

58キ口耐候性調質高張力鋼の冷間塑性ひずみ脆化

鬼頭省吾*

森下統一**

1. まえがき

鋼材を冷間塑性加工し塑性ひずみを与えると鋼材は硬化し、靱性が劣化したり、亀裂が発生することがある。塑性ひずみによる硬化は時間の経過とともに進行し、この現象はひずみ時効と言われる。堀川の研究¹⁾によれば

- ① 鋼材の規格、成分系、熱処理を問わず、ひずみ時効脆化の傾向は小さくない。
- ② ひずみ時効脆化の程度をシャルピー衝撃試験の破面遷移温度の上昇量で表すと、予ひずみ量3%のとき10~30°、10%のとき20~50°、20%のとき30~60°である。
- ③ SM41B、SM50B、およびSM50YB材に対しては、予ひずみ量3%が冷間塑性加工量の許容値についての1つの目安であり、SM58Q材では15%が目安である。

予ひずみ量3%は曲げ半径が板厚の15倍(15t)の場合の表面ひずみに相当し²⁾、鉄道橋、道路橋とも冷間曲げ加工の曲げ半径は15t以上とすること、と規定されている^{3),4)}

文献1)によれば、ひずみ時効脆化後のシャルピー吸収エネルギーは鋼種によってかなり異なる。したがって設計にあたっては適切な鋼種の選定が重要となる。日本の標準示方書類では、鋼種は寒冷地向けの鉄道橋で仕様を追加されるほかは板厚のみによって選定されている。西ドイツでは板厚の他に応力状態、圧縮引張の別、部材の重要性、および冷間加工予ひずみ量が鋼種選定に加味される⁵⁾。

設計の実務面からは曲げ半径を15t以下にせざるを得ない構造が生ずることがある。板厚が薄くて小さい部品の場合はガスバーナーで加熱して熱間曲げとする方法も可能であるが、厚い板とか幅の広い部品では均一に加熱す

ることが容易でなく熱間曲げ加工は採用し難い。熱間加工方法の他には、ひずみ時効脆化後もシャルピー吸収エネルギーが大きい鋼種を用いる方法が考えられる。SM58Qはこの性質を備えた鋼材と言えよう¹⁾。

こゝでは、耐候性裸使用鋼材であるSMA58WQでもSM58Qと同等の性質をもつかどうかを実験によって確認しようとしたものである。

2. 実験

(1) 予ひずみ量決定のための予備実験

この実験は実際に製作した橋梁の施工試験を兼ねて行ったので、実構造の曲げ加工による表面ひずみと等しい予ひずみを与えることとした。予備実験の目的は、板厚、曲げ半径を実構造と等しくして曲げ加工による表面ひずみ量がどの程度になるかを前もって把握しておくものである。

(a) 予備実験要領

- ① 供試材： \square 300×32×700 (SM58Q)
- ② 曲げ半径；R=188mm (5.9t)
R=300mm (9.4t) 各1体
- ③ 曲げ加工方法；図-1に示すように先端のR=50mmの押し治具を用いて、30mm間隔でプレス加工。押

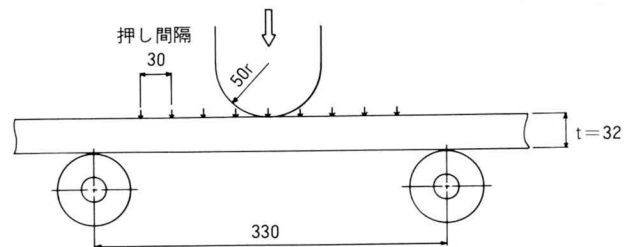


図-1 曲げ加工治具

* 千葉工場製造部生産技術課長

** 千葉工場製造部生産技術課長代理

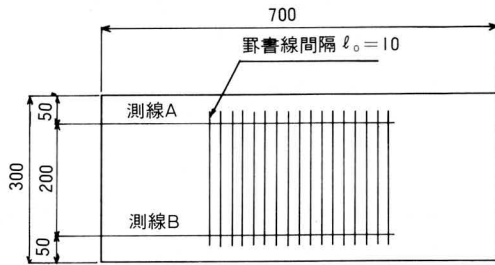


図-2 ひずみ測定方法

し曲げ量の管理は、1回押すごとにガバリ（R規定）を当てることによって行った。

- ④ ひずみ測定方法；平板時に10mm間隔の罫書線を入れておき、曲げ加工前後にその間隔を0.1mm単位で読み取れる目盛付きルーペで測定。曲げ加工後の罫書線は原寸用シナイに写し取った（図-2）。

