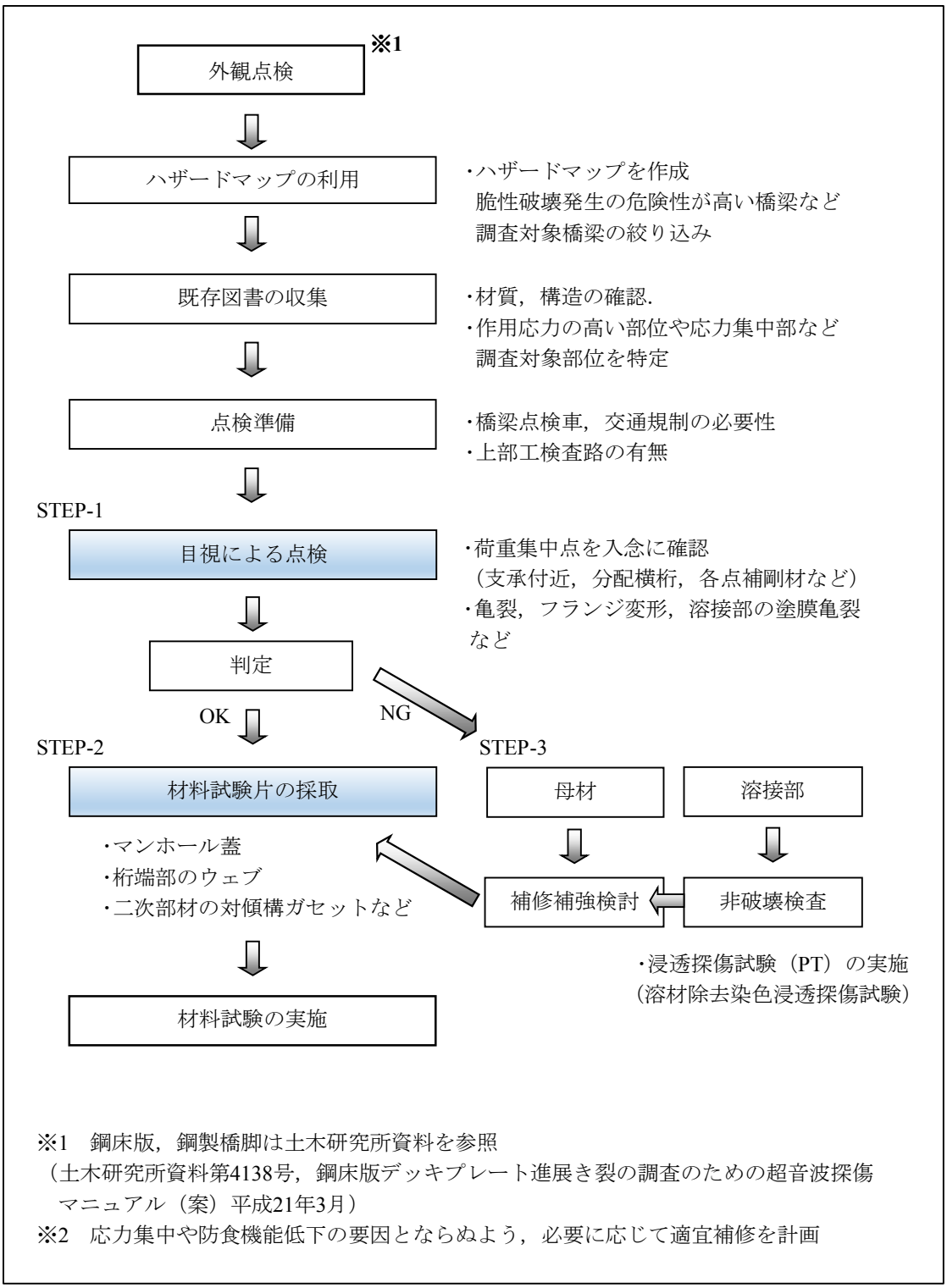


図 6.1　外観点検のフロー（案）

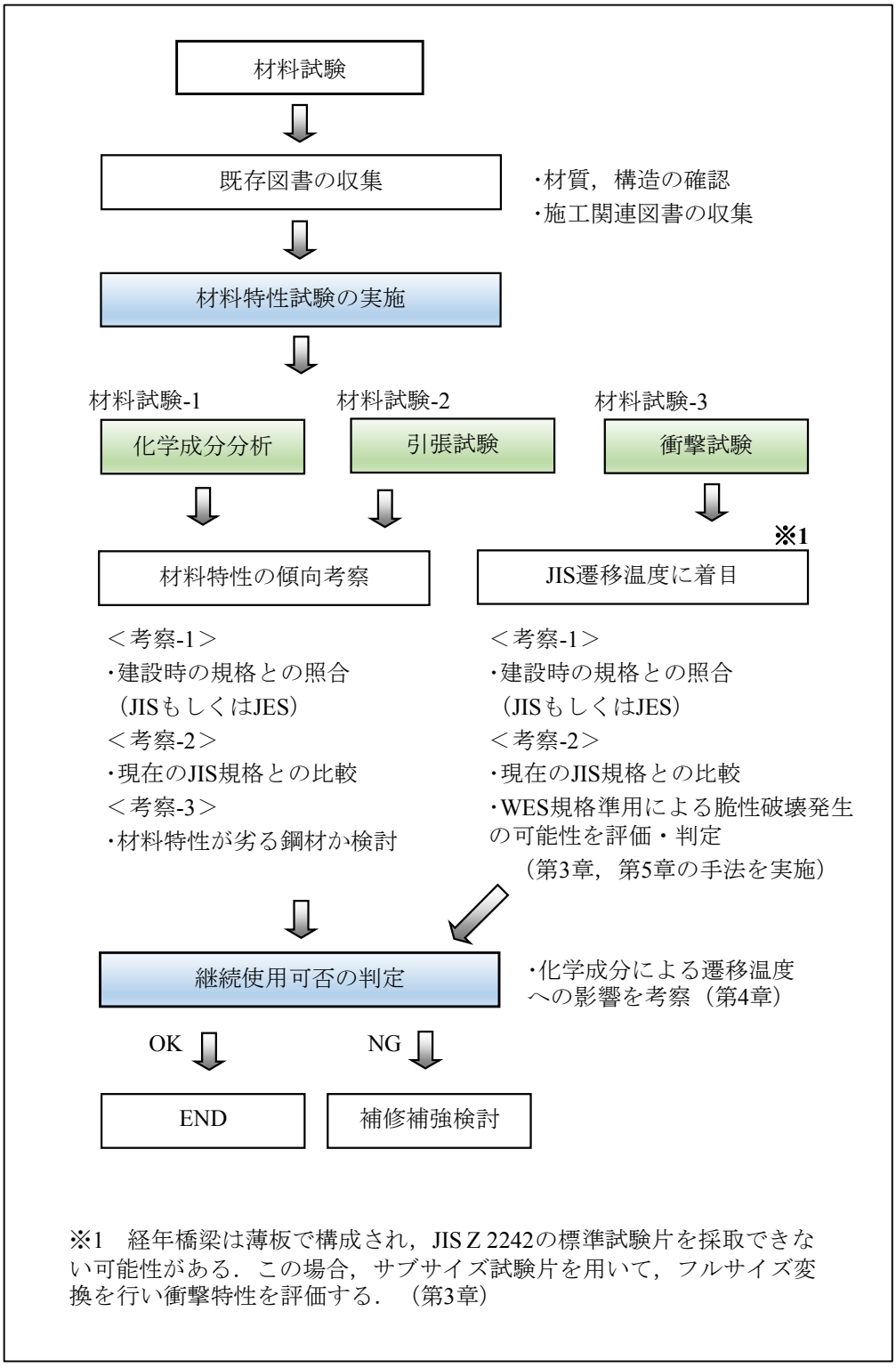
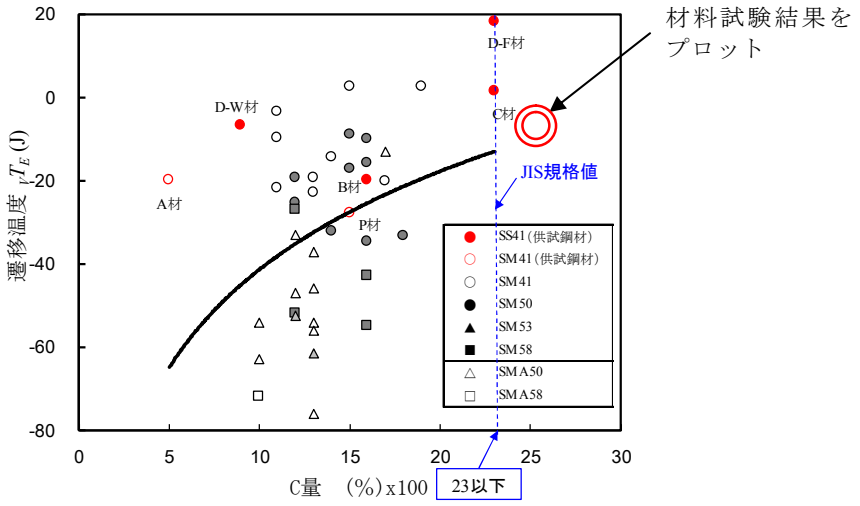


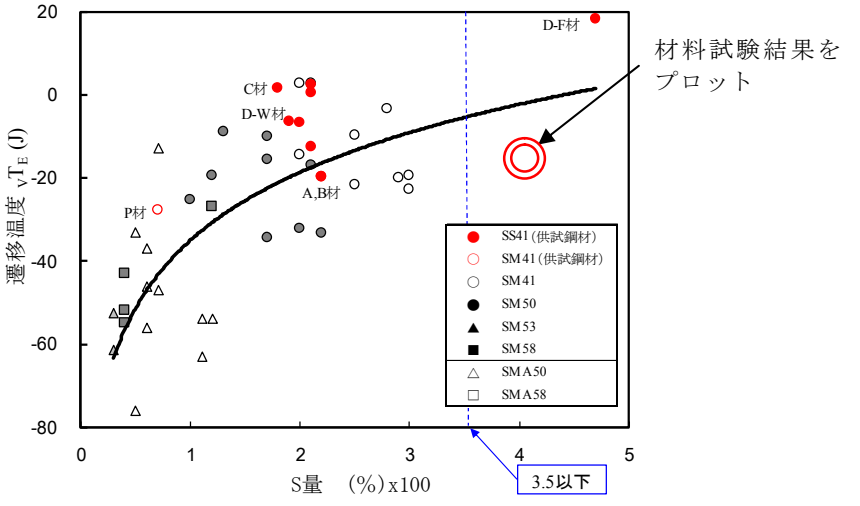
図 6.2　材料試験のフロー（案）

6.3　経年鋼材の材料特性の傾向

図 6.2 による材料試験の結果は，エネルギー遷移温度に着目した衝撃特性と，化学成分の両面から考察する手法を考える．一例として，化学成分のうち，靭性や溶接性に影響が大きいとされる C, Mn, P, S と遷移温度の関係については，図 6.3 などと対比する．これにより，その時代の材料特性の傾向を探ることが可能と考えられる．しかし，明確な考察には，相互関係の分析（多変量解析）が必要となる．維持管理において適切な補修・補強を行うためには，経年鋼材の材料特性や衝撃特性などの基礎実験データの蓄積が不可欠と考える．



