

十勝大橋に用いられた鉄筋の特性及び鍛接継手

熊谷 守晃¹・太田 利隆²・佐伯 昇³・星 俊彦⁴

¹正会員 北海道開発局開発土木研究所 材料研究室長 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 博士(工) (財)北海道コンクリート技術センター 理事長 (〒003-0001 札幌市白石区東札幌1条4丁目6-10)

³フェロー会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 日鐵セメント(株) 研究開発部 研究員 (〒050-8510 室蘭市仲町64番地)

十勝大橋の解体に伴い、鉄筋及び鍛接継手の調査を行った。鉄筋は強度及び鍛接に適するように成分調整されていることが判明した。 $\phi 44\text{mm}$ 鉄筋では、引張強度は規格値を満足していたが、変動が大きかった。 $\phi 38\text{mm}$ 以下の鉄筋では、引張強度は現在の鉄筋とほぼ同じ標準偏差であるが、降伏点は当時規格化されていないため、ばらつきが大きかった。鍛接継手は引張りについて全強を確保していた。

Key Words: reinforcing steel, strength, corrosion, reinforced concrete bridge, forging joint

1. まえがき

十勝大橋(一般国道241号、昭和15年～平成8年)は橋長390m($10.5+9@41.0+10.5\text{m}$)、幅員18.0mの鉄筋コンクリートゲルバー橋である。建設時に行った調査、設計、施工の詳細が論文として発表されているばかりでなく、論文の基となったデータも整理保存されている貴重な橋である¹⁾。本橋の解体に伴い、材料試験、非破壊試験、主桁の長期暴露試験を行った。本文は鉄筋に関する報告である。

十勝大橋に使用された鉄筋量は上部工1,175t、下部工258t併せて1,433tに達する。特に複数着桁には、主鉄筋として、 $\phi 44\text{mm}$ の極太径鉄筋が用いられ、またその継手には矢筈式鍛接が採用された。

極太径鉄筋($\phi 44\text{mm}$, $\phi 38\text{mm}$)は日本鋼管(株)川崎工場の山形鋼製作ヤードで特別に圧延されたが、鉄筋長が25mと非常に長かつたため、最終工程に自動冷却装置を利用できず、冷却まで長時間を要した。このため、鉄筋に湾曲を生じ、現場では、鉄筋の矯正作業が必要であり、その程度は $\phi 38\text{mm}$ 筋が著しかったと報告されている。

本文は1)昭和10年代の鉄筋、特に大断面で、圧延時、冷却に長時間要したとされる $\phi 44\text{mm}$ 筋の材質、2)鍛接継手、3)鉄筋腐食について考察したものである。

2. 鉄筋の採取

主桁スターラップの設計かぶりは複数着桁37mm、吊桁39mmであるので、主鉄筋では50mm以上である。施工にあたってはかぶりの確保に十分留意し、型枠設置後、配筋を行ったほか、かぶりを確保するコンクリートチアなどはひび割れ発生の引き金となる可能性があるため、耐久性上好ましくないとして用いなかった。またコンクリート打込みにあたっては配筋位置に誤差が生じないように十分点検し不都合があれば手直ししたとされる。

橋の外観調査では、主桁や床版にひび割れは多数発生していたが、鉄筋の腐食はかぶり不足部や豆板部でほんの一部認められた程度で、縦ひび割れなどは皆無であった。鉄筋は腐食程度、径別により採取する計画であったが、腐食した鉄筋はほとんど認められず、また、橋の解体時、鉄筋の配置状態やその腐食程度を調査するのが作業工程上難しかったので、あまり変形を受けていないものから径毎に長さ70cmを必要なだけ採取することにした。 $\phi 19\text{mm} \sim \phi 44\text{mm}$ 筋各30本、 $\phi 16\text{mm}$ 筋55本、 $\phi 12\text{mm}$ 筋40本、 $\phi 44\text{mm}$ 鍛接継手部32本、 $\phi 19\text{mm}$ 腐食鉄筋4本を採取したが、細径の鉄筋では上記の条件に適合するものを確保することが難しかった。

腐食鉄筋は、豆板部で建設当初から鉄筋が露出していた部分から採取することにした。

表-1 試験項目

調査項目		鉄筋 調査	継手 調査	腐食 調査	備考
外観 調査		●	●	●	腐食、錆、スケール、きず等 酸洗後、錆、スケール、きず等
寸法・形状・単位質量		●	●	●	
引張試験		●	●	●	JIS Z 2241
曲げ試験		●	●	●	JIS Z 2284
化学成分		●	—	—	JIS G 1258, JIS G 1237, JIS G 1228 JIS Z 2613:C, Si, Mn, S, P, Cu, Ni 等
継手部パターン (マクロ調査)		C断面*	—	●	—
		L断面**	—	●	—
断面内硬度		C断面*	●	—	—
ロックウェル硬さ		L断面**	—	●	—
ミクロ 調査	光学 顕微鏡	C断面*	●	●	—
		L断面**	—	●	—
	SEM	C断面*	●	●	—
	L断面**	—	●	—	
表面 分析	観察	E PMMA	C断面*	●	●
		SEM	C断面*	●	●
	組成 分析	SEM	C断面*	●	●
		X線 回折	スケール 錆回収	●	●
錆の発生量		C断面*	—	—	●

* C断面：鉄筋軸に直交する切断面

** L断面：鉄筋軸に平行する切断面

表-2 単位質量(実測値/計算値)

鉄筋	φ44	φ38	φ28	φ19	φ16	φ12
平均値	0.982	0.997	0.962	0.955	1.006	0.986
標準偏差	0.013	0.005	0.010	0.026	0.016	0.029

3. 試験項目

試験項目を目的別に表-1に示す。

4. 試験結果

(1) 単位質量

表-2は各径 20 本の単位質量測定結果で、実測質量/計算質量の比で示したものである。鉄筋は一般に細引きされる傾向にあり、規格値を下回る例もしばしば報告されている。山坂鉄筋に関する青木らの調査²⁾によれば、規格値を下回る鉄筋は丸鋼で 2.2~3.6%、異形棒鋼で 6~22%とされている。単位質量に関する規格は庄延技術の発達に伴い、大きく変化しているが、JES 24 号「庄延鋼材の寸法及び重量の公差(大正 15 年 10 月)」では、一個に対する許容値 $\pm 6\%$ 、10 本以上の 1 組に対する許容値 $\pm 5\%$ である。十勝大橋の場合、組値では全て規格を満足

