

# 鋼橋に用いられた古い鋼材の 材料特性に及ぼす予ひずみの影響

北 健志\*      池田 学\*  
木村 元哉\*\*   中山 太士\*\*

## Influence of Prestrain on Material Characteristics of An Aged Steel Material Used for Bridges

Kenji KITA      Manabu IKEDA  
Motoya KIMURA   Taishi NAKAYAMA

The material characteristics of the steels are different according to the manufacturing period. In the maintenance of many aged steel bridges, it is important to understand the material characteristic of the aged steels. In this study, the material tests were executed for steel material of the various manufacturing period to investigate the material characteristic. In addition, the influence of a given prestrain on the strength and the impact toughness of the steels were clarified. As a result, it proposed the amount of the limit strain which should be considered in evaluating the impact toughness of the steels that received a local transformation by collision accidents etc.

キーワード：古い鋼材，材料特性，引張強度，シャルピー吸収エネルギー，予ひずみ，限界ひずみ

### 1. はじめに

鉄道橋の歴史は、明治5年新橋～横浜間の開通と同時に始まり、明治7年に東海道線大阪～神戸間の武庫川橋りょうに錬鉄製のトラス橋が架設された。これが、我が国の鉄道における鉄の橋の始まりである。現在では、JRのみで約5万連の鋼・合成鉄道橋が供用されており、架設年代の古いものが多く、60年以上経過した橋りょうが半数以上を占めると推定される<sup>1)</sup>。

鋼材は製造された年代により材料特性が異なるため、既設の鋼・合成鉄道橋を適切に維持管理していくには、これらに用いられている鋼材の材料特性を把握しておくことが重要である。鋼鉄道橋に見られる変状には疲労や腐食が多く、それ以外にも自動車等が架道橋に衝突し、桁が局部的に変形する事故が少なからず発生している。このような場合、変形部に大きなひずみが発生していると鋼材が脆くなり、き裂や切り欠き（ノッチ）等を起点に脆性破壊を起こす可能性がある。そのため、製造年代別の鋼材の材料特性を把握した上で、脆性破壊の防止の観点から粘り強さの評価を行うことが必要となる。しかし、古い鋼材の材料特性については、具体的な数値が示された資料は少なく、とくに塑性ひずみを受けた場合の材料特性は明らかになっていないのが現状である。

そこで、本研究では、古い鋼材の材料特性を化学分析や機械試験により調査し、さらに鋼材の材料特性に及ぼ

す予ひずみの影響について明らかにした。そして、それらの結果から、維持管理において参考となる限界ひずみ量の提案を行った。

### 2. 製造年代別の鋼材とその特徴

製造された鋼材の年代で橋りょうを分類すると1850～1880年は錬鉄橋、1880～1895年は錬鉄と鋼の併用橋、そして1895年以降が鋼橋となる<sup>2)</sup>。

錬鉄は、炭素Cの含有量が0.10%以下と少なく硫黄Sや磷P等の不純物が多く含まれる。そのため、木材のように繊維質で均質性が低く、鋼に比べ脆い性質がある。

鋼は、その製造年代により、初期のベッセマー鋼や1925年のわが国最初の鋼材規格であるJES（Japanese Engineering Standard, JISの前身）制定以降の高炭素・低マンガン鋼、そして1952年のJIS制定以降の鋼に区分することができる。1952年以降の鋼は不純物が大幅に低減され、さらに1970年代以降には、連続製造設備の導入や脱ガス装置導入など製鋼設備の技術革新により、現在の鋼材とほぼ同材質の鋼が製造されている。