(a) C 量の影響



(b) S 量の影響

図 6.3　化学成分の遷移温度への影響（一例）

6.4　ハザードマップの作成

冬期に大規模地震が発生した場合など，脆性破壊発生の可能性について，あらかじめ着目すべき地域を特定しておくことで，臨時点検の効率化が期待できる．ここでは，北海道特有の気象・環境条件に着目して，机上でスクリーニングする手法としてハザードマップの作成について考える．特定される地域は，前項の外観調査と材料試験の結果と合わせて，脆性破壊に対する評価に反映することが効果的といえる．

一例として，北海道特有の気象・環境条件のうち，最低気温，地震の影響，塩害，凍害に着目した．図 6.4 は，北海道の最低気温分布図 [6.5] で，寒冷地域として脆性破壊の発生に対し，環境面では最も注意すべき気象条件である．図 6.5 には，耐震設計に用いる設計水平震度算出用の地域別補正係数 [6.6] を掲載した．本図は，規模の大きい地震が発生しやすい地域や震源域からの距離による影響を考慮した補正係数で示され，A→C の順にその影響が小さくなる．北海道の震央分布 [6.5] を示した図 6.6 では，十勝沖や釧路沖近郊に震央が集中しており，地震時に過大荷重を受ける可能性が高い地域と一致している．図 6.7 は，耐候性鋼材の裸使用の適用を制約した地域 [6.5] を示した図で，飛来塩分量調査を基に海岸線からの距離で表現しており，塩害地域と相関がある．図 6.8 は，凍害危険度分布 [6.7] を示した図で，内陸における凍害劣化の厳しさを表し，最低気温分布と立地環境を考慮して提案されている．

図 6.4 ~図 6.8 の気象・環境条件と，経年橋梁の供用年数や補修履歴，材料特性などの情報を一元管理することができれば，より計画的な維持管理が可能と考える．

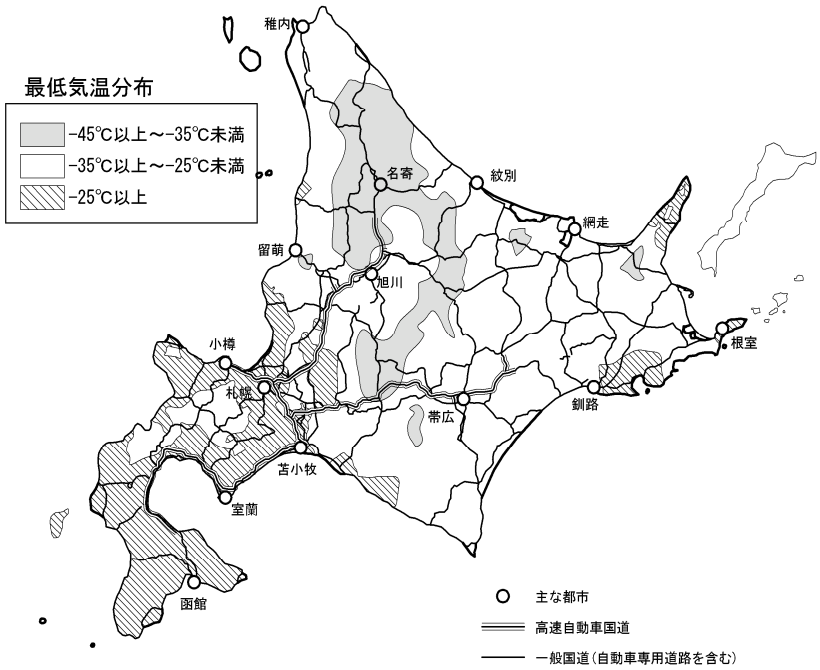


図 6.4　最低気温分布図 [6.5]