しているが、φ19mm は 7 本、φ28mm は 1 本が規格値を下まわっていた。

(2) 鉄筋の特性

十勝大橋の鉄筋がどのような規格に基づいて製造されたか定かではない。大正 14 年制定日本標準規格 JES 20 号「構造(橋梁・建築その他)用圧延鋼材」には鉄筋コンクリート用棒鋼が規定され、引張強度 (382~510N/mm²) となっている。しかし昭和 13 年 12 月、JES 20 号は発展的に解消され、JES 430 号「構造用圧延鋼材」が新たに制定され、棒鋼 2 種 SS41 (引張強度、402~490 N/mm²) が定められたが、鉄筋コンクリート用棒鋼は削除された。十勝大橋の鉄筋組立は昭和 13 年 7 月~14 年 11 月であるのでちょうど過渡期にあたる。本文では JES 20 号を対象とする規格と考える。

a) 引張試験

各径 10 本の引張試験結果を表-3に示す。

表-3 鉄筋引張試験結果

鉄筋	引張強度 TS(N/mm ²)			降伏点 YS "(N/mm ²)			伸び (%)			備考
	最大	平均	標準*	最大	平均	標準*	最大	平均	標準*	
	最小	偏差		最小	偏差	偏差	最小	偏差	偏差	
φ44	473 361	417.9 (10.6)	44.21	306 214	264.7 (13.2)	35.04	38.4 23.3	33.6 (13.2)	4.42	
φ38	447 373	409.6 (6.9)	27.81	286 234	258.4 (6.5)	16.78	37.5 27.6	33.9 (9.1)	3.10	
φ28	489 418	450.1 (4.5)	20.40	412 273	336.3 (13.1)	44.08	38.8 28.6	34.3 (10.4)	3.56	YS/TS>0.90 を除く
φ19	456 402	419.2 (3.9)	16.16	340 269	287 (8.5)	24.50	34.2 18.3	26.9 (20.0)	5.39	
φ16	487 387	429.7 (7.4)	31.95	338 287	306.6 (5.1)	15.50	32.9 26.7	30.2 (6.1)	1.83	YS/TS>0.90 を除く
φ12	471 417	443.3 (4.0)	17.71	337 301	319.7 (3.3)	13.07	33.2 17.4	29.1 (17.7)	5.15	過大値を除く (信頼度 99%)

* () は変動係数 (%)

** 降伏棚を有する鉄筋 (φ28mm 筋を除く)

YS/TS が 0.9 を超える φ28mm, φ16mm の各一本および引張強度が高く、伸びが小さい φ12mm の一本はコンクリート解体中に降伏点をこえる応力をうけたと推定されるのでデータから除外した。

引張強度は細径 φ28mm 以下の鉄筋はいずれも JES 規格を満足しているが、特別注文された太径の φ44mm, φ38mm 筋は規格値を下回るものがある。また φ44mm 筋の標準偏差および変動係数が φ38mm 以下の鉄筋よりも大きくなっている。

図-1 は解体コンクリート橋から採取した鉄筋の引張強度試験結果³⁾に十勝大橋の数値を書き加えたものである。鉄筋の品質は第2次世界大戦以前には引張強度が低いものがあるものの、品質は安定していた。これに対し、第2次世界大戦直後の昭和20年代は鉄筋の品質よりも量の確保が緊急の課題となり、再生棒鋼が鉄筋コンクリート構造物にも多用されるようになった。このため同一橋梁に普通鋼と 690N/mm² 以上の高強度鋼（再生棒鋼と思われる）が同時に使用されているケースが多くなり、標準偏差が非常に大きくなっている。

昭和30年代になって鉄筋の品質は再び安定する。

φ44mm 筋引張強度の標準偏差は、昭和20年代の鉄筋を除けば、大きいことが特筆される。φ44mm 筋は十勝大橋が必ずしも日本における最初の使用例ではないようであるが、製造時に自動冷却装置が利用出来ないことなどから、冷却速度が一定とならず、強度のばらつきが大きくなつたものと考えられる。

一方、φ38mm 筋の場合、昭和6～11年に建設された旧稚内港ドーム（北護岸防波底）の平均引張強度 434.1N/mm²、標準偏差 31.97N/mm²で⁴⁾ 十勝大橋とほぼ同じである。これらの結果から、当時として、φ38mm 筋までは製造技術が確立していたものと考えられる。現在製造されている電炉材の品質は平均引張強度 485～522N/mm²、標準偏差 13～24N/mm²であるので⁵⁾、φ38mm 以下の鉄筋はほぼ同等の品質が確保されていたものと思われる。

構造物の設計上は引張強度よりも降伏点の方が大きな意義を有している。しかし降伏点が規格として規定されるようになったのは昭和27年 JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」からである。また設計上、降伏点と 0.2%オフセット耐力は同様に取り扱われるが、材質上定義が異なるため、表-3 ではデータとして降伏点のみを採用した。また φ28mm 筋は降伏棚を有するものが少なく、参考として耐力を示した。降伏点でも φ44mm 筋の標準偏差の大きいことが注目される。図-2 は既設コンクリート橋の鉄筋降伏点を調査した例³⁾である。昭和30年代の鉄筋に一部標準偏差の大きいものがあるが、これは PC 橋のスターラップとして使用された極細径鉄筋 (φ9mm 以下) である。φ44mm 筋の標準偏差 35.04N/mm² は既設調査橋の中でも大きい方である。φ44mm 筋は当時の関係者の大変な努力にもかかわらず、降伏点においても品質のばらつきが大きいことが判明した。φ38mm 以下の鉄筋の標準偏差は 13.07～24.50N/mm² (φ28mm 筋を除く)

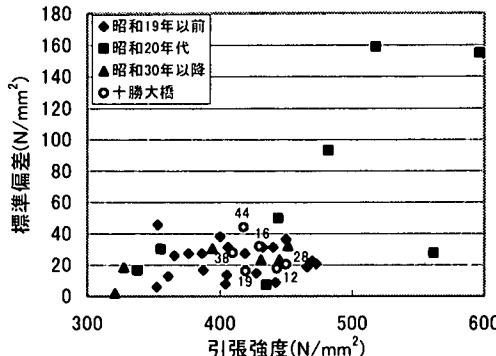


図-1 既設コンクリート橋鉄筋引張強度
(数字は十勝大橋鉄筋径)

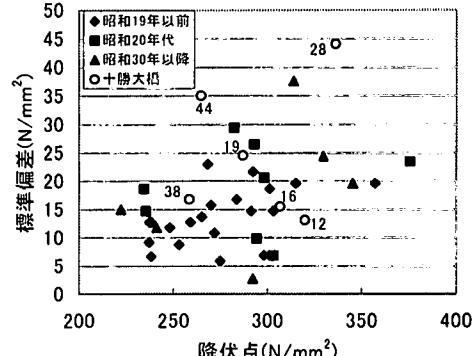


図-2 既設コンクリート橋鉄筋降伏点
(数字は十勝大橋鉄筋径)