なお、本論文では、錬鉄やベッセマー鋼も含めて、“鋼材”と記すこととする。

### 3. 調査に用いた鋼材と材料試験の概要

#### 3.1 材料特性の調査に用いた鋼材

材料特性の調査は、表1に示す製作時期の鋼材を対象

\* 構造物技術研究部（鋼複合構造）

\*\* JR西日本（土木技術センター）

特集：構造物技術

表1 試験に用いた橋りょうの概要と材料試験の一覧

製作時期	1886頃	1889	1897	1898頃	1902	1907	1907	1907	1907	1908	1912	1913	1914	1917	1919	1927頃	1928頃	1929	1930	1931頃	1964	1980頃	2004	2006
構造形式	DG	TT	DG	DG	DG	TT	DG	AB	TT	DG	DG	AB	DG	DG	DT	-	DG	DG	DG	-	TG	鋼板	鋼板	鋼板
板厚 (mm)	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	11	-	10	-	-	-	-	16	15	-	11	15	12	32
試験内容	引張試験 JIS Z 2241	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	衝撃試験 JIS Z 2242	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) 塗色箇所の鋼材は今回新たに入手した鋼材で、ひずみを付与した試験を実施している。それ以外の箇所は文献3)～8)の鋼材を表す。  
 ・製作時期は橋りょうが製作された時期であり、明らかでないものは“頃”を付けて記している。  
 ・板厚は、材料試験に用いた鋼板の厚さであり、不明なものは“-”と記している。  
 ・1931年頃の橋りょうは、道路橋に用いられていたものである。  
 ・構造形式の記号は、DG：上路プレートガーダー、TG：下路プレートガーダー、DT：上路トラス、TT：下路トラス、AB：アーチ

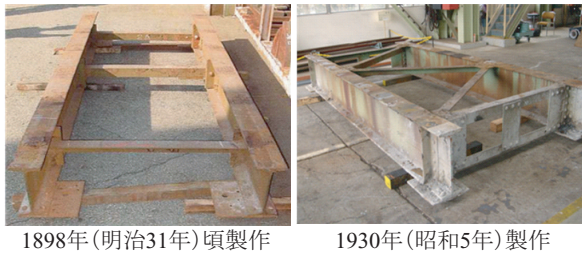


図1 材料試験に用いた橋りょうの例

としており、今回新たに入手した古い鋼材は、撤去する必要が生じた橋りょうから採取した(図1)。また、文献3)～7)に記載されている鋼材を追加している。また、1980年頃および最近の鋼材は、鋼板から入手したものである。本研究ではJISの400N/mm<sup>2</sup>級材で、主にJIS G 3106(溶接構造用圧延鋼材)のA種に相当する鋼材を対象とした。表1には、本研究で対象とした鋼材が用いられた橋りょうの製作時期や構造形式そして材料試験の一覧を示す。なお、橋りょうの製作年と鋼材の製造年は必ずしも一致していないと考えられるが、本論文では、一致しているものとし、以降の図には製造年代と示した。

今回新たに入手した鋼材(表1の塗色箇所の鋼材)については、化学成分や一般的な機械的性質(強度特性、衝撃値)の調査に加えて、鋼材にひずみを付与した場合の機械的性質への影響を把握するため、予ひずみによる鋼材の機械的性質への影響についても調査を行った。

3.2 化学成分

鋼材の溶鋼分析方法(JIS G 0320)に基づき、製造年代別の鋼材の化学成分を調査した。鋼材の機械的性質に大きな影響を及ぼすと考えられる主要な5元素のうち、図2に炭素C、硫黄Sおよび磷Pの各含有量と製造年代の関係を示す。図2より以下のことがわかる。

- ・1900年以前の鋼材は、炭素Cが0.005%以下と少なく、硫黄Sや磷Pの不純物が多いものがある。これらの鋼材は製造年代から推定すると錬鉄であると考えられる。
- ・1900年～JIS制定以前(1919年頃まで)の鋼材は、炭素Cが多く、硫黄Sや磷PがJISの規格値(S, P ≤ 0.060%)を超えているものがある。不純物が多く含まれるため、脆いものと考えられる。