(b) 曲げ加工による表面のひずみ

曲げ加工による表面ひずみの測定結果を図-3、4に示す。図-3の計算ひずみは次式によって求めた。

$$\epsilon_0 = \left(\frac{R+t}{R+\beta t} - 1 \right) = \frac{1-\beta}{R/t+\beta}$$

ここで、 $\beta=0.45$ とし、記号は図-5による。

R=188mm (5.9t) のひずみ平均値9.4%、最大ひずみ12.1%、R=300mm (9.4t) では平均6.0%、最大8.2%であった。平均ひずみは両方とも計算ひずみより大きく、それぞれ1.08倍、1.07倍である。平均ひずみ値から β を逆算するといずれも $\beta=0.41$ となる。

(c) 予ひずみ量

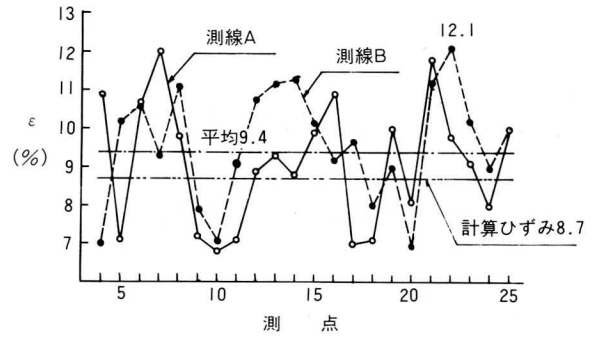
本実験における予ひずみは、予備実験で得られた最大ひずみをとることとし、12%、8%とした。この他に、基本値としての0%と中間値5%の予ひずみを導入して行った。

(2) 所定予ひずみの導入方法の検討

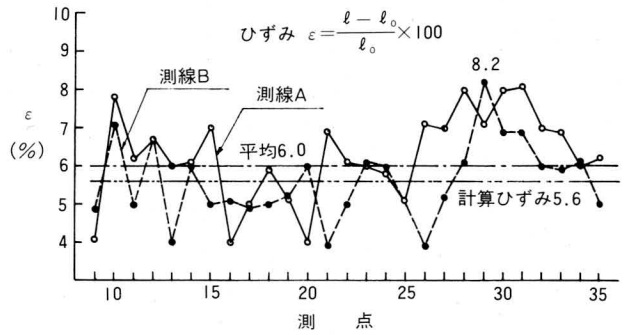
(a) 検討項目

① ひずみゲージの精度確認

予ひずみは引張試験機で与えることとしたが、塑性域であるため所定のひずみ量を載荷荷重で管理する



(a) R=188mm(5.9t)



(b) R=300mm(9.4t)

図-3 曲げ加工によるひずみ分布

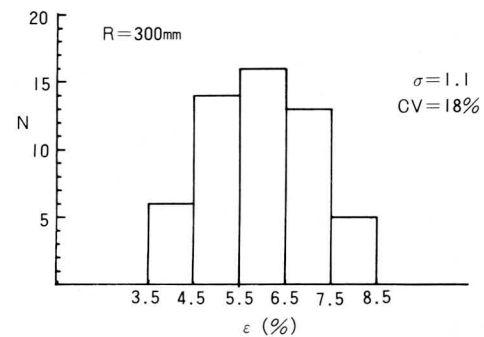
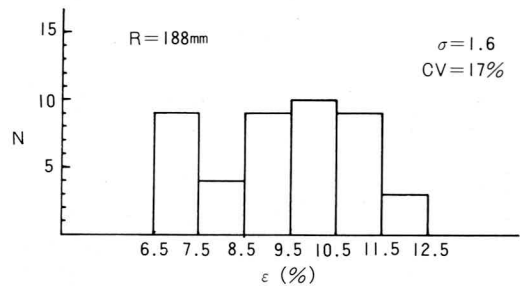