で、 $\phi 44\text{mm}$ 筋に比べて小さいが、現在の電炉材の平均引張強度 $333\sim347\text{N/mm}^2$ 、標準偏差 $10\sim13\text{N/mm}^2$ ⁵⁾ 比較すればかなり大きい。降伏点に対する規格がなく、引張強度に比べ重視されなかった結果と思われる。

伸びが JES 規格を満足しない本数は $\phi 44\text{mm}$ 筋 1 本、 $\phi 19\text{mm}$ 筋 2 本、 $\phi 12\text{mm}$ 筋 1 本で破断位置はいずれも JIS Z 2241 による B 部（標点内ただし標点距離の $1/4$ を超える）または C 部（標点外）である。平均伸びは規格値（ $\phi 25\text{mm}$ 未満 21%以上、 $\phi 25\text{mm}$ 以上 25%以上）を十分満足しているが、標準偏差は $1.83\sim5.39\%$ で、現在の電炉鉄筋の $2\sim3\%$ に比し、ばらつきが大きくなっている。また強度と伸びの相関は認められなかった。

b) 曲げ試験

曲げ試験について JES 20 号は 1.5ϕ の曲げ内半径で 180 度、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」は $\phi 16\text{mm}$ 以下では曲げ内半径 1.5ϕ 、 $\phi 16\text{mm}$ を超えるものについて 2.0ϕ で 180 度と定めている。本試験では鉄筋外側のひずみが等しくなるように全ての径について 2.0ϕ 180 度で統一した。

各径 5 本について行った試験結果はいずれも、われ、折損などの欠点は認められなかった。

c) 化学成分

供試体として各径ランダムに 1 本づつ採取したほか、比較のため各径の TS 上下限値を選定した。サンプルは各径とも C 断面 $1/4D$ (D: 直径) 部から $\phi 5\text{mm}$ のドリルで削り取り各種化学分析に供した。鉄筋の場合、圧延時表面から温度が低下し各種元素が晶出する。一般的の場合、冷却が比較的早いのにに対し元素の拡散は非常に遅いため、はじめに凝固した部分の組成は純金属に近く、最後に凝固した部分には不純物が多く含まれる。このため一般に溶鋼分析値とは一致しないばかりでなく、分析値のばらつきも大きくなる。またその傾向は元素により異

なるほか、太径になるに従い著しくなると言われる。サンプリングは結果として細径 $\phi 12\text{mm}$ 筋は断面のほぼ平均的な成分値、太径 $\phi 44\text{mm}$ 筋は偏析の多い部分的な成分値となった。

試験結果を表-4 に示す。JES 20 号の化学成分規定値は、平炉の場合、P 0.08%以下、S 0.06%以下であるので、ほぼ規格を満足している。

鋼材について、キルド鋼、セミキルド鋼、リムド鋼と言う定義が当時なされていたかどうか定かではないが、脱酸剤として、Si, Mn, Al が使用される場合、鋼は欠陥が少ない組織となり均質化されることは認識されていた。 $\phi 28\text{mm}$ 以下の細径鉄筋は Si が添加されており、キルド鋼相当と考えられる。特に $\phi 28\text{mm}$ 筋は Si 約 0.25%, Mn 約 0.64% と添加量も多く、現在キルド鋼の日安とされている量 (Si ≈ 0.25%, Mn ≥ 0.50%) にほぼ近い値となっている。更に $\phi 28\text{mm}$ 筋は降伏棚現象を示すものもなく他の径の鉄筋とは異なる挙動を示している。

一方太径の $\phi 38\text{mm}$ 筋、 $\phi 44\text{mm}$ 筋は Si, Al が未添加であることから造塊法はリムド鋼といえる。

しかしこれらの鉄筋は鍛接されることを前提として、化学成分の調整が行われていたことが考えられる。すなわち鍛接を行う鋼に対する各種元素の影響について、S は赤熱脆性の原因となり、Al は酸化して皮膜をつくるので極力排除すべきである。Si は鋼に脆性を付与するので、少なくとも 1%以下、また Mn は 0.45~0.60% で Si による脆性を緩和する、更に P は最小限度に止めるべきであるとしている。そして鍛接する鋼は加熱による組織の損傷を防ぎ、青熱脆性が少ないものとして、化学成分は C = 0.2~0.5%, Si = 0~0.2%, Mn = 0.6~0.8%, P ≥ 0.03%, S ≥ 0.04% が提唱されている⁶⁾。 $\phi 44\text{mm}$ 筋の化学成分は Mn 量がすこし少ないが、まさにこの条件に適合するものである。

表-4 化学成分分析結果 (%)