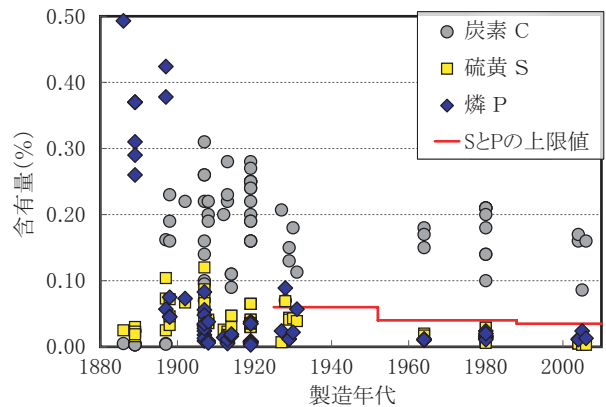


図2 主要元素の含有量の分布傾向

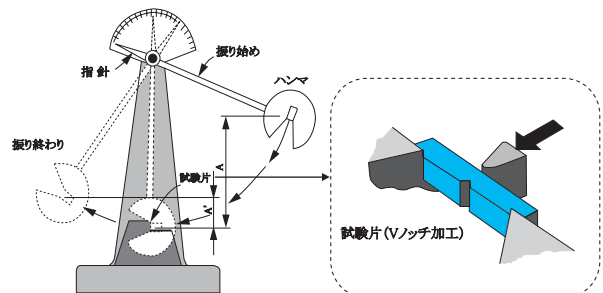


図3 シャルピー衝撃試験の概要<sup>8)</sup>

- ・JIS制定以降～JIS制定以前(1952年)までの鋼材の調査結果はないが当時のJISの規格値を満足し、硫黄Sや磷Pが低減しているものと思われる。
- ・JIS制定以降の1964年の鋼材等は、当時のJISの規格値を満足しており、硫黄Sや磷Pが少ない。

3.3 機械試験

鋼材の機械的性質として、降伏強度および引張強度、シャルピー吸収エネルギーを調査した。降伏強度および引張強度は金属材料引張試験方法(JIS Z 2241)に、シャルピー吸収エネルギーは金属材料衝撃試験方法(JIS Z 2242)に基づき試験を行った。

シャルピー吸収エネルギーは、鋼材の粘り強さを示す代表的な指標であり、シャルピー衝撃試験により求められる。シャルピー衝撃試験の概念を図3に示す。試験片は、長さ55mm、断面が10mm×10mm程度で、切欠き(Vノッチ)を設けている。

シャルピー吸収エネルギーは、ハンマーを振り下ろして試験片を破断する際のハンマーの振り下ろし前後（振り始めと振り終わり）の角度から求めることができ、シャルピー吸収エネルギーは、同条件での3体の試験片の結果の平均値として求める。また、温度による依存をみるために、試験温度は-20～100℃の間で異なる温度6ケースを設定して試験を行った。

### 3.4 予ひずみ量の設定とひずみの付与方法

鋼材にひずみを付与した場合の機械的性質への影響を把握するため、本研究では、付与するひずみ量を文献7)を基に3%,5%,7%の3ケースを設定し、降伏強度や引張強度およびシャルピー吸収エネルギーの変化を調査した。ここで、一様な引張ひずみ3%は概ね半径15t (t:板厚)の曲げ変形、同様に5%は半径10t, 7%は半径8tの曲げ変形にそれぞれ相当するものである。

ひずみの付与方法は、図4のとおり、供試体に貼り付けたひずみゲージや鋼板表面に付けた複数のマーカーの距離から計測されるひずみを確認しながら、供試体を一方方向に引張った。そして、所定のひずみを付与後に供試体から引張試験片やシャルピー衝撃試験片を採取した。

なお、本研究では、予ひずみは引張予ひずみを示している。また、予ひずみ量については、引張载荷直後にはひずみが若干戻る（スプリングバック）ため、载荷後に残留したひずみ量を表す。

## 4. 試験結果

### 4.1 引張試験

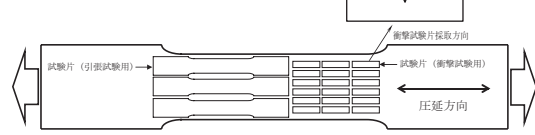
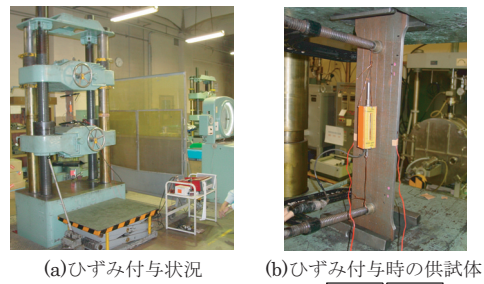
#### (1) 製造年代別の強度特性