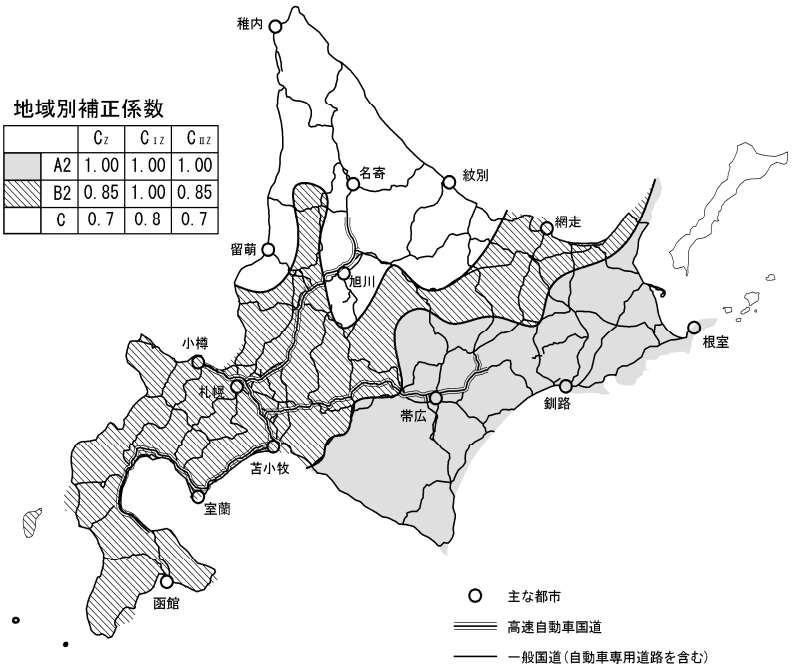


図 6.5　設計水平震度算出用の地域別補正係数 [6.6)]

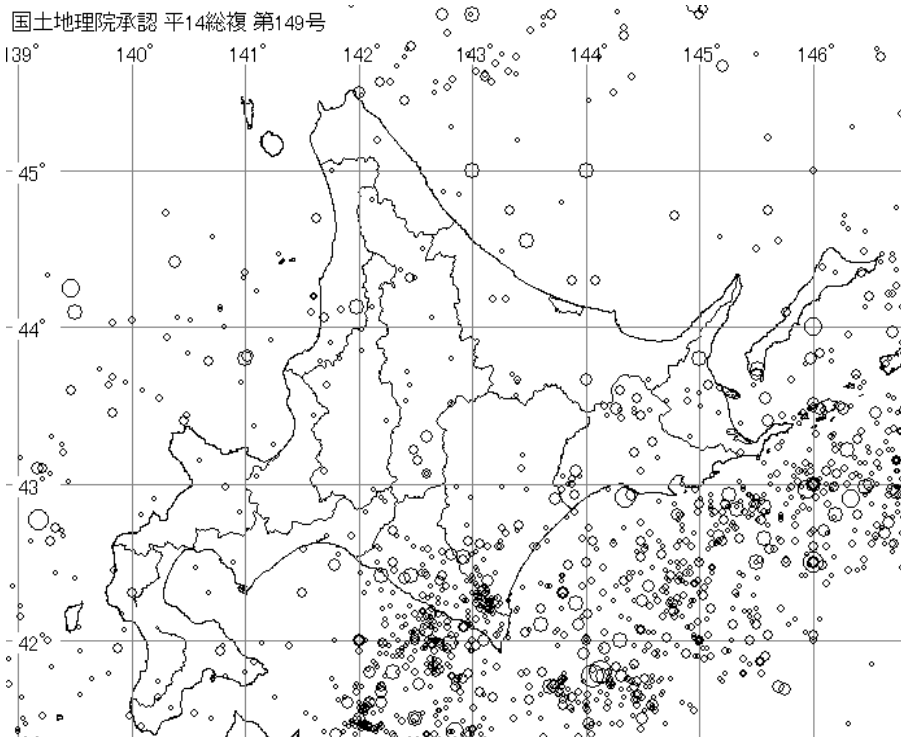


図 6.6　震央分布図 [6.5)]

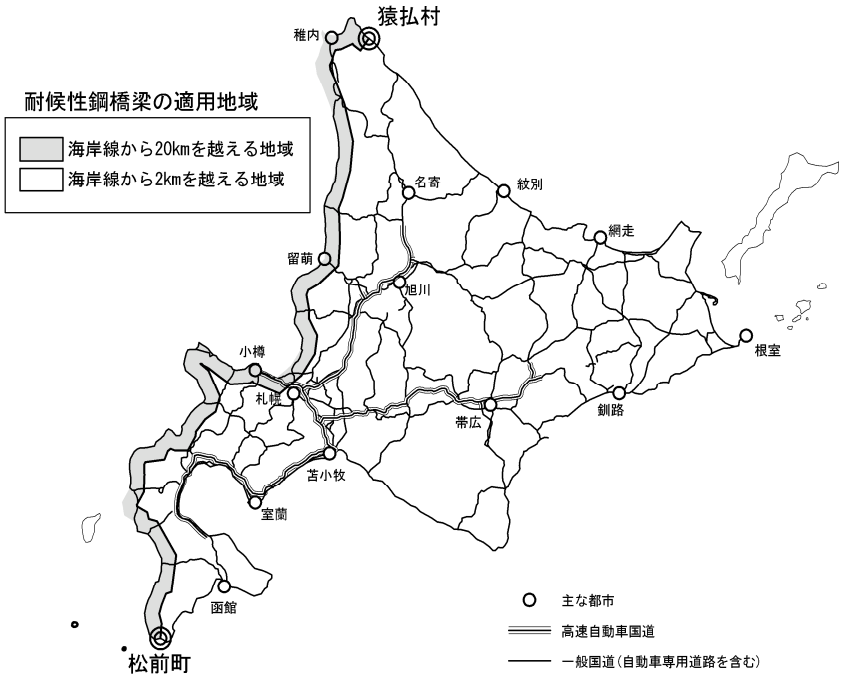


図 6.7　耐候性鋼材の裸使用の適用地域 [6.5)]