試料	Ceq	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	Mo	V	As	Sn	Mg	Ca	Nb	O	N	位置	備考
ø44mm	0.326	0.23	0.01	0.43	0.038	0.034	0.14	0.04	0.04	<0.001	<0.001	0.019	0.037	<0.001	<0.001	0.010	0.003	1/4D			
ø44mm	0.334	0.22	0.01	0.50	0.084	0.045	0.17	0.05	0.05	<0.001	<0.001	0.002	0.024	0.040					1/4D	TS上限	
ø44mm	0.269	0.21	0.01	0.27	0.019	0.032	0.16	0.02	0.02	<0.001	<0.001	0.023	0.028					1/4D	TS下限		
ø38mm	0.288	0.19	0.01	0.45	0.036	0.044	0.09	0.03	0.03	<0.001	<0.001	0.015	0.073	<0.001	<0.001	0.013	0.004	1/4D			
ø38mm	0.320	0.22	0.01	0.46	0.045	0.051	0.10	0.04	0.03	<0.001	<0.001	0.018	0.089					1/4D	TS上限		
ø38mm	0.271	0.18	0.01	0.41	0.034	0.045	0.11	0.04	0.03	<0.001	<0.001	0.001	0.017	0.069					1/4D	TS下限	
ø28mm	0.306	0.13	0.25	0.64	0.038	0.034	0.19	0.06	0.05	0.004	<0.001	0.001	0.021	0.033	<0.001	<0.001	0.014	0.004	1/4D		
ø28mm	0.307	0.13	0.25	0.64	0.038	0.030	0.19	0.06	0.05	0.003	<0.001	0.002	0.020	0.033					1/4D	TS上限	
ø28mm	0.296	0.12	0.25	0.64	0.037	0.030	0.18	0.06	0.05	0.005	<0.001	0.001	0.020	0.033					1/4D	TS下限	
ø19mm	0.213	0.11	0.13	0.39	0.032	0.050	0.18	0.03	0.02	<0.001	<0.001	0.001	0.028	0.057	<0.001	<0.001	0.015	0.004	1/4D		
ø19mm	0.222	0.12	0.13	0.39	0.032	0.048	0.18	0.03	0.02	<0.001	<0.001	0.001	0.027	0.057					1/4D	TS上限	
ø19mm	0.190	0.09	0.09	0.40	0.050	0.057	0.16	0.04	0.03	<0.001	<0.001	0.001	0.029	0.091					1/4D	TS下限	
ø16mm	0.194	0.10	0.18	0.32	0.021	0.036	0.28	0.03	0.01	0.0033	<0.001	0.001	0.016	0.108	<0.001	<0.001	0.028	0.003	1/4D		
ø16mm	0.300	0.20	0.21	0.33	0.017	0.024	0.35	0.03	0.01	0.002	<0.001	0.001	0.014	0.102					1/4D	TS上限	
ø16mm	0.175	0.09	0.19	0.27	0.011	0.021	0.28	0.03	0.01	0.002	<0.001	0.001	0.015	0.177					1/4D	TS下限	
ø12mm	0.198	0.11	0.15	0.31	0.014	0.030	0.29	0.03	0.01	<0.001	<0.001	0.001	0.015	0.173	<0.001	<0.001	0.028	0.003	1/4D		
ø12mm	0.366	0.20	0.19	0.53	0.070	0.056	0.15	0.15	0.16	0.006	0.001	0.001	0.039	0.344					1/4D	TS上限	
ø12mm	0.198	0.11	0.15	0.31	0.013	0.028	0.29	0.03	0.01	<0.001	<0.001	0.001	0.015	0.173					1/4D	TS下限	
ø44繩*	0.519	0.44	0.01	0.36	0.023	0.049	0.17	0.03	0.02	<0.001	<0.001	0.001	0.022	0.029	<0.001	<0.001	0.005	0.004	1/4D		
ø44繩*	0.397	0.30	0.01	0.38	0.026	0.066	0.21	0.05	0.04	<0.001	<0.001	0.001	0.031	0.059					1/4D	TS上限	
ø44繩*	0.219	0.16	0.01	0.26	0.015	0.024	0.16	0.04	0.02	<0.001	<0.001	0.001	0.019	0.023					1/4D	TS下限	
ø44繩*	0.318	0.22	0.01	0.43	0.057	0.054	0.20	0.06	0.05	<0.001	<0.001	0.001	0.029	0.052					1/4D	曲げ折損	
ø44繩*	0.252	0.19	0.01	0.27	0.016	0.030	0.16	0.04	0.03	<0.001	<0.001	0.001	0.021	0.025					1/4D	曲げ良好	
ø44繩*	0.217	0.15	0.01	0.30	0.014	0.029	0.16	0.03	0.03	<0.001	<0.001	0.001	0.013	0.036					1/4D	母材17左	
ø44繩*	0.281	0.21	0.01	0.32	0.021	0.052	0.17	0.03	0.03	<0.001	<0.001	0.001	0.016	0.049					1/4D	母材17右	
ø44繩*	0.341	0.25	0.01	0.40	0.027	0.033	0.22	0.06	0.04	<0.001	<0.001	0.001	0.019	0.030					1/4D	表層	
ø44繩*	0.537	0.43	0.01	0.38	0.073	0.111	0.26	0.06	0.04	<0.001	<0.001	0.001	0.037	0.068					1/4D	中心	
ø19錆*	0.251	0.14	0.14	0.40	0.078	0.057	0.30	0.06	0.04	0.001	<0.001	0.001	0.022	0.049					1/4D	母材17右	
ø19錆*	0.217	0.12	0.13	0.35	0.039	0.061	0.19	0.05	0.03	0.001	<0.001	0.001	0.019	0.155					1/4D	中心	

*: 鍛造継手部 (ø44mm)

**: 腐食鉄筋 (ø19mm)

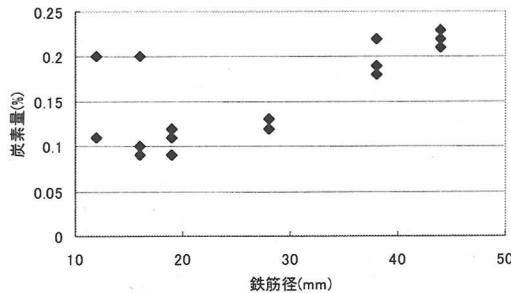


図-3 鉄筋径と炭素量

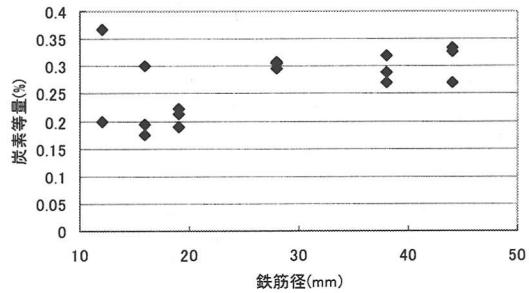
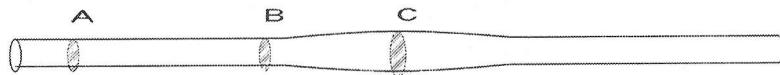


図-4 鉄筋径と炭素等量



A (母材)

B (熱影響部)

C (矢筈式鍛接部)

10mm

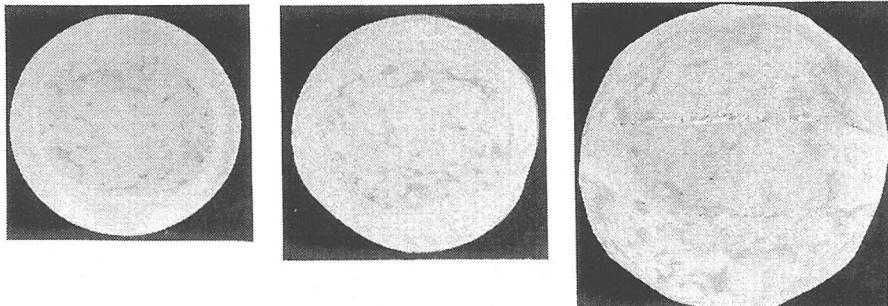


写真-1 φ44mm 筋C断面マクロ組織

図-3, 4は鉄筋径と炭素量および炭素等量の関係である。φ16mm以下の細径鉄筋は炭素量、炭素等量とも非常にばらついている。しかしφ19mm以上では、バラツキが小さいばかりでなく、太径ほど炭素量、炭素等量が大きくなっている。強度調整のためこれらを制御している様子が認められる。理由は、圧延鋼材の場合、太径になるに従い、圧延仕上温度が高くなるのみならず、冷却速度は遅くなる。このためパーライト組織が大きくなり、強度は低下する傾向になるためである。

d) 組織

写真-1はφ44mm筋C断面のマクロ組織である。リムド鋼に特徴的なインゴットパターンのような2層の組織が認められる(マクロパターン)。マクロパターンは熱影響部にも認められるが、鍛接部では同一断面に二つの異なる鉄筋が混在し、また打撃により一部組織が乱され