表1に示す鋼材のうち主な製造年代の鋼材の降伏強度、引張強度を表2に、また、製造年代と強度特性の関係を図5に示す。表2、図5より以下のことがわかる。

- ・1900年以前の鋼材は引張強度や伸びの低いものが多く、この理由として、炭素Cが0.005%以下と少なく、不純物が多いことが考えられる。
- ・JES制定以前の鋼材は、強度のばらつきが大きく、現行の400N/mm<sup>2</sup>級材のJISの規格値（降伏強度235N/mm<sup>2</sup>、引張強度400N/mm<sup>2</sup>）以下のものがある。
- ・1964年以降の鋼材は、当然の結果ではあるが、400N/mm<sup>2</sup>級材のJISの規格値を満足している。

#### (2) 予ひずみ量と強度特性の関係

予ひずみ量と強度特性の関係について、ひずみを付与した試験片の引張試験結果を図6に示す。ここで、ひずみ0%の強度は、予ひずみなしの試験片の引張試験結果を示している。また、大きい塑性ひずみを付与した鋼材は明瞭な降伏点を示さなくなるので、降伏強度は0.2%オフセットひずみ時の耐力を用いている。



(c)ひずみ付与に用いた供試体と各試験片の採取の例

図4 予ひずみの付与状況と供試体の概要

表2 強度特性の試験結果（主な製造年代）

製造年代 (年)	鋼材規格	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
1889*	錬鉄*	249～286	356～384	9.0～13.2
1907	400材級*	254～287	373～464	22.3～30.7
1919	400材級*	250～297	430～483	25.7～40.3
1930	400材級*	228～235	399～403	51.3～52.0
1964	SM400A	260～273	425～433	54.0～55.2
2004	SM400A	285～294	442～446	49.0～50.3

\*は、鋼種が明らかでないため推定

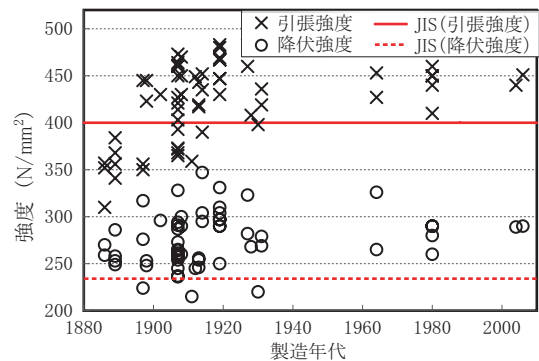


図5 製造年代と強度特性の関係

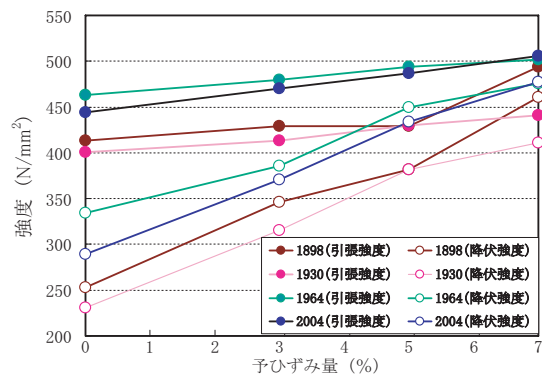


図6 予ひずみ量と強度特性の関係

図6より、製造年代に関わらず、全ての鋼材において、予ひずみにより降伏強度と引張強度が増加している。これは、鋼材に塑性ひずみを付与した場合に、結晶のすべりによって硬さが増す、ひずみ硬化の現象である。また、予ひずみ量と強度には、ほぼ線形の正の相関が見られる。

