

V-15

北海道で最初に異形鉄筋を使用した コンクリート橋の物性値

北海道開発局 開発土木研究所 正 員 中 野 修

同 同 山内 敏夫

同 同 西 弘明

北 海 道 大 学 同 角田 史雄

1. はじめに

布部大橋は、北海道の中央部に位置する富良野市地内を流れる空知川に架設されている、橋長250mのコンクリート橋であり、1956年（昭和31年）に着工し1958年（昭和33年）に完成している。橋の断面諸元等は、図-1 および2 に示してあるように、有効幅員7.00m（建設当時）、2室箱桁鉄筋コンクリートゲルバー桁と単純桁で支間は27.8～36mである。

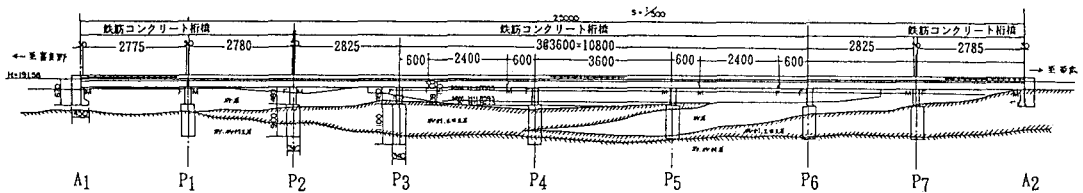


図-1 一般図

本橋の最大の特徴としては、高強度異形鉄筋（SSD49）を北海道で最初に採用したこと。また、設計面ではせん断力を全てスターラップで受け持たせる考えを取り入れたことである。

建設当時の報文⁽¹⁾によると、「コンクリートの強度は大凡 $\sigma_c=150\sim 200\text{kgf/cm}^2$ で支保工撤去は打設後10～15日で行ったが、死荷重による撓みは計算値の約1/2であり、桁下面、及び側面に亀裂の発生がみられた」と報告されている。

現在本橋は34年経過しているが、1961年以降、数次に渡りクラックやたわみの調査、またコンクリートの物性値の測定、実車による載荷試験で耐荷力調査を行ってきた^{(2) (3) (4) (5)}。

1991年以前の調査では、耐荷力の判定に曲げモーメントを主体的に解析していたが、1991年より本橋のクラックの状況などより、抵抗曲げモーメントの確認に加えて、スターラップ筋のせん断力による疲労強度の確認も重要な要素であるという観点⁽⁶⁾より以下の物性値を調査した。

①コンクリートの物性値、②鉄筋の化学成分、③鉄筋の機械的性質、④鉄筋の疲労強度試験

2. コンクリートの物性値

参考文献1によると、コンクリート打設時（1958年）の配合条件は下記の通り。

Material Properties of the Nunobe Ohashi: the First Bridge Used Deformed Bars in Hokkaido
by Osamu NAKANO, Toshio YAMAUCHI, Hiroaki NISHI and Yoshio KAKUTA

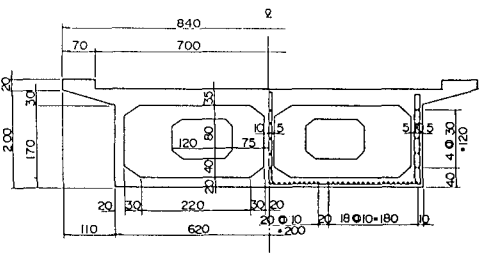


図-2 断面図（支間中央部）

セメント量：370kg/m³、細骨材：比重2.72、粗粒率3.35、粗骨材：比重2.76、粗粒率7.65、G/S=1.78、W/C=45～50%、スランプ5～10cm、また、コンクリートの許容応力度に関しては、許容圧縮応力度が65kgf/cm²、許容せん断応力度が6.5kgf/cm²（コンクリートのみ）となっていて、打設されたコンクリート強度としては7日強度が150～200kgf/cm²であったと記されている。