るので、もはや存在しない。マクロパターンの表層部と中心部では偏析により化学成分値がかなり異なっているが(表-5)、これもリムド鋼が有する特徴の一つである。特に曲げ試験折損材では孔数も多く各種元素の偏析量も著しくなっていた。

写真-2, 3はそれぞれφ44mm、φ19mm筋のマクロ試験片の光学顕微鏡観察である。いずれも炭素量0.1~0.3%の典型的なフェライト(黒色部)とパーライト(白色部)からなる組織であるが、偏析のためサンプル採取位置(表面、1/4D、中心)によりパーライトとフェライトの割合が異なっている。また中心部では圧延方向にフェライトが層状に発達した組織が認められるが、層状組織はφ16mm以下の細径鉄筋にはもはや存在しなくなっている。JIS G 0552による粒度番号は太径7~8、細径8~9と径が小さくなるに従い、細かい組織となっている。

表一5 元素の偏析例 ($\phi 44\text{mm}$)

調査項目	部 位	表層部	$1/4\text{D}$	中心部	摘要
C ($\times 100\%$)	母材	23	32	26	マクロパターンに濃縮
	熱影響部	23	31	27	
	鍛接部	21	22	27	偏析緩和
P ($\times 1000\%$)	母材	26	38	32	マクロパターンに濃縮
	熱影響部	26	52	35	
	鍛接部	28	28	36	中心部偏析大
S ($\times 100\%$)	母材	20	50	31	マクロパターンに濃縮
	熱影響部	21	49	36	
	鍛接部	40	39	38	偏析緩和
C等量 (%)	母材	0.32	0.41	0.35	マクロパターンに濃縮
	熱影響部	0.32	0.41	0.36	
	鍛接部	0.30	0.31	0.36	偏析緩和
硬度 HRB	母材	68.2—77.8	60.8—77.0	72.4	
	熱影響部	71.0—73.2	70.8—74.5	71.8	
	鍛接部	67.2—73.5	68.2—75.2	73.3	

また表層部と中心部では表層部の粒度が粗になっている。圧延時の温度履歴の違い、添加元素の有無などが影響したものと考えるがこれらはいずれも日常的に観察される事象である。また介在物として MnS が全ての鉄筋にみとめられたが強度など鋼材の品質に影響を及ぼす大きな結晶は存在しなかった。SEM (走査型電子顕微鏡) による観察でも鋼に一般的な化学成分のみで異物などの混入などは認められなかった。

(3) 鍛接継手

a) 鍛接継手

鍛接は日本では日本刀の製作などで広く利用されている方法で、二つの金属を溶融近くまで加熱し、鍛造して結合するものである。

鉄筋の鍛接継手に関しては、大正時代に各種継手工法の一つとして広く実験が行われ、その継手効率について活発な議論がなされたが、実際の工事に採用されたという記録はない。

十勝大橋では、 $\phi 44\text{mm}$ 筋の継手として多数の試験を行い、熱処理によって母材強度は低下しないこと、矢筈式鍛接継手の強度は母材強度の 95% を確保出来ることを確認し、アプセットにより継手部断面積を 50% 増加すれば、鉄筋の全強を伝えられるとして採用された¹⁾。

施工手順は次のようにある。

- 1) 800°C 以下に熱し、アプセットを形成する。
- 2) 端部を再び加熱後、はめ入れ端及び裂け目端を成形する。
- 3) 800°C に加熱して継手面に付着している溶滓を除去し、媒接材 (容積比で：鉄粉 4, 砂 5.5, クロム酸カリ 0.5) を塗布する。
- 4) 1,100°C に均一に加熱し、継手部を火床中にて溶着させた後、金敷上で槌打、鍛接する。

b) 引張試験

試験を行った鍛接鉄筋 10 本はいずれも母材で破断し、平均引張力は 637.6kN (標準偏差 36.91kN) である。継手を有しない鉄筋 10 本の平均引張力は 643.0kN (標準偏差 64.81kN) であるので、むしろ強度のばらつきの小さい、優れた鍛接がなされたことを示している。

一方、筆者の一人が行った間内橋 (一般国道 238 号、昭和 26 年～昭和 50 年) の調査では、鍛接はアプセットを有しているにもかかわらず、3 本中、2 本が継手部で破断し、母材に対する引張力比も 0.85～0.91 とかなり低下していた⁷⁾。鍛接は鍛冶工の技量に左右されることが大きいと言われるが、鍛接を前提として製造された鉄筋と一般用として製造された鉄筋の化学成分にも原因があるものと考えられる。

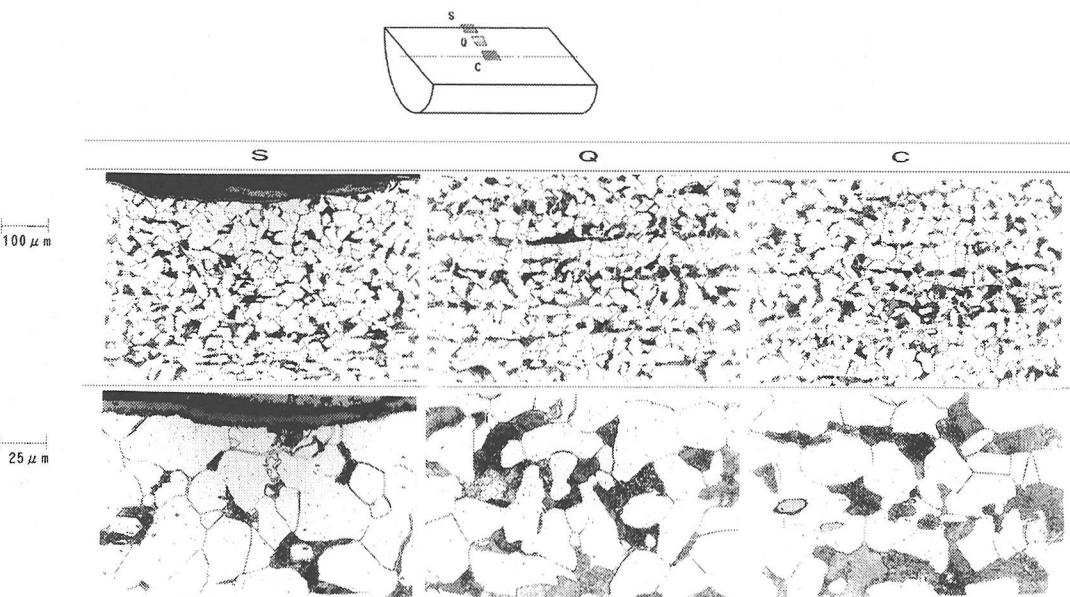


写真-2 φ44mm 筋筋断面顕微鏡組織 (5%硝酸アルコール腐食液によるエッティング後)