特集：構造物技術

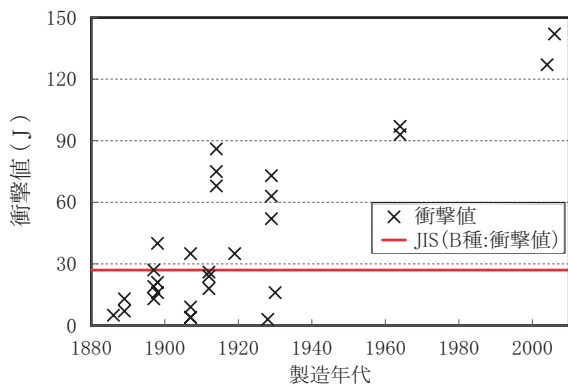


図7 製造年代別の衝撃値

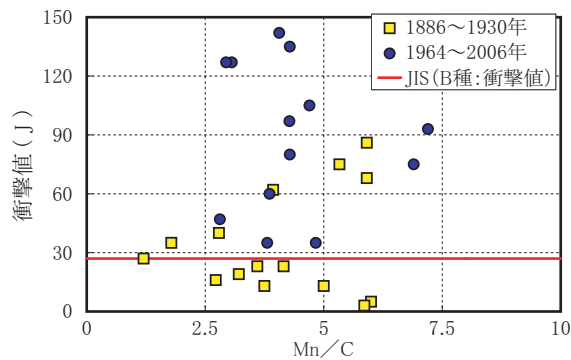
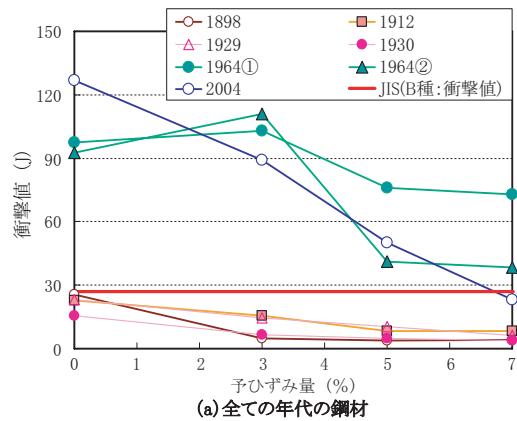
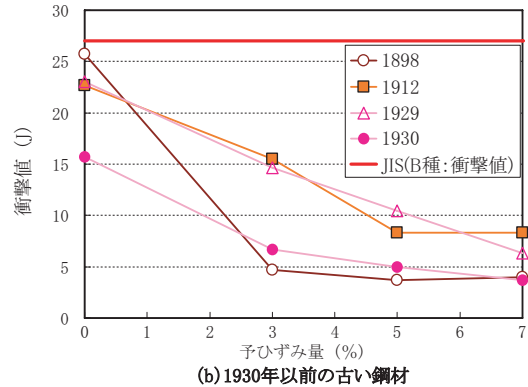


図8 Mn/Cと衝撃値の関係



(a)全ての年代の鋼材



(b)1930年以前の古い鋼材

図9 予ひずみ量と衝撃値の関係

4.2 衝撃試験

(1) 製造年代別の衝撃試験結果

製造年代別の衝撃試験結果を図7に示す。図7は試験温度0°Cのシャルピー吸収エネルギー（以下、衝撃値）をプロットしており、試験片3体の平均値を示している。いずれも予ひずみなしの衝撃値である。また、衝撃値は、その値が大きいほど粘り強さが大きいと評価できる。

図7より、JES 制定以前の鋼材は、全体的に衝撃値が低く、現行の JIS G 3106 の B 種の規格値 (27J) 以下のものが多い。この理由として、前述の通り、1925年以前の鋼材には、硫黄 S や 燐 P の不純物が多いことが考えられる。また、最近の鋼材の衝撃値は 100J を超えているため<sup>9~11)</sup>、古い鋼材は最近の鋼材よりもかなり脆い材料であることがわかる。

(2) 化学成分 (Mn/C) と衝撃値の関係

1952年のJIS制定時に、高純化や溶接性の向上を目的として、硫黄 S や 燐 P の低減や、マンガン Mn と炭素 C の比 (Mn/C) を 2.5 以上とする規定が新たに定められている。Mn/C と 衝撃値 の 関係 を 図 8 に 示 す。こ こ で は、1886 年 から 1930 年 までの 鋼 材 と 1964 年 以 降 の 鋼 材 と に 分 けてプロットしている。図8より、一般に Mn/C が大きいほど衝撃値が大きい傾向を示すが、1930年以前の鋼材は、Mn/C ≥ 2.5 でも衝撃値が低いものがある。一方、1964年以降の鋼材は Mn/C ≥ 2.5 であり、同じ Mn/C でも古い鋼材よりも衝撃値は全般的に大きい。