その後耐力判定のため、1966年、1991年（P7～A2）、1992年（P7～A2）の各年に鉄筋間隔が粗で、構造的には比較的支障のない箱桁内の隔壁部よりコアを採取し、表－1に実施した項目と結果を示した。

試験環境として、文献－7によると、コンクリートの乾燥と力学的性状は、「長期的には乾燥が平衡状態になったときの試験結果を重視し、構造計算に反映させる必要がある」と記述されているので、過去2年間の試験は乾燥状態でを行い、その結果を耐力判定の構造計算に使用することにした。ただし、1966年（昭和41年）に行った試験環境については不明である。コアの本数は、1966年が6本（φ10cm）、1991年が4本、1992年が3本（φ15cm）である。

（1）圧縮強度

表－1 コンクリート物性値

コア抜き取りによる
コンクリートの供試体
は、JIS A 1107-1978
（1989年確認）により
供試体を整形しコア両
端面をJIS A 1132に則

試験年度	採取コア φ（直径）	圧縮試験 kgf/cm ²	シュミットハンマ ー 強度の推定	静弾性係数 E_c ×10 ⁴ kgf/cm ²	ポアソン比 ν	中性化の 深さ cm	コア の本数
1966年	10 cm	246	—	2.13	—	—	6
1991年	15 cm	217	212	1.47	0.193	—	4
1992年	15 cm	252	—	1.48	0.151	2.00	3

り平滑に仕上げてある。圧縮試験については、一般的なコンクリートの圧縮強度試験方法JIS A 1108-1976（1986年確認）で行い、結果は217～252kgf/cm²であった。また、1991年に実施した箱桁腹部のシュミットハンマーによる強度試験は、JSCE-1990硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法（案）で行い、結果は212kgf/cm²であった。これについては、参考文献1によると、建設時のコンクリートの打設は当時としては性能の良い設備を使用し施工されたとなっているが、現在の様な工場で管理されているレーダーミクストコンクリートの精度を保持することは難しく、品質管理の変動が大きくなると想定され、その結果が20%程度となったものと思われる。

（2）静弾性係数

乾燥状態の供試体にKC-70-120-A1-11（共和電業製）のひずみゲージを貼り、JSCE-1988コンクリートの静弾性係数試験方法で試験を行った。

この結果は1.47～2.13×10⁴kgf/cm²で、文献8および9等のデータと比較すると、小さい値となっている。コンクリートの成分分析により配合を推定し、粗骨材の単体の強度等を調査することによりかなり明確な原因が把握できるが、今回の調査の目的が耐力の判定にあるので、この実際に計測された数値で解析をする事にした。

（3）ポアソン比

ポアソン比は0.151～0.193であった。示方書の変革により変わってきているが、一般に設計に用いるポアソン比は、1/5～1/6の範囲にある。試験結果の数値は、これに比べるとやや低めであるが、大差はなかった。

（4）中性化の深さ試験

1992年（平成4年）には、圧縮試験後の供試体を横にして、圧縮割裂した面でフェノールフタレイン法でコンクリートの中性化深さを調査した。

コア3本の結果を表－1に示してある。平均中性化深さはコア断面の中性化部分の面積を直径で除して求めている。文献－10にある中性化速度の式 $x=10\sqrt{R^2(0.046W/C-176)^2t/7.2}$ に、w=50%、t=34年、R=1.0（普通セメント）を代入して深さを計算すると1.17cmとなり、実測値は計算値の1.7倍となっている。一般の

構造物の中性化の進行状況からみると進行が早い結果となっている。建設直後よりクラックが発生し、それに交通荷重などが作用してクラック密度を増加させ、中性化が促進され易い環境となったことと、建設後34年の長期材令が相乗的に作用したことが原因であると思われる。

3. 鉄筋の物性値

本橋の耐荷力、余寿命予測解析のため、供用中の桁(P7～A2)より1991年（平成3年）～1992年（平成4年）の両年に渡りスーラップ筋を切断摘出し、鉄筋の物性値を調査した。本橋に使用している異形鉄筋は、JIS G 3110-1953の基準により、現在のNKK社で製造されたSSD49であり、1958年に納入されたものである。2年連続で化学成分と機械的性質を調べており、最終年には、異形鉄筋素材による疲労試験も実施し、34年経過時点の性状を把握した。摘出された鉄筋を見ると両年分とも発錆は見られなかった。