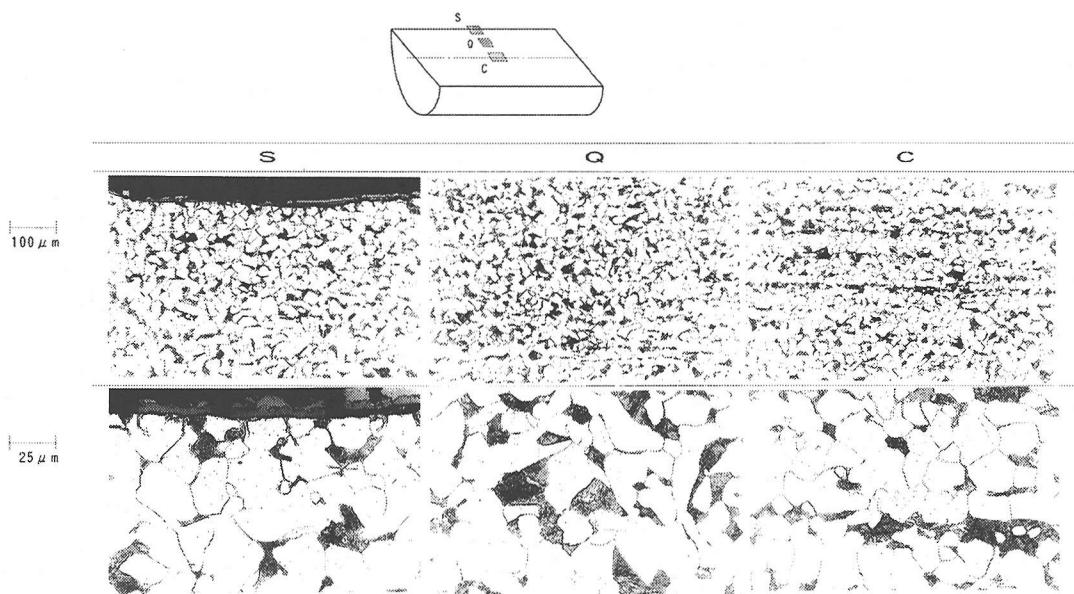


写真-3 φ19mm 筋筋断面顕微鏡組織 (5%硝酸アルコール腐食液によるエッティング後)

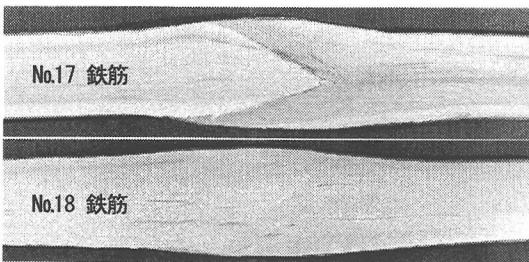


写真-4 鍛接継手部マクロ組織

c) 曲げ試験および化学成分

継手の曲げ試験は圧接継手について曲げ内半径 $1.5\phi/2$ で 90 度という規定がある。鍛接継手の場合、継手部が長いのでこれを準用するのは不適当と判断し、一本ものの鉄筋に比べ、条件は厳しくなるが、曲げ内半径 2ϕ で 180 度で行った。試験を行った 5 本のうち、2 本は折損、2 本には亀裂発生、1 本が健全であった。

写真-4 は鍛接継手部のマクロ写真である。上の鉄筋(No.17)は継手接合部が明瞭であり、下の鉄筋(No.18)はその接合部が認められず一体化している。

図-5 は硬さ試験の結果である。鍛接継手部に近づくに従い硬さが低くなるが、熱影響部ではいったん硬くなり、接合部では硬度が下がっている。また No.18 鉄筋は左右対称なのに比べ No.17 鉄筋は接合部を境に硬度が跳ね上がっている。炭素等量が変化していることがうかがえる。化学試験の結果では(表-4) No.17 鉄筋の左部鉄筋の炭素量 0.2%に対し右部鉄筋の炭素量は 0.4%と大きく異なる。鍛接の適用温度は炭素量 0.2%では 650~1,350°C、炭素量 0.4%では 750~1,250°C である。工事報告書¹⁾によれば 800°C 程度で、各種前処理を行い、1,100°C で鍛接を行ったとしている。仮に鍛接作業時、報告書にある通りの温度管理が行われたとすれば、鉄筋の炭素量が異なることはほとんど問題とならない。

しかし炭素量が異なることは鍛接最適温度を狭くするので、僅かな条件の変化により鍛接の良否が大きく左右されることが考えられる。

写真-5 は継手形状が明白に認められる鉄筋 No.17 の鍛接部の組織写真である。鍛接時の熱影響により、結晶が粗大化(A 部、粒度番号 2)したり、層状フェライト(C 部)が発達している。結晶の粗大化は矢筈継手の先端部であり、この部分の温度が 1,200°C を超えたことがうかがえる。また層状フェライトは炭素量が多いえ鍛接温度が比較的低かったことが原因と思われる。これらはいずれも強度低下やぜい性破壊の原因となるものである。

写真-6 は鍛接接合部の組織写真である(No.17)。左右の鉄筋の炭素量が大きく異なるため接合面をはさんで結

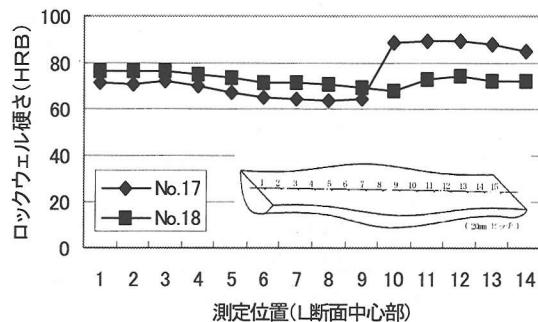


図-5 鍛接継手部の硬さ分布

晶が異なっているほか、鍛造時に混入されたと思われる酸化したスケールも認められる。しかし材質劣化につながるような非金属介在物は認められなかった。

(4) 鉄筋腐食

a) 外観調査及びスケール

鉄筋採取後、調査まで約 6 ヶ月間屋内に保管した。鉄筋表面は黄褐色または赤褐色を示し、腐食はほとんど認められなかった。

断面の観察では、 $\phi 44\text{mm}$ 筋の一部及び $\phi 19\text{mm}$ 腐食筋はスケールが 3 層、その他の鉄筋は 1 層である。スケール厚は 3 層の場合 0.08~0.12mm、1 層の場合 0.04~0.06mm である。全てのスケールに Fe,O,C が含まれているほか、セメントから由来する Ca,Si,S,Al が多く認められ、 $\phi 19\text{mm}$ 腐食筋の表面には Na,Cl,K など外見またはブリーディング水の残滓と思われる元素も存在した。