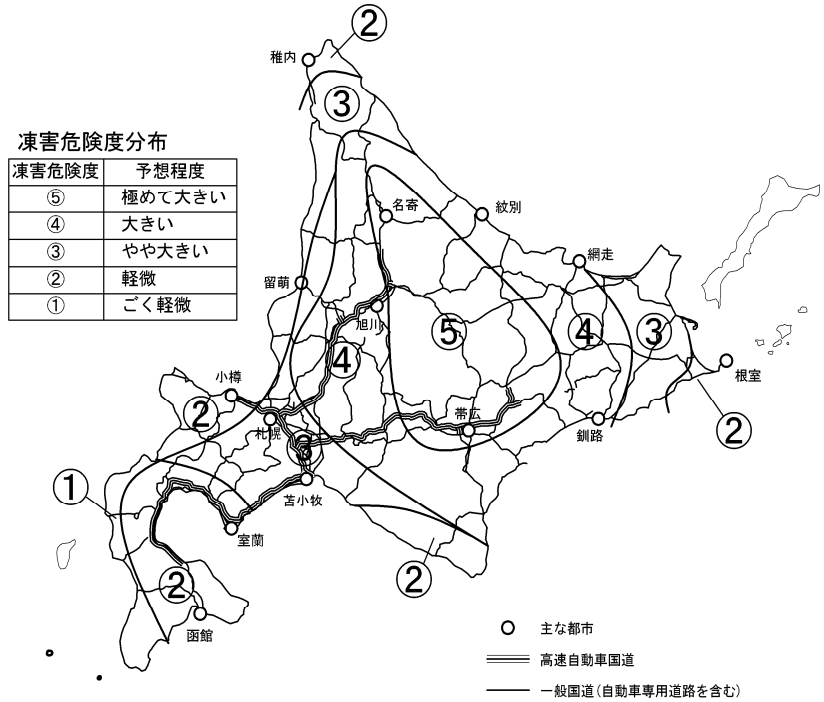


図 6.8　凍害危険度分布図 [6.7)]

6.5 本章のまとめ

寒冷地における経年鋼材の使用安全性の観点から，脆性破壊の防止を目的として，疲労亀裂や変形，初期欠陥などの生じやすい部位の外観調査と材料試験を併用する手法を示した．主な要旨は以下の通りである．

(1) 寒冷地特有の気象条件や環境条件，構造性などを勘案したハザードマップを作成し，脆性破壊発生の危険性が高い地域の橋梁を絞り込み，応力集中部など限定して調査し，変状が見られる場合は詳細調査を行う外観調査のフロー（案）を示した．

(2) 供試体を採取して材料特性試験を実施し，WES 規格準用により脆性破壊の可能性について判定するとともに，化学成分による遷移温度への影響ついて考察する材料試験のフロー（案）を示した．

(3) 冬期に大規模地震が発生した場合など，脆性破壊発生の可能性について，あらかじめ着目すべき地域を特定しておくことで，臨時点検の効率化が期待できる手法としてハザードマップの作成方法について考察した．

(4) 経年鋼材の基礎実験データを蓄積し，気象・環境条件や供用年数，補修履歴，材料特性などの情報を一元管理することで，経年橋梁の適切な補修・補強や使用安全性につながる可能性を記した．

参考文献（第 6 章）

6.1) 国土交通省：橋梁定期点検要領（案），2004.

6.2) 例えば：阪神高速道路の鋼製橋脚隅角部損傷 平成 14 年度調査研究報告書，2002

6.3) 脆性破壊事例の要因まとめ：鋼床版デッキプレート進展き裂の調査のための超音波探傷マニュアル（案），2007.

6.4) 阪上隆英，玉越隆史，和泉遊以，石尾真理，久保司郎：自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィによるデッキ貫通疲労き裂検知，土木学会平成 20 年度全国大会講演概要集，2008.

6.5) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，2012.

6.6) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅴ耐震設計編，2012.

6.7) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメント技術年報 XXIX，1975.

第7章　結論

7.1　研究成果のまとめ

近年，鋼道路橋の経年橋梁では，損傷や機能の低下が数多く報告されており，補修補強によりこれらを適切に維持管理していくことの重要性が高まっている．鋼道路橋における既往の被災履歴では，地震時の衝撃や疲労により，鋼材や溶接継手の靭性劣化部を起点とする脆性的な破壊形態の発生が見られる．これらの破壊形態は，継続的観察により発見できるケースは稀で，そのほとんどが瞬時に亀裂発生を呈して崩壊に至る．特に北海道などの寒冷な気候の基では，鋼材の衝撃吸収エネルギーが著しく低下する傾向が知られており，低温下における脆性破壊の防止が重要である．

北海道ではこれまで，低温下における板厚 40mm 以下の鋼材の使用判定試験を実施した既往の文献を基に，道示の鋼種選定よりも厳しい独自の鋼種選定を整備して橋梁を建設してきた．しかし今後，建設後 50 年を越える橋梁が急増する中，計画的な維持管理に向けて，経年橋梁に使用される鋼材の継続使用の可否判定など，更なる検討が不可欠である．一方，近年の橋梁では，少数主桁などの合理化桁が多く開発され，厚板化が進んでいる．しかしながら，板厚 40mm を超える厚鋼板や溶接継手部を対象とした靭性に関する研究や文献は少なく，低温下における鋼材の性能評価が課題となっている．