表－2 異形鉄筋の化学成分

適用基準と試験値	種 別	記号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	C+Mn/6	備考
JIS G 3110-1953	異形丸鋼 2種	SSD49				.070 以下	.070 以下					平炉試験電 気炉の場合
JIS G 3112-1985	鉄筋コンクリ ート用棒鋼	SD295 A				.050 以下	.050 以下					
JIS G 3112-1985	鉄筋コンクリ ート用棒鋼	SD295 B	0.27 以下	0.55 以下	1.30 以下	.040 以下	.040 以下				0.50 以下	
1991年試験値 切出 試験片4本の平均	異形丸鋼 2種	SSD49	.306	.085	.674	.011	.033	.188	.046	.028	0.418	
1992年試験値 切出 試験片3本の平均	異形丸鋼 2種	SSD49	.333	.082	.664	.011	.034	.163	.044	.032	0.444	

(1) 化学成分試験

化学成分分析項目と結果をSSD49、SD295A、SD295Bの規格値も併記して表－2に示した。SSD49、SD295Aには、リン（P）と硫黄（S）のみが規格値としてあるが、結果はSSD49、SD295Aの規格値を十分満足しており、その他の成分についても分析したところ、珪素（Si）、マンガン（Mn）、P、SはSD295Bの規格値の範囲内にあったが、炭素（C）のみSD295Bの規格値を上回っていた。ただし、銅（Cu）、ニッケル（Ni）、クロム（Cr）についてはSD295Bにも規格値はない。

鋼材の成分は、微妙な量により機械的性質および耐候性に影響を及ぼすが、今回規準には明記されていないCについて考察すると、Cを多く入れることにより引張強度を上げることが出来る。当時としては、その意味でSSD49についてはCを多めにし、引張強度の改善を図ったものと思われる。

(2) 引張試験

JIS Z 2201により引張試験片を作成し、JIS Z 2241により引張試験を行った。試験結果にSSD49、SD295A、SD295BおよびSD345の規格値を併記して表－3に示した。

引張強度、降伏点、伸びについては、当時のSSD49

表－3 異形鉄筋の機械的性質

の規格値を満足しており、なおかつ現行のSD295A、SD295Bの規格値も満足するものであった。

この結果、SSD49は、化学成分、機械的性質の点から見ると、現行のSD295A相当であることが判明した。

適用基準と試験値	種 別	記号	引張強度 kgf/mm^2	降伏点 kgf/mm^2	伸び％ 2号試験片	備考
JIS G 3110-1953	異形丸鋼 2種	SSD49	49～63	30以上	14以上	
JIS G 3112-1985	鉄筋コンクリ ート用棒鋼	SD295 A	45～61	30以上	16以上	
JIS G 3112-1985	鉄筋コンクリ ート用棒鋼	SD295 B	45以上	30～40	16以上	
JIS G 3112-1985	鉄筋コンクリ ート用棒鋼	SD345	50以上	35～45	18以上	
1991年試験値 切出 試験片7本の平均	異形丸鋼 2種	SSD49	50.8	32.2	18.8	D16
1992年 試験値 切 出試験片3本の平均	異形丸鋼 2種	SSD49	53.5	33.1	20.4	D16

(3) 疲労試験

本橋の現状調査結果を基にして、せん断疲労の面よりせん断補強鉄筋の疲労解析を行うことにした。

図-3に示す箇所より採取した箱桁腹部のスターラップ筋を使用して疲労試験を行った。異形鉄筋の繰返し荷重による疲労で表面ふし部分の断面変化部に応力集中が生じ疲労破断と言われており、余寿命予測の観点より鉄筋素材の疲労強度を把握することが必要であるので、異形鉄筋の試験はふしの付いた状態で行った。JIS規格によるSSD49の規格寸法とふし形状を表-4、図-4に示した。