4.3 予ひずみによる粘り強さへの影響

(1) 予ひずみ量と衝撃値の関係

製造年代別の鋼材の予ひずみ量と衝撃値の関係を図9(a)に示す。古い鋼材の衝撃値は、1964年以降の鋼材と比較して小さいため、図9(b)には1930年以前の鋼材を対象に示す。なお、1964年の鋼材においては、腹板とフランジから試験片を採取しており、前者を1964①、後者を1964②と示している。図9より以下のことがわかる。

- ・古い鋼材および最近の鋼材ともに、予ひずみ量の増加に伴って、衝撃値が低下している。
- ・1930年以前の古い鋼材は、予ひずみなしの状態でも衝撃値が小さく、予ひずみ量3%では予ひずみなしの1/2程度となり、予ひずみ量5%ではほぼ全ての鋼材が10J以下となっている。
- ・1964年以降の鋼材は予ひずみ量5%までは、JISのB種の鋼材の規格値(27J)を満足している。

(2) 衝撃値と試験温度および予ひずみ量の関係

シャルピー衝撃試験後の試験片の破面の例を図10に示す。これは、1930年の衝撃試験片で予ひずみなしにおける試験温度60°Cと20°Cのものと、試験温度20°Cにおける予ひずみ量3%、7%の場合を示している。また、試験温度と衝撃値の関係を図11に示す。

図10の試験片の破面より、試験温度が高くなるほど延性破面の割合が多くなり、粘り強さを有することが確認できる。

また、同じ試験温度でも、予ひずみ量が大きくなるほ

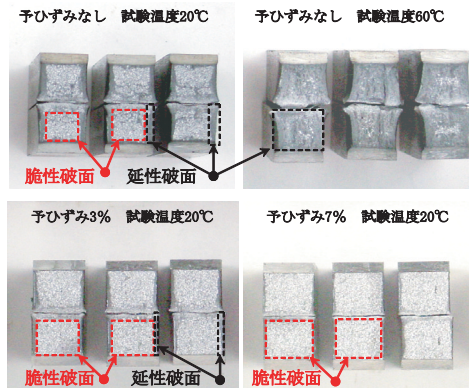


図10 衝撃試験片の破面

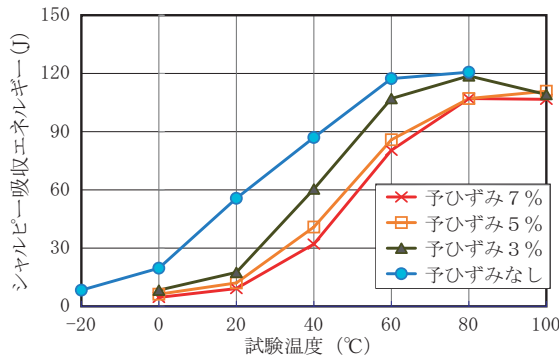


図11 試験温度と衝撃値の関係

ど延性破面の割合が少なくなり、粘り強さが低下する傾向が破面から確認できる。

図11より、試験温度とシャルピー吸収エネルギーとの関係に正の相関が確認できる。このように、鋼材は試験温度が低いほど衝撃値が低下するため、気温が著しく低い地域では、鋼材の脆性破壊に対する配慮が重要となる。

(3) 予ひずみ量と破面遷移温度の関係

予ひずみ量と破面遷移温度の関係を図12に示す。破面遷移温度は、衝撃試験片の破面において延性破面の割合(延性破面率)が50%に相当するときの試験温度であり、遷移温度が低いほど粘り強さがあると評価できる。

図12より、予ひずみ量の増加に伴って、破面遷移温度が高くなっていることがわかる。また、製造年代に着目すると、製造年代の古い鋼材の方が破面遷移温度が高いことがわかる。1930年以前の鋼材の破面遷移温度は30℃以上あり、これは、常温で脆性破面が50%であるため、現行の鋼材と比べて脆性的な破壊を起こす可能性が高いことを示している。