これらの背景から，本研究では寒冷地において，鋼道路橋の安全な維持管理を目指し，経年鋼材の使用安全性の評価方法を提案することを目的として研究を行った．研究では，基礎実験として，経年鋼材と現在の厚鋼板を供試体として，材料試験，衝撃試験および一部の経年鋼材を対象にCTOD試験を実施した．試験の結果は，鋼材の遷移温度に着目して衝撃特性を評価することで，低温下における鋼材の使用可否判定が可能となることを示した．また，経年鋼材の材料特性から維持管理における相対的な留意点について考察し，寒冷地における鋼橋の点検手法の一提案を示した．

本研究は全7 章で構成した．各章の概要は以下のとおりである．

第 1 章では，低温下における鋼材の靭性評価手法に関する既往研究をレビューし，本研究の背景および目的を述べた．北海道では，既往の研究を基に鋼橋建設時の鋼種選定が整備されている．しかし，既往研究では，北海道の最低使用温度-40℃で JIS の靭性要求値（$vE_{(-40℃)}$≧47J など）を指標とするなど，脆性破壊に対する評価が不明瞭であること，さらには，当時の試験結果で判定基準を満たさない供試体が相当数あり，適用可否の判定基準が曖昧であるなどの課題がある．維持管理において適切な補修・補強を行うためにも，鋼材の要求性能を明確にする必要がある．このためには，経年鋼材の材料特性や衝撃特性などの基礎実験データが不可欠だが，不足している現状にある．板厚 40mm を超える厚鋼板溶接部の靭性評価についても同様のことがいえる．これらの背景と課題から，鋼道路橋の経年鋼材における使用安全性の評価を研究の目的とした．

第 2 章では，現状における鋼材の靭性指標の明確化を目的として，規格・基準の背景や変遷，思想について考察した．鋼道路橋に用いる鋼材は，安定した品質が確保されていることが前提条件であり，道示では，JIS で規格化された材料を用いることが規定されている．JIS では，鋼材の靭性評価として，ある試験温度におけるシャルピー吸収エネルギー値が要求されている．この要求値は，JIS 制定時における諸外国の規格を準用したもので，制定後 50 年近く経過した現在においても当時の規格値が踏襲されている状況にあることを当時の文献から紹介した．また，脆性破壊に対する安全性の評価が可能な手法として，石油貯槽や原子力設備などの規格に用いられている日本溶接協会規格（WES）の鋼道路橋への適用について考察した．

第 3 章では，経年鋼材の脆性破壊発生有無の判定を目的として，北海道各地から採取した経年鋼材を供試体として，化学成分，機械的性質，シャルピー衝撃試験および一部の供試体に対して CTOD 試験を実施した結果と考察を述べた．JIS で要求するシャルピー吸収エネルギーの最小値では，脆性破壊に対する指標として不明瞭である．これに対し，CTOD 試験などの破壊靭性試験を用いることで，脆性－延性破壊の境界温度（遷移温度）を精度よく求めることができ，シャルピー衝撃試験に代わる低温下での靭性試験となり得る可能性がある．しかしながら，CTOD 試験は実験費用が高価で試験方法も煩雑なため，実用的な手法とはなり難い．そこで，簡易な試験方法でかつ脆性破壊に対して安全性の評価が可能な手法として，シャルピー衝撃試験のエネルギー遷移温度に着目し，WES3003 の鋼板判定基準を準用することで，低温下における経年鋼材の脆性破壊に対する評価・判定を行った．また，WES2805 では，シャルピー衝撃試験におけるエネルギー遷移温度 vT_E は，CTOD 試験における延性破壊－脆性破壊の境界となる温度に対応するとして相関式が提案されている．一部の供試体に対して CTOD 試験を行い，経年鋼材においてもシャルピー衝撃試験のエネルギー遷移温度との相関性が高いことを検証した．この結果からも，WES3003 の鋼板判定基準を準用し，シャルピー衝撃試験のエネルギー遷移温度に着目した評価方法に適正があることを示した．

一方，経年橋梁の主要部材の鋼材は薄板が多く，シャルピー衝撃試験のフルサイズ試験片（10mm）を採取できない可能性がある．この場合，JIS ではサブサイズ（7.5mm）やハーフサイズ試験片（5mm）を用いるとされているが，フルサイズ試験片との関係は示されていない．試験片厚さが実験結果に及ぼす影響を検討する目的で，一部の経年鋼材に対して，各種厚さの試験片を作製してシャルピー衝撃試験を実施した．実験結果は，ASTM や WES に提案される吸収エネルギーや遷移温度のフルサイズ変換手法を用いて評価した．これらのフルサイズ変換手法では必ずしも整合する結果ではなかったが，試験片厚が薄くなるとエネルギー遷移温度が低下する傾向は確認できた．フルサイズ変換していない遷移温度を用いて脆性破壊の発生有無を判定した場合，危険側の評価を与えることとなる．鋼道路橋における経年鋼材の材料特性評価においてシャルピー衝撃試験を実施する際，フルサイズ試験片が採取できない場合，可能な限り原厚に近い試験片厚さを選定し，フルサイズ変換することの重要性を一連の実験結果は示唆した．

第 4 章では，経年鋼材の相対的な靭性の傾向を把握する目的で，第 3 章に示した実験結果と既往文献の公表資料から，経年鋼材のエネルギー遷移温度と化学成分の関係に着目して，使用安全性について考察した．エネルギー遷移温度と母材板厚の関係について WES3003 を用いて算出した使用限界温度に着目すると，1960 年代前半の 400MPa 級鋼は，相対的に使用限界温度が高温側に現れ，設計応力に余裕がある部位に使用されていても，低温下においては脆性破壊の危険性がある材料といえる．また，母材の遷移温度は溶接部よりも高温側に分布する傾向を示した．吸収エネルギーに着目すると，1960 年代前半の 400MPa 級鋼は $vT_{(0℃)}$ で 27J を大きく下回る鋼材も見られた．