疲労試験は、鉄筋形状より回転式疲労試験は不適当なので軸方向引張载荷の方法で、JIS Z 2273 (1974制定) 金属材料の疲れ試験方法通則に準じて実施した。

試験機は、最大荷重が10ton、载荷速度が最大30Hz (毎分1800回) の能力を有している北海道立工業試験場所管の油圧サーボ式疲労試験機 (ST-10) を使用して行った (写真-1)。

イ) 供試体作成

鉄筋素材のまま疲労試験を行うことにしたが、供試体を直接つかむとつかみ部分に応力集中が生じるので、つかみ部の補強を行った。

供試体数は、S-N曲線が描け、疲労限度が把握可能と思われる9本である。供試体の長さは試験機の構造より可能な限り長くする事で80cm (自由区間40cmつかみ補強区間上下両端各20cm) とした (図-5)。

つかみ部の構造としては、文献11を参考にして、アルミパイプ補強で行った。アルミパイプ (内径24mm、外径30mm、肉厚3mm、長さ20cm) の片端部にサックをかぶせそのパイプにエポキシ樹脂系接着剤 (テクノダインSA No5, 2液混合タイプ) を充填した後、D16の供試体鉄筋 (SSD49) をアルミパイプの中心位置に挿入の上、鉄筋とアルミパイプとの密着効果を得るため直ちに万能試験機でアルミパイプ補強部分に約3~4tonで加圧を行い楕円状に圧着し供試体を完成させた (写真-2)。

ロ) 試験荷重及び疲労試験結果

次に、下限荷重を 2.5kgf/mm^2 の一定とし、上限応力については鉄筋引張強度の約30~60% ($16\sim32\text{kgf/mm}^2$) の範囲で試験状況に応じて約 2kgf/mm^2 レンジで随時変化させた。载荷速度は10Hz

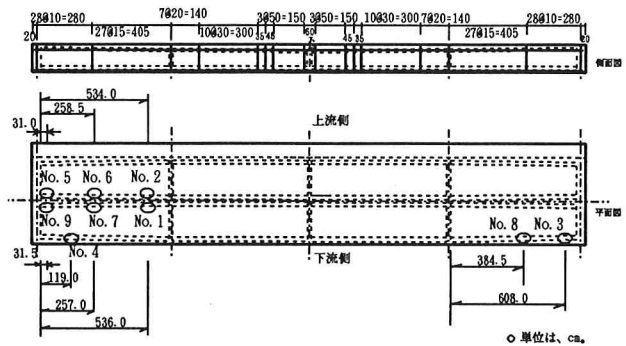


図-3 疲労試験用鉄筋供試体摘出箇所

表-4 異形鉄筋 SSD49 D16規格寸法 (横ふしタイプ)

呼び名	単位重量 kg/m	公称直径 mm	公称断面 面積 cm ²	公称周長 cm	フシおよびリブの寸法			
					フシの間隔の最大値		最小値	最大値
					mm	mm		
D16	1.55	15.9	1.98	5.0	11.1	0.8	最小値の2倍	6.0