b) 鉄筋腐食断面積および引張力

$\phi 19\text{mm}$ 腐食筋の最大腐食深さは 0.5~1.00mm であり、その範囲は円周方向 1/2 にわたっていた。これらから腐食断面減少量を算出すると約 2.6%，鉄筋表面積あたりの質量に換算すると 0.5mdd である。一方 $\phi 19\text{mm}$ 筋の引張力の平均値および標準偏差はそれぞれ 115.5kN, 3.42kN であり、 $\phi 19\text{mm}$ 腐食筋の平均引張力および標準偏差は 117.0kN, 10.22kN で引張力の差はない。腐食の場合、断面積減少量と引張力の低下は線形の関係ではなく、断面減少量に比し引張力の低下が小さいのが普通である。十勝大橋の場合にも同様の結果が得られたことになる。

c) 腐生成物

熱間圧延された鋼材は大気中の酸素により、酸化され、その表面に FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃ からなるスケールを形成する。一般に鋼材表面付近に FeO が厚く、その外側に薄い Fe₃O₄, Fe₂O₃ があると言われるが、圧延による熱影響の違いにより、その組成比も異なるようになる。すなわち鋼材がゆっくりと冷却されると、FeO が Fe₃O₄ と α -Fe に分解され、逆に急冷されると Fe₃O₄ の生成が抑制される。

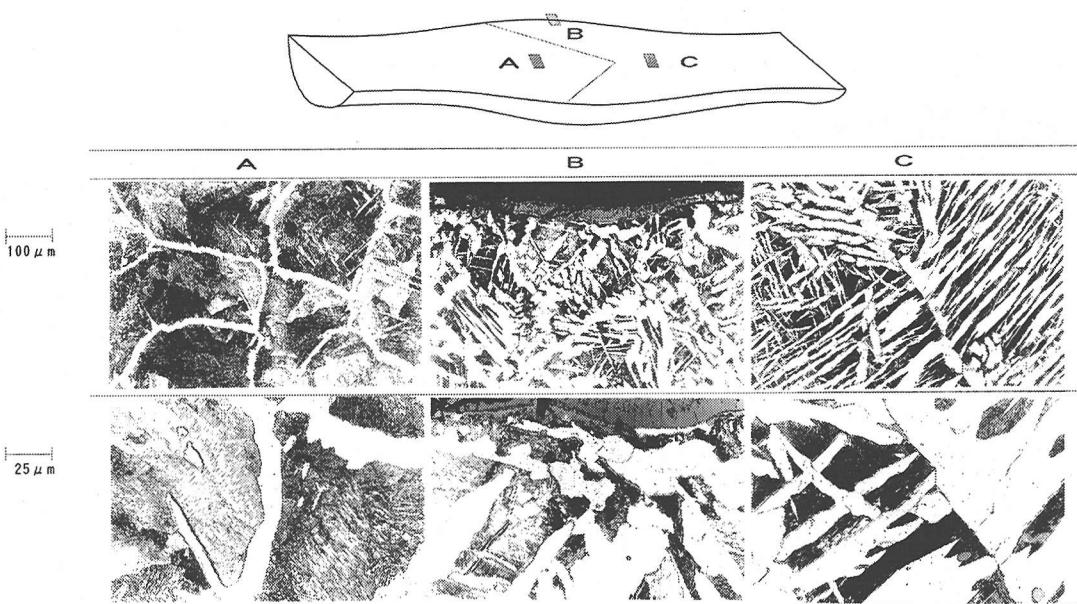


写真-5 鍛接部顕微鏡組織（5%硝酸アルコール腐食液によるエッチング後）

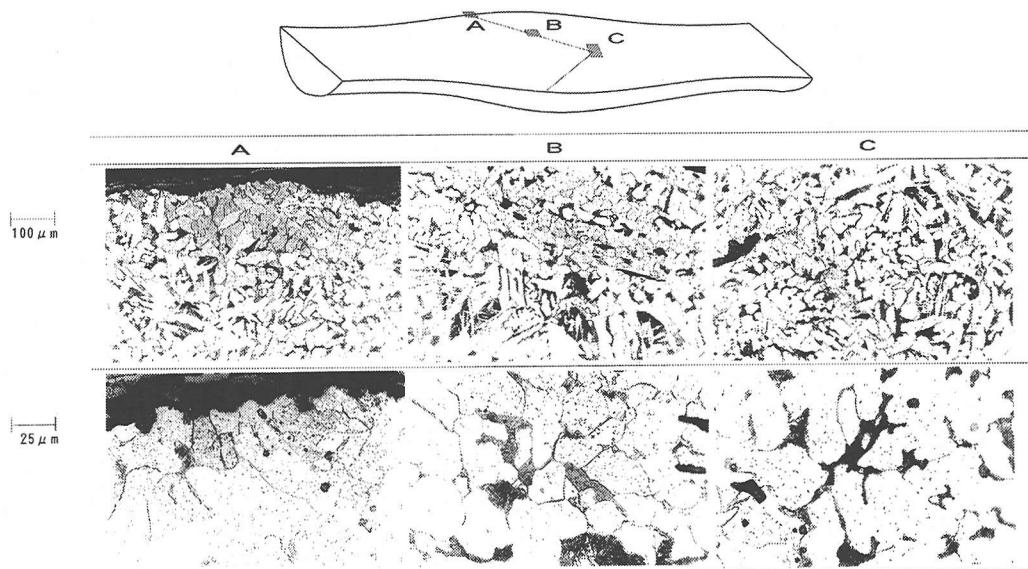


写真-6 鍛接接合部顕微鏡組織（5%硝酸アルコール腐食液によるエッチング後）

表-6 スケール組成分析(X線回折)とSEM/EPMA測定結果

		φ44mm 継手	φ44mm	φ16mm	φ19mm 腐食	備考(供給源など)
スケール組成比(%)	FeO	13.4	21.4	39.4	6.4	スケールの成分 錆の成分
	Fe ₃ O ₄	62.2	49.7	34.0	40.2	
	α-Fe ₂ O ₃	10.6	7.9	7.8	12.7	
	α-FeOOH	1.4	3.1	2.9	22.2	
	β-FeOOH	2.7	3.5	-	6.5	
	γ-FeOOH	-	3.0	1.2	5.0	
X線回折	CaCO ₃	9.7	11.4	3.7	7.0	コンクリート
	SiO ₂	-	-	11.0	-	コンクリート, 骨材
SEM/EPMA	Cl	-	-	-	検出	コンクリート, 外来(潮風等)
	Na	-	検出	-	検出	コンクリート
	K	-	検出	-	検出	
	Ca	検出	検出	-	検出	
	Si	検出	検出	検出	検出	コンクリート, 鉄, 外来(潮風等)