遷移温度と化学成分の関係に着目すると，1960 年代前半の 400MPa 級鋼は，C，S の含有量は多く，Mn は少ない傾向を示し，遷移温度が高温側となる傾向に相関性が見られた．これらの結果から，1960 年代前半以前に製鋼された 400MPa 級の鋼材は，製鋼技術が未発達な時代のため，化学成分に S の含有量が多く，衝撃性能が著しく劣る鋼材が多く存在する可能性を示した．また，炭素当量 Ceq と溶接割れ感受性組成 P_{CM} の値は，現在の JIS の要求値を満たしているが，評価式に含まれない S 量の多い時代の鋼種は，補修補強時の溶接性の指標として用いる場合に注意が必要であることを記した．

従来から多くの規定は経験則に基づくシャルピー衝撃値により規定されてきた．JIS の靭性要求値を基に建設された鋼橋には長い安全実績があり，シャルピー吸収エネルギーが靭性評価において相対的な指標とされる所以である．そこで，JIS の靭性要求値と低温下での使用条件について検証を試みた．JIS に規定されるシャルピー衝撃試験の試験温度（$vT_{(0℃)}$，$vT_{(-5℃)}$）は動的試験のため使用温度に変換すると，板厚 30mm 以下の鋼板は使用温度が-30℃程度以下に相当することが解った．これは，北海道の最低気温分布の 85%を網羅する温度である．経年橋梁は薄板で構成されることが多く，JIS の靭性要求値は，低温下においても一定の安全性を有する相対的指標といえる．

第 5 章では，厚鋼板における低温下での靭性評価を目的として，少数主桁で使用頻度の高い鋼種を対象に，母材および溶接継手部に対して衝撃試験を実施した結果と考察を述べた．WES3003 の算定式を用いて，シャルピー衝撃試験結果から，厚鋼板の低温下での適用可能性について評価する手法を試みた．この評価式を準用することで，遷移温度から使用限界温度を求めることができる．使用限界温度を最低温度分布と対比することで，架橋地域での適用可能性について評価した．

標準溶材を用いた試験ケースでは，使用限界温度が-20℃から-30℃と高温側を示す傾向となった．一方，低温溶材では，試験ケースが少なく，一般論としては言及できない．しかしながら，標準溶材に比べ，使用限界温度は低温側となる傾向は見られる．厚鋼板を用いた主要部材の現場継手に溶接構造を採用する場合，低温溶材を用いることの有効性を示唆した．なお，実際の施工に際しては，溶接施工試験の実施が不可欠である．また，設計段階においては，鋼材の使用応力を低減することや，地震時慣性力が集中する支点部付近の引張フランジに溶接継手を設けないことなど，脆性破壊発生の防止に効果がある手法を実践することが重要である．提案した適用判定法は，切欠き試験片による

材料の耐衝撃性を基に評価している．このため，初期欠陥や疲労亀裂などの応力集中部が生じていない場合,適用判定が不可であっても即座に脆性破壊を生じるものではない．ゆえに，適用判定が不可となる鋼板で，これら応力集中部があり，低温下で過大な荷重が作用する場合，脆性破壊の危険性が高いといえる．以上，低温下での指標が示されていない厚鋼板の適用判定法として，シャルピー衝撃試験を用いて，簡易的に評価を行うことができる手法の一提案を示した．本手法は，工場製作段階での確認試験や，維持管理面での補修補強材料の判定，さらには，実績が少ない材料の適用判定など，実用的な手法と成り得る可能性がある．

第 6 章では，寒冷地における経年鋼材の使用安全性の観点から，脆性破壊の防止を目的として，前章までの考察から，鋼道路橋における点検手法の一提案を示した．疲労亀裂や変形，初期欠陥が生じやすい部位に着目した外観調査と材料試験の 2 つの調査フローを示した．外観調査では，支承回りの応力集中部や支間中央の引張応力が卓越する部位に限定して，健全性を目視点検により判定する．外観変状が見られる場合は詳細調査として浸透探勝試験による亀裂の検出を行い，補修補強設計に移行するものである．一方，材料試験では，桁端部などから供試体を採取して，化学成分分析と衝撃試験を実施して，第 3 章に示した手法により，評価対象鋼材の継続使用可否を評価する．この材料試験結果と衝撃試験結果は，第 4 章に示した化学成分による遷移温度への影響図に反映することで，材料特性の傾向について考察することを提案した．これら，経年橋梁の基礎実験データを蓄積することで，経年橋梁の適切な補修・補強や使用安全性を確保できるものと考える．

7.2　課題と今後の展望

(1) 経年橋梁の基礎実験データの蓄積

コンクリートは材料が不均一で材料劣化も生じやすく，劣化が顕在化しやすい材料であることから，維持補修分野は急速に進化している．一方，鋼材はマクロ的にみると材質は均一であり，厳しい環境下で長年供用されても，機械的性質や化学成分の変化は少ない材料と認識されている．また，薄肉構造物としての設計理論は古くから体系化されていることからも，近年の標準的な鋼橋においては供用中に重大な損傷を起こした事例は少ない．このような背景から，鋼橋に用いられた鋼材の材料劣化に関するデータが蓄積されていないのが現状と考えられる.“重大な損傷がなければ安全”ではない.例えば，大規模な地震履歴を受けた地域の橋梁は，地震時の大きな圧縮荷重による過大な圧縮ひずみの作用で破壊靭性値が低下 [7.1)] している可能性もある．また，第 4 章で示した 1960 年代前半の衝撃特性が劣る SS41 材のような低強度鋼はひずみ速度や予ひずみの影響が大きい [7.2)] といわれており，これらの材料特性を把握することで，真の維持補修が可能になるものと考えられる．今後，供用後 50 年を超える橋梁が急増し，維持補修の先進国