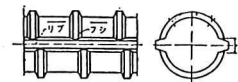


図-4 SSD49 鉄筋形状図

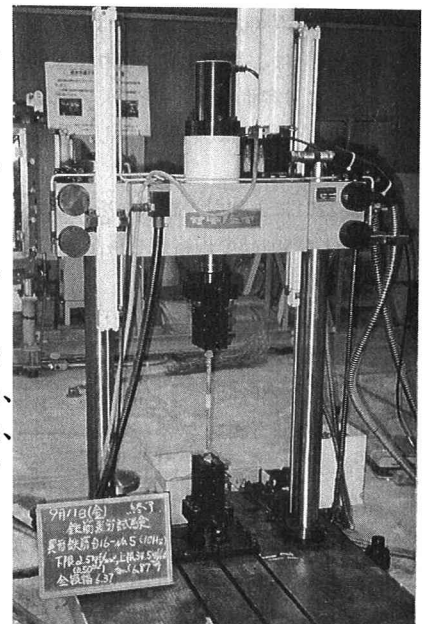


写真-1 油圧サーボ式疲労試験機

(毎分600回)で行った⁽¹²⁾。

供試体9本の試験結果を示したのが表-5であり、図-6にS-N曲線を示してある。図中、横軸は繰返し数を対数で表示し、縦軸は応力振幅を表している。

実験値の疲労破断回数は、No1(応力振幅32.0kgf/mm²で繰返し回数が52,900回)とNo7(17.0kgf/mm²、1,253,800回)を結んだ直線上にあり、200万回を疲労限度とした場合には、No8(16.5kgf/mm²、325万回)とNo9(16.0kgf/mm²、308万回)の2本がこれを越えていた。

同図に土木学会の異形鉄筋の疲労強度の式より求めた結果も点線で示してあるが、土木学会の計算値を基準にすると実験値は、繰返し回数10万回では約7%大きく、100万回では約13%小さかった。なお、土木学会式の適用上限である繰返し回数200万回の疲労強度は19kgf/mm²であった。

実験値の疲労限度応力が土木学会の式より13%程度下回ったことの原因としては、SSD49の当時の規準で製造された鉄筋表面のふしの形状は現行の異形鉄筋に比較して付け根部分での丸みがないためふし部分に応力集中が生じやすいためと、34年間に渡る交通荷重による交番荷重が作用したことが考えられる。

試験終了後の試験片を見ると破断位置は、9本の内7本が異形鉄筋横ふし部にあり、その内アルミパイプ補強部分の境界で破断したのが5本あった。鉄筋軸線を試験機作用力線に一致させることで鉄筋にねじれなどが生じない構造での実験結果なので、鉄筋自由区間が40cmと参考文献11で実施していた70cmより短いことが一因かと思われる。

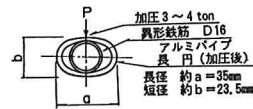
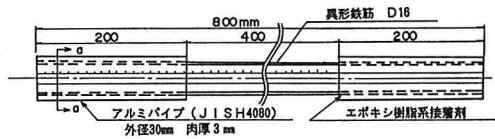


図-5 疲労試験用供試体図

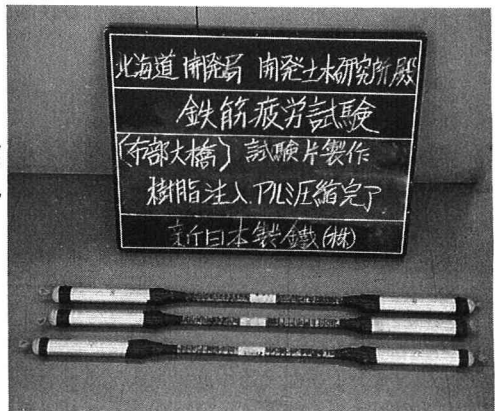


写真-2 疲労試験用供試体

表-5 疲労試験結果

試験片	応力振幅 (Kgf/mm ²)	繰返し回数 N 回	破断・無
No 1	32.0	52,900	有
No 2	30.0	74,600	有
No 3	28.0	136,000	有
No 4	24.0	363,300	有
No 5	20.0	769,300	有
No 6	18.0	1,024,700	有
No 7	17.0	1,253,800	有
No 8	16.5	3,254,000	無
No 9	16.0	3,084,700	無

片振幅で下限値は2.5 (Kgf/mm²)