図-4 曲げ加工によるひずみの度数分布

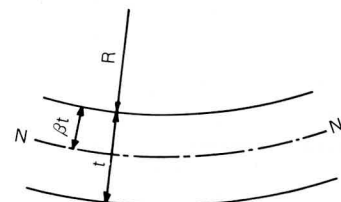


図-5 ひずみ計算式の記号

ことは難しい。そこで大ひずみ用ゲージを用いることとし、その精度がどうかを調査した。

② 残留ひずみ

载荷中のひずみと除荷後の残留ひずみとの関係。

③ ひずみの分布

シャルピー衝撃試験片採取位置を決めるためのひずみ分布。

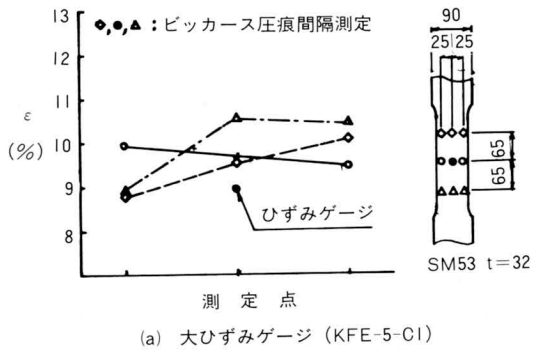
供試体の形状はいつでも本実験と同一（図-8）とした。

(b) ひずみゲージの精度

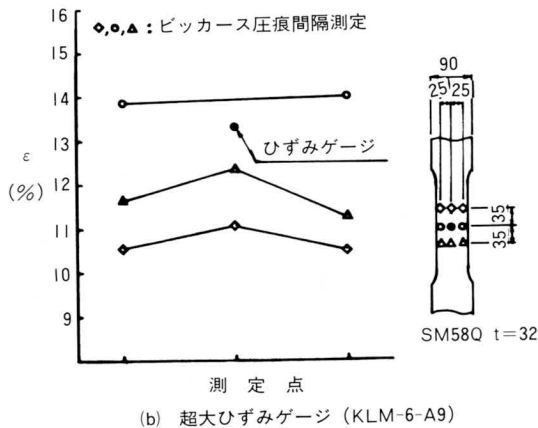
ひずみゲージは下記の2種類（共和電業製）を用いた。
 箔大ひずみゲージ；KFE-5-C1（GF=2.16）
 超大ひずみゲージ；KLM-6-A9（GF=1.86）
 ひずみ測定器；自動デジタルひずみ測定器

TDS-100（東京測器研究所）

ビッカース硬度計を用いて、間隔0.5mm 1測点4間隔の圧痕をつけ塑性ひずみ導入前後にこの間隔を測定（有効数字3けた）して求めたひずみと、ひずみゲージ測定値を図-6に示す。図-6の圧痕間隔によるひずみは1測点表裏各4点の平均値である。ひずみ測定値のバラツキは、試験片の幅方向よりも長手方向の位置によるもの



(a) 大ひずみゲージ (KFE-5-C1)



(b) 超大ひずみゲージ (KLM-6-A9)

図-6 ひずみゲージと圧痕間隔測定ひずみ比較

の方が大きい傾向にある。そこで、長手方向中央の測定値と比較することとすると、ひずみゲージの方が各々0.7%、0.6%程度小さい値を与える。

(c) ひずみ分布

試験片の長手方向中央における幅方向のひずみ分布を調査した。測定は前項(b)と同様にビッカース硬度計による圧痕間隔測定とひずみゲージを併用した。測定位置とひずみの分布状態を図-7に示す。ここでもひずみゲージ測定値の方が圧痕間隔から算出したひずみより1%程度小さい。ひずみの幅方向および板厚方向の分布はほぼ一様であるので、本実験でのシャルピー試験片の1組をひずみが与えられた試験片の長手方向中央から採取すれば、その1組のシャルピー試験片は等しい予ひずみが導入されているとみなされよう。

(d) 载荷時と除荷時のひずみの差

導入時のひずみ量をひずみゲージで管理するとして、引張試験機による载荷時のひずみと除荷後の残留ひずみの差を把握しておく必要がある。そこで、ひずみε=5%、8%および12%のときのそれぞれの载荷時と除荷時のひずみを測定した。試験片には形状、材質とも本実験と同一のもの（図-8）1体を用い、ε=5%、8%、12%の順に载荷、除荷を繰り返した。ひずみゲージは超大ひずみゲージ（KLM-6-A9）を用い、試験片中央の表裏に