となるためにも，経年鋼材の材料特性に着目したデータ蓄積が必要と考える．このためには，多くの既設橋梁から供試体を採取して，データベースとして補修履歴と合わせて一元管理することが望まれる．

(2) 厚鋼板の適用性評価の精度向上

鋼橋の製作段階では，主桁フランジの溶接継手を行う場合，規定の入熱量を超える溶接を行う場合や実績の少ない溶接法を採用する場合に対してのみ，溶接施工試験が義務付けられている[7.3)]．この場合，溶接部の靭性として，シャルピー衝撃試験による吸収エネルギーが母材の規格値（570MPa 級鋼の場合，$vE_{(-5℃)}$≧47J）以上を要求している．すなわち，実績が多い標準的な溶接方法の場合，溶接施工試験は行われていない現状にある．これは，合理化橋梁においても同様で，現場溶接継手の品質管理も施工業者の社内標準により行われている．

第 5 章で示したように，極厚板を低温下で用いる場合，母材自体の遷移温度も高温側に推移し，溶接継手部においては，著しい脆化を示す傾向が見られた．このことからも，北海道のような寒冷な地域においては，標準的な溶接方法を用いる場合でも，溶接施工試験を実施し，施工する溶接条件や低温溶材の適用性を検証することを規定することも必要である．さらに，母材および溶接部の衝撃試験結果は，第 5 章で提案した手法により溶接条件や架橋地域に適合するか検証が必要である．また，これらの材料試験結果は，ミルシートと一緒に，初期値として道路管理者が一元管理することが望まれる．これにより，厚鋼板の適用性評価も精度向上が期待できる．

(3) シャルピー衝撃試験の試験片厚の相違による影響検討

第 3 章では，シャルピー衝撃試験でフルサイズ試験片（10mm）を採取できない場合のフルサイズ変換について実験結果を述べた．現在，ASTM では吸収エネルギーは試験片厚に比例すると見なし，吸収エネルギーに着目したフルサイズ変換が示されている．WES では遷移温度に着目し，サブサイズ，ハーフサイズ試験片の遷移温度にそれぞれ 10℃，20℃加算することでフルサイズ試験片の遷移温度と見なす手法が示されている．これらの変換方法には安全率が含まれるとされるが，本章ではばらつきが大きい結果となる試験結果もあった．経年橋梁は，薄い鋼板で構成される場合も多く，適正なフルサイズ変換の確立に向けた研究が必要と考える．

参考文献（第 7 章）

7.1) 豊貞雅宏，後藤浩二，渡辺泰成：兵庫県南部地震時の脆性破壊事故に関する一考察，土木学会論文集，No.647，pp.317-329，2000.

7.2) 岡下勝彦，大南亮一，道場康二，山本晃久，冨松 実，丹治康行，三木千壽：兵庫県南部地震における神戸港港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討，土木学会論文集，No.591，pp.243-261，1998.

7.3) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編，2012.

謝　辞

本博士論文は，筆者が北海道大学大学院工学院北方圏環境政策工学専攻博士後期課程において，これまでの研究を取りまとめたものです．本研究に関して終始ご指導ご鞭撻を頂きました本学北方圏環境政策工学部門構造デザイン工学研究室の林川俊郎教授に心より感謝致します．また，大変お忙しい中，本論文をご精読頂き有用なコメントを頂きました本学同部門ライフタイム工学研究室の横田弘教授，本学同部門構造デザイン工学研究室の松本高志准教授，ならびに本学機械宇宙工学部門材料機能工学研究室の中村孝教授に深謝致します．

研究の調査，実験にあたっては，大阪大学接合科学研究所（研究当時）の金裕哲教授，財団法人災害科学研究所の三田村浩博士に，終始あたたかくご指導ご鞭撻をいただき，ひとかたならぬお世話になりました．心より感謝いたします．三田村博士におかれましては，筆者に研究の厳しさや充実感，さらには実務に貢献する研究方針などご指導くださいました．心より感謝しております．

論文の構成，執筆に際しては，具体的に親身にご指導いただきました名古屋大学大学院工学研究科の廣畑幹人博士に感謝の意が絶えません．また，本論文をまとめる上で貴重なご教授を受け賜った，本学北方圏環境政策工学部門構造デザイン工学研究室の何興文博士，寒地土木研究所の表真也修士に深謝いたします．恩師の方々に，厚く感謝申し上げる次第です．

筆者は現在，パブリックコンサルタント株式会社の社員です．当社の一員でなければ本研究に携わることができませんでした．安田康昌社長，並びに工藤隆二技術部長には博士後期課程入学の機会を与えて頂き，厚くお礼を申し上げます．また，献身的にサポート頂いた草薙洋志部門長，外山正人君にお礼を申し上げます．

最後に，筆者を支えてくれた家族に感謝する次第です．