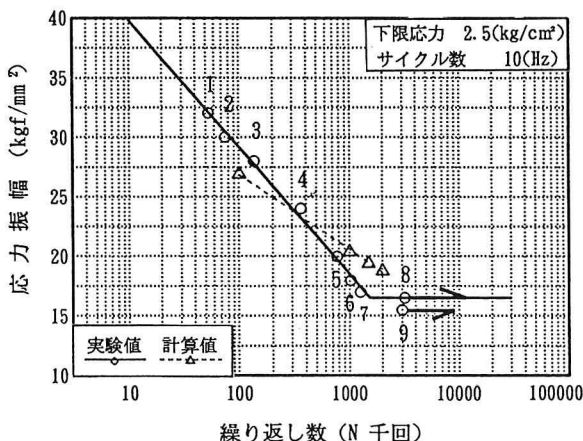


図-6 S-N曲線図

4. まとめ

- 1) コンクリートの圧縮強度にはばらつきはあったが、今回の試験より217～252kgf/cm²の範囲の値が得られた。
- 2) 静弾性係数は、1966年のが 2.13×10^5 kgf/cm²、1991年、1992年のが $1.47 \sim 1.48 \times 10^5$ kgf/cm²であった。
- 3) コンクリートの中性化を観測した結果は2.00cmであり、岸谷式での計算値1.17cmと比較すると中性化速度は標準より早かったものと思われる。
- 4) 本橋で使用された異形鉄筋SSD49は現行のJIS規格で示すとすれば、化学成分や機械的性質よりSD295A相当のものであった。
- 5) 鉄筋疲労試験の繰り返し応力と繰り返し数には強い相関が見られ、今回の一連の試験より、疲労限度は16.5kgf/mm²となった。SSD49は現行の異形鉄筋のふし形状に比べ丸みがないため、ふし部に応力集中が生じやすく、計算値より若干低めとなったみたいである。

今後、今回判明したコンクリート及び鉄筋の物性値を用いて、本橋の耐荷力及び余寿命予測をする予定である。

5. 謝辞

鉄筋及びコンクリートの供試体を提供された旭川開発建設部、1992年のコンクリートの物性値を把握する試験に関しては開発土木研究所の佐藤京、小尾稔両技官、異形鉄筋供試体の化学分析および引張試験を行っていただいた新日本製鉄札幌支店、異形鉄筋の引張疲労試験の実施に際しては三洋化成工業株式会社並びに北海道立工業試験場機械金属部の牧野功主任研究員等の絶大なる協力がありました。ここに謝意を表します。

<<参考文献>>

- 1) 杉山秀夫：布部大橋の設計と施工について、北海道開発局技術研究発表会報文集，第3回（昭和33年）
- 2) 西堀忠信，田岡充夫，貝沢博道：布部大橋耐荷力調査について、北海道開発局技術研究発表会論文集，第10回（昭和41年度）
- 3) 大辻秀男：布部大橋ひびわれ調査報告，北海道開発局技術研究発表会論文集，第13回（昭和44年）
- 4) 稲垣浩司，清友実，三浦兼一：布部大橋修繕工事について，北海道開発局技術研究発表会論文集，第15回（昭和46年）
- 5) 開発土木研究所：布部大橋耐荷力調査業務報告書，平成3年12月
- 6) 上田多門，岡村 甫：疲労荷重下のスターラップの挙動，コンクリート工学論文，No. 81，5-1
- 7) 長谷川寿夫，杉山 雅：構造体コンクリートの乾燥と力学的性状に関する研究，日本建築学会論文報告集第295号 昭和55年9月
- 8) 桜井宏，鮎田耕一，鈴木明人，百崎和博，佐伯昇，藤田嘉夫：RC構造物の耐久性設計及び寿命予測のための経年変化データの解析及び検討，コンクリート構造物の寿命予測と耐久性検討に関するシンポジウム論文集，1988年4月
- 9) George W. Washa, Kurt F. Wendt 地濃茂雄，森口浩史抄訳：コンクリートの材令50年までの性状，コンクリート工学1975年6月
- 10) 岸谷孝一：鉄筋コンクリート造建物の耐久性向上に関する考察，日本建築学会論文報告集第65号 1960年6月
- 11) 河合紘茲，堺 毅：異形鉄筋の引張疲労試験に於ける握み部補強方法に関する研究，土木学会第39回年次学術講演会（昭和59年）1984年
- 12) 河合紘茲：異形鉄筋の疲労性状に関する研究，土木学会第42回年次学術講演会（昭和62年）1987年