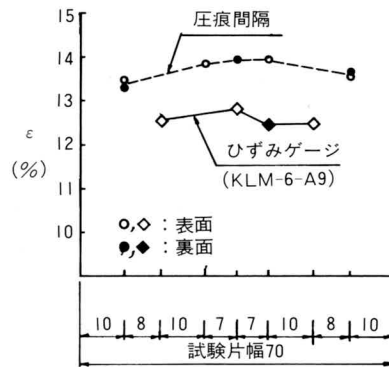


図-7 試験片中央におけるひずみの幅方向分布

表-1 载荷時と除荷時のひずみ(%)

目標	測定面	载荷時	除荷時	差	差の平均
5	表	5.8	5.5	0.3	0.3
	裏	5.8	5.5	0.3	
8	表	9.0	8.6	0.4	0.4
	裏	9.0	8.6	0.4	
12	表	13.2	12.8	0.4	0.4
	裏	13.2	12.8	0.4	

(ひずみゲージ KLM-6-A9)

貼付けた。測定結果を表-1に示す。載荷時と除荷時のひずみの差を0.4%、ひずみゲージが1%小さい値を示すと考えて、載荷時のひずみは目標の0.6%減で管理することとした。

(3) ひずみ時効脆化実験

(a) 実験条件

供試体の形状、ひずみ測定位置を図-8、供試材の化学成分と機械的性質を表-2に示す。試験体は予ひずみ $\epsilon=12\%$ 、8%および5%を各3本と $\epsilon=0$ 1本の合計10本とした。予ひずみを与えた試験体に文献1)と同様に電気炉内で250℃1時間の時効促進処理を施した後、図-9に示す位置から1体につき2組6本づつのシャルピー試験片を採取した。試験温度は1組を-5℃他の1組を-20℃とした。-5℃はJIS G3114に規定されているSMA58Wの試験温度である。

(b) 実験結果と考察

各試験体の予ひずみを表-3に示す。載荷時と除荷時のひずみ差は各予ひずみ量とも0.4%程度である。材料が履歴した塑性ひずみの範囲内で、応力とひずみが比例関係にあるとすると、塑性域におけるヤング率 $E_P = \sigma_B / \epsilon_P = 6700 / 0.004 = 1.7 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ であり、弾性域における

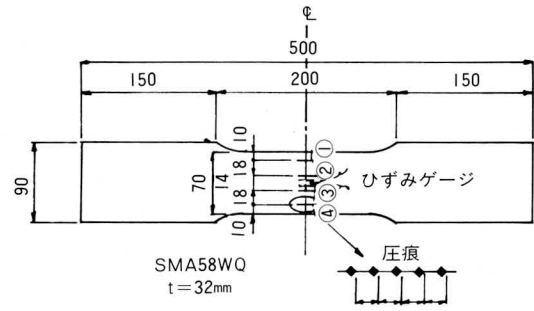


図-8 供試体形状とひずみ測定位置

表-2 供試材の化学成分、機械的性質(ミルシートより)

化学成分 (%)										
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ceq
0.11	0.35	0.84	0.016	0.006	0.31	0.13	0.51	0.03	0.04	0.40

機械的性質 降伏点 58kg/mm² 引張強さ 67kg/mm²
 衝撃値 29.5kg・m at -5℃

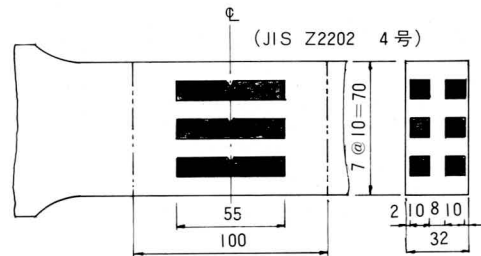


図-9 シャルピー試験片採取位置

表-3 導入予ひずみ量 ϵ (%)