(4) ひずみ時効脆化による粘り強さへの影響

予ひずみ量による粘り強さへの影響を評価する上で、ひずみ時効脆化についても考慮する必要がある。

ひずみ時効脆化とは、鋼材に塑性ひずみを与えた状態のままでは時間の経過とともに硬化が進行し、これに伴って粘り強さが低下することである。そこで、ひずみを与えた後にひずみ時効処理を行い、鋼材の機械的性質

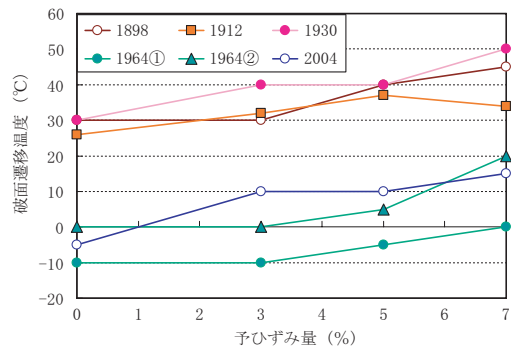


図12 予ひずみ量と破面遷移温度

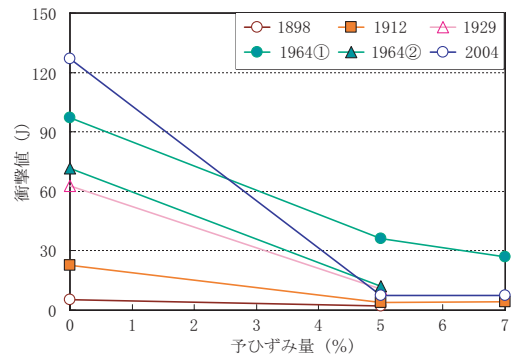


図13 ひずみ時効処理後の衝撃値

の変化を調べることにした。今回、ひずみ時効処理は、250℃で1時間保持して、その後空冷した。これはほぼ1年間自然放置した状態に相当するものである<sup>7)</sup>。

予ひずみ量とひずみ時効処理後の衝撃値の関係を図13に示す。予ひずみ5%で予ひずみなしの吸収エネルギーの40%以下に靱性が低下しており、図7のひずみ時効処理なしの結果と比較すると、ひずみ時効処理による衝撃値の低下が大きいことがわかる。

これは、塑性ひずみが生じている状態のまま放置しておく、時間の経過に伴い、粘り強さが低下して脆性破壊の可能性が増すことを示している。よって、物体の衝突による局部変形などで、鋼材に大きい塑性ひずみが生じている箇所については、早急に変形を矯正する等の措置が必要であると考えられる。

5. 鋼材の限界ひずみに関する考察

鋼材は、局所的な変形を受け、塑性ひずみが生じると粘り強さが低下し、さらに、鋼材の靱性が低い場合には、き裂や切り欠き(ノッチ)等を起点に脆性破壊を起こす可能性がある。そのため、脆性破壊の防止の観点から粘り強さの評価を行うことが必要となる。そこで、上記の試験結果から、脆性破壊を防止するためには、鋼材にはどの程度のひずみまで許容できるかについて考察する。

まず、シャルピー衝撃試験の結果から鋼材を製造年代により大きく2つに分類する。図7～12の衝撃試験結果

## 特集：構造物技術

より、鋼材の衝撃値は、1952年のJIS制定前の鋼材とそれ以降の鋼材とで明らかに異なっている。そのため、概ねこの年代を境に区分して考える。

鉄道橋の標準設計においてリベットを用いたのは1957年が最後であると言われていることから、この鋼材の年代の区分は、「リベット桁に用いられている古い鋼材」と、「溶接桁に用いられている最近の鋼材」に区分して考えることができる。また、ここでは変形が生じた直後に脆性破壊を防止するための評価に用いるものとし、早急に変形を矯正することを前提に考えていることから、鋼材のひずみの限界値の設定においては、図7～12の結果を基に考察することとし、図13に示すひずみ時効脆化の影響は考慮しないこととした。