目標ひずみ	TP記号	ひずみ測定面	ひずみゲージ測定値		ビッカース圧痕間隔測定によるひずみ					
			載荷時	除荷時	①	②	③	④	平均	
12	A1	表	12.2	11.6	平均 11.5	11.9	12.4	12.7	13.4	12.4
		裏	11.8	11.4		12.3	12.4	12.4	12.5	
	A2	表	12.0	11.6	11.5	11.8	12.7	12.5	12.3	12.3
		裏	11.8	11.4		12.2	12.3	12.5	12.1	
	A3	表	12.0	11.6	11.5	12.3	12.4	12.5	12.3	12.4
		裏	11.8	11.4		12.3	12.3	12.5	12.3	
8	B1	表	7.9	7.4	7.4	8.3	8.6	8.4	8.2	8.3
		裏	7.8	7.4		8.2	8.3	8.4	8.2	
	B2	表	7.6	7.2	7.3	8.0	8.2	8.1	8.0	8.2
		裏	7.7	7.3		8.2	8.3	8.4	8.0	
	B3	表	7.3	6.9	7.2	8.3	8.2	8.4	8.5	8.4
		裏	7.9	7.5		8.3	8.4	8.3	8.6	
5	C1	表	5.0	4.6	4.6	5.1	5.2	5.1	5.1	5.1
		裏	4.9	4.6		5.4	5.1	5.0	5.2	
	C2	表	5.0	4.6	4.6	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2
		裏	5.0	4.6		5.2	5.2	5.2	5.2	
	C3	表	5.0	4.6	4.6	5.1	5.2	5.3	5.2	5.2
		裏	5.0	4.6		5.2	5.3	5.0	5.2	

使用ひずみゲージ $\epsilon=12\%$; KLM-6-A9、 $\epsilon=8\%$ 、5%; KFE-5-C1

ヤング率Eの80%の値となる。

予ひずみ量とシャルピー吸収エネルギーの関係を図-10、予ひずみ量とシャルピー吸収エネルギーの低下率を図-11、試験温度との関係を図-12に示す。予ひずみ量 $\epsilon=5\%$ では -5°C 、 -20°C とも $\epsilon=0$ のときと等しい吸収エネルギーを有しており、かつばらつきもない。 ϵ が5%を超えると低下し始め、ばらつきも大きくなる。予ひずみ量によるシャルピー吸収エネルギーの低下率は温度

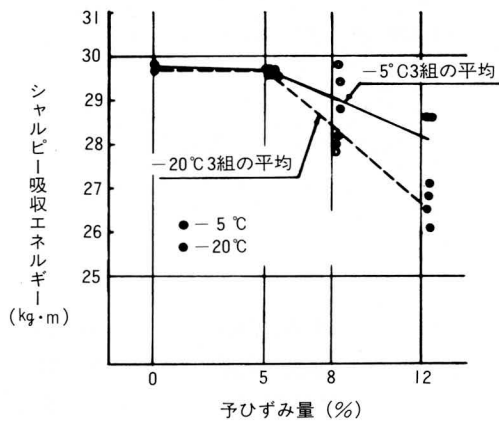


図-10 予ひずみ量とシャルピー吸収エネルギー

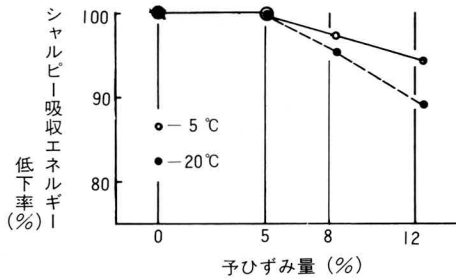


図-11 予ひずみ量とシャルピー吸収エネルギーの低下率

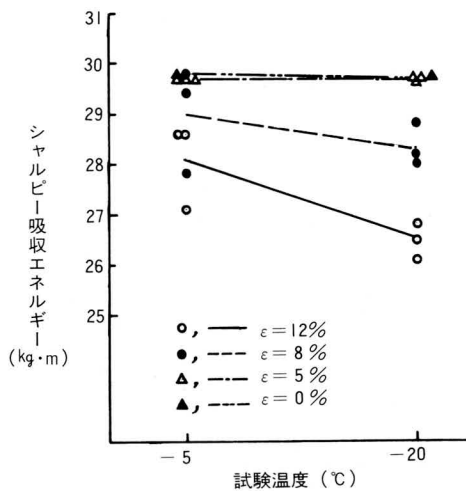


図-12 温度とシャルピー吸収エネルギー

が低いほど著しい。また、試験温度による低下は予ひずみ量が多いほど著しい傾向にある。しかし吸収エネルギーの低下が最も大きい -20°C $\epsilon=12\%$ の場合でも、 $\epsilon=0$ のときの89% $26.5\text{kg}\cdot\text{m}$ であり、JISの規定値 $4.8\text{kg}\cdot\text{m}$ よりもかなり大きい。これには元の素材が規定値よりもずっと大きく製造されていることが有効に働いているためと言えよう。