## (1) リベット桁に用いられている古い鋼材の限界ひずみ

古い鋼材は、予ひずみなしの状態でも衝撃値が非常に低く、現行のJIS G 3106のB種の規格値(27J)を満足できないため、これを基準にすることができない。

文献7)では、予ひずみなしの状態の1/2以上の衝撃値を確保することが記載されており、これを参考に、古い鋼材の限界ひずみとして、予ひずみなしの状態の1/2以上の衝撃値を確保することを基準とし、かつ破面遷移温度の傾向も考慮して定めることとする。図9(b)より、予ひずみ3%では、予ひずみなしの状態の概ね1/2以上の衝撃値を有している。また、図12より、1898年材などの破面遷移温度は、予ひずみ3%まではほとんど変化していない。このことから、このような古い鋼材の限界ひずみは3%と設定することが可能と考えられる。

## (2) 溶接桁に用いられる最近の鋼材の限界ひずみ

図9(a)より、最近の鋼材は、予ひずみ5%までは現行のJIS G 3106のB種の規格値(27J)を確保しており、さらに、文献7)に示される予ひずみなしの状態の1/2以上の衝撃値を確保している。そのため、限界ひずみとして5%と設定することが可能と考えられる。

なお、今回、溶接桁の限界ひずみの設定において、リベット桁よりも基準となる衝撃値を大きくしたのは、フランジが一般に1枚板で構成されること、フランジとウェブの溶接により多少硬化している可能性があることを考慮したものである。

## 6. まとめ

本研究では、文献調査に加えて、今回新たに古い鋼材から最近の鋼材までを入手し、各種材料試験を実施した。また、製造年代別の材料特性やひずみを付与した場合の強度特性や衝撃値への影響について明らかにし、塑性ひずみが生じた鋼材の評価を行う上で維持管理の実務に参考となる限界ひずみ量を提案した。得られた知見を以下に記す。

- ・JIS制定以前の鋼材の強度特性は、現行の400N/mm<sup>2</sup>級材のJISの規格値を満足しないものがある。
- ・リベット桁に用いられている古い鋼材の衝撃値は低く、現行のJISの規格値(27J)を満足しない傾向にある。また、その衝撃値は、予ひずみ量の増加に伴い大きく低下するため脆性破壊防止の観点から限界ひずみ3%を設定した。
- ・溶接桁に用いられている鋼材は、概ね現行の鋼材と同等の強度特性を有するものと考えられる。また、その衝撃値は、予ひずみ量の増加に伴い低下するため、現行のJISの規格値(27J)を満足するように限界ひずみ5%を設定した。

## 謝辞

本研究は、JR西日本の維持管理委員会(委員長 大阪工業大松井教授)においてご助言やご意見を頂きながら実施したものである。本研究の材料試験の一部は災害科学技術研究所からの受託業務として実施した。また、古い鋼材については、各鉄道事業者から提供して頂いた。さらに、住金テクノロジーには鋼材の材料試験を実施して頂いた。ここに記すとともに謝意を表する次第です。

## 文献

- 1) 市川篤司: 鋼鉄道橋の補修・補強の概要, 橋梁と基礎, 1994
- 2) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(鋼・合成構造物), 丸善, 2008
- 3) 阿部允, 小芝明弘: 経年劣化した鋼鉄道橋の材料特性, 鉄道総研報告, Vol.5, No.12, pp.34-41, 1991
- 4) 土木学会: 歴史的鋼橋の補修・補強マニュアル 鋼構造シリーズ14, 2006
- 5) 伊藤孝, 岩崎富雄: 鉄道古桁の補修・補強時の継手試験, 宮地技報, No.5, pp.71-78, 1989
- 6) 金裕哲: 昭和初期架設された橋梁鋼材の溶接性および溶接継手の機械的特性評価, 土木学会第59回年講, pp.227-228, 2003
- 7) 堀川浩甫: 冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化, 土木学会論文報告集第300号, pp.13-20, 1980
- 8) 大田孝二, 深沢誠: 橋と鋼, 建設図書, 2000
- 9) 本間宏二, 三木千壽: 冷間曲げ加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究, 土木学会論文集, No. 570 / I-40, pp.153-162, 1970
- 10) 南邦明, 三木千壽: 橋梁で用いられる鋼材の機械的性質の現状, 鋼構造論文集, 第11巻第42号, pp.121-132, 2004
- 11) 南邦明, 三木千壽: 橋梁で使用される鋼材の機械的性質と化学成分の関係, 鋼構造論文集, 第13巻第50号, pp.95-104, 2006