3. まとめ

曲げ半径が板厚の15倍よりも小さい冷間曲げ加工をする場合、ひずみ時効脆化の面から考えてSMA58WQ材を用いることが妥当かどうかを知る目的で実験を行った。この実験から下記のようなことが得られた。

- 1) プレスによる押し曲げ加工では、押し金具の半径、受け金具の支間、押し間隔によって程度に差があると考えられるが、円周方向のひずみ分布のばらつきは小さくない。
- 2) SMA58WQ材のひずみ脆化は、予ひずみ量が5%までは現れないと考えられるが、5%以上になると予ひずみ量が多い程、温度が低い程大きくなる傾向にある。
- 3) 予ひずみ量が12%（円周方向のひずみ分布が均一であれば $R=4.1t$ に相当）でも、シャルピー吸収エネルギーはJISの規格値をかなり上廻るようである。ただし、これは元の素材が高い値を有していたためであろう。SMA58WQのシャルピー吸収エネルギーは一般的には $30\text{kg}\cdot\text{m}$ 程度を有しているの、前もってこれを確認しておくことを前提に、SMA58WQ材に12%程度の塑性ひずみ加工を行うことは可能であると考えられる。
- 4) 溶接継手特に大入熱で施工されるサブマージアーク溶接継手のシャルピー吸収エネルギーは母材に比べてかなり小さいのが通例である。したがって、溶接継手部に塑性ひずみ加工を行う場合は別の検討が必要である。

今回の実験はSMA58WQについてのみ行った。その他の耐候性鋼材についても別の機会をみて行いたい。

＜参考文献＞

- 1) 堀川；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、1980年8月
- 2) 構造物設計事務所（鋼構造）；JRS（鋼鉄道橋）改訂の要点、構造物設計資料No.69、1982年3月
- 3) 構造物設計事務所；JRS 05000-1H-13AR5F、昭和60年1月31日改正
- 4) 日本道路協会；道路橋示方書・同解説、昭和55年2月
- 5) 土木学会鋼構造委員会鋼構造進歩調査小委員会；各国の橋梁示方書における鋼材の使い分け、土木学会誌、1975年9月号

グラビア写真説明

大島大橋

本橋は、本州四国連絡橋 尾道～今治ルート（Eルート）に属しており、瀬戸内海のほぼ中央に位置する伯方島（見近島）と大島の間にある宮窪瀬戸を跨いでいる。橋梁形式は単径間補剛吊橋であり、中央径間560mの補剛桁に逆台形箱桁を用いている。この規模の補剛桁に箱桁を採用したのは我が国で最初のものである。この構造は全体的にスレンダーであるため、特に耐風安定性について十分な検討が施された。結果的に安全性があり、経済的な吊橋となった。本橋は昭和62年10月開通が予定され、目下上部工の施工が行われている。開通時点では車道2車線、自転車歩道1車線の暫定形状となっており、将来の最終完成時には、車道4車線、自転車歩道2車線の計6車線が計画されている。

（小塚）

高清水橋

高清水橋は新潟県柏崎市を起点とし、福島県会津若松市に至る国道252号線の改良工事（宮下バイパス工事）の一環として福島県大沼郡三島町宮下に架けられた。

全体事業費18億6千万円の本橋は、中央部主径間が中路式ローゼ桁で橋長320m幅員10.5m車道2車線、片側に歩道という構造で、同型橋では東北一であり、全国的にも有数の規模を誇るものである。シルバー塗装の優美な姿が、雄大な只見川の景観と調和し、山並みの紅葉と見事なコントラストを描き、一大人工美を呈している。

この地区の住民待望の新橋完成によって、曲りくねった現道の改良が一気に進み、冬期間の交通もスムーズになり、同時に全国的にも有名な桐の町、ふるさと運動の町として、観光地としての魅力がさらに高まるものと期待されている。（窪田）

水穂大橋

札幌市の中心部を流れる豊平川の35番目の橋梁として、架橋地点の河川条件及び前後の取付道路による桁高制限等の関係で、北海道では初めての鋼床版ニールセン橋です。又、街の中心部に位置するアーチ系橋梁の為、都市景観を考慮し、カラーシュミレーションを使い、市民の順位付けで、水色の塗色とし、地元町内会の親しみを込めて、本橋を結ぶ両町内会の1文字ずつを取り、水穂大橋と命名されました。（川村）