スケールはその後、更に大気に暴露されることにより錆(FeOOH)へと変化する。

表-6はX線回折によるスケール組成分析とSEM/EPMAによる組成元素の結果である。

φ44mm筋のスケールにはFe₃O₄が多く、継手部にはγ-FeOOHの検出がない。

φ16mm筋は他サイズに比し、FeOが多く、β-FeOOHが検出されていない。

φ16mm筋とφ44mm筋ではスケール中のFeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄組成比が大きく異なっており、圧延時かなり異なる熱履歴を受けたことがうかがわれる。φ44mm筋はゆっくりと冷却されたため、FeO=21.4%, Fe₃O₄=49.7%とFeOからFe₃O₄への分解が進んだのに対し、φ16mm筋は急冷されたため、FeO=39.4%, Fe₃O₄=34.0%とFeOの分解生成が抑制されたことがうかがえる。また鍛接φ44mm筋はFeO=13.4%, Fe₃O₄=62.2%と、鍛接により、φ44mm筋が更に大きな熱影響を受けたことを示している。

コンクリート中にあったφ44mm筋、φ16mm筋の場合、鉄筋腐食はあまり進行していないため、腐食の進行に伴い生成するFeOOHの量は少ない。

鉄筋は密閉気のpHにより腐食生成物の割合が変化する⁸⁾。pH>12でα-FeOOHが生成される割合が高く、pH=7~8程度でγ-FeOOH+α-FeOOHの割合が高くなる。φ19mm腐食筋のγ-FeOOHの割合が高いことはコンクリート中にあり、高いアルカリ性が保たれていたφ44mm筋とφ16mm筋とは異なり、豆板部で、中性化が進んだ密閉気中にあったこと証明している。

十勝大橋は内陸にあり融冰剤散布の記録もないにもかかわらず、φ19mm腐食筋の腐食生成物のSEM/EPMA検査で、Clが検出されている。またClの作用を受けた時生成すると言われるβ-FeOOH量も多くなっている。

β-FeOOHは量は少ないがφ44mm筋、鍛接したφ44mm筋にも存在することから、Clが潮風などにより外部から持ち込まれたというより、コンクリートに当初からClが混入していたとした方が自然である。コンクリートの化学分析によればコンクリート中に含まれる塩化物量は0.24~1.92kg/m³で析により含有量は異なるものの、コンクリートの深さによる差は少なかった。供用期間中、コンクリート中にあったφ44mm筋の場合、Cl濃度に大きな変化はなかったが、φ19mm筋の場合、乾燥により、鉄筋表面でClの濃縮が行われたものと考える。φ19mm腐食筋にはα-Fe₂O₃とβ-FeOOHが多い。Clの存在でα-Fe₂O₃、β-FeOOHが多く、γ-FeOOHが少なくなるという現象と露出鉄筋では、γ-FeOOHが発生するという現象が相乗した結果となっている。

5. 結論

調査の結果、次のことが明らかとなった。

(1) 鉄筋の材質

- ① 単位質量は当時のJES 24号規格に対し一部規格値に達しないものもあるが、組値は全て満足していた。現在の鉄筋とほぼ同等のレベルにある。
- ② 各径の鉄筋とも引張強度は満足すべき品質を有しているが、φ44mm筋のバラツキが大きかった。製造時の品質管理に行き届かないところがあり(冷却速度変動など)、断面内に偏析などが多く生じたためと考えられる。
- ③ 鉄筋の材質はJES 20号規格を満足している。降伏点は現在の電炉材に比べ、バラツキが大きい。当時のJESで規格化されていないことから、引張強度に比べ降伏点が重視されなかつたためと考えられる。

- ④ 鉄筋径が太くなるほど化学成分により調整され、炭素または炭素等量が大きくなっている。
- ⑤ 化学成分から、 $\phi 44\text{mm}$, $\phi 38\text{mm}$ はリムド鋼、 $\phi 28\text{mm}$ 以下の細径鉄筋はキルト鋼の造塊法で製造されていた。
- ⑥ $\phi 44\text{mm}$ 筋は鍛接されることを前提として、化学成分の調整がされていたものと推定される。

(2) 鍛接継手

- ① 引張試験は全て母材で切断し、継手部は全強を有していた。
- ② 曲げ試験では健全、割れ、折損が発生した。
- ③ 炭素量がほぼ等しい鉄筋を繋ぐ場合、良好な鍛接が行われ、炭素量が異なる場合、継ぎ手形状が明瞭に認められるようになり、曲げ試験で折損することが多かった。炭素量が異なる場合、鍛接可能温度の範囲が狭くなるためと考える。
- ④ 鍛接部では冷却に長時間要したため、一部粗な組織が存在した。

(3) 腐食

- ① コンクリートの豆板部に配置され、建設当初から露出していた鉄筋の腐食断面積減少率は 2.6%（約 0.5mdd）であった。
- ② スケールの腐食生成物に鉄筋製造時の熱履歴の差が認められた。
- ③ 腐食生成物として $\beta-\text{FeOOH}$ があり、コンクリート中に塩素が存在していることが認められる。

謝辞：本文は十勝大橋技術委員会（委員長 北海道大学 大学院 佐伯 昇教授）がコンクリート構造物の長期性状を把握するために行った試験調査のうち、鉄筋に関する事項をまとめたものである。本論文作成にあたり、貴重なご意見、ご助言をいただいた北海道大学大学院工学研究科材料物性工学講座教授工藤晶行博士、ノーステクノリサーチ（株）開発部次長 坂口 智氏に対し、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 横道英雄：河西橋に関する報告及び研究
その1河西橋工事概要、土木学会誌第28卷第7号、pp.599-631、1942.7.
- その2 鉄筋の鍛接継手に就いて、土木学会誌第28卷第8号、pp.707-717、1942.8.
- その3 橋体施工状況の概要と仮橋用木造構架に就いて、土木学会誌第29卷第2号、pp.141-150、1943.2.
- その4 使用木材の強度、型枠並びに支保工に就いて、土木学会誌第29卷第7号、pp.503-529、1943.7.
- その5 アーチ式支保工に就いて、土木試験所報告第3号、pp.1-19、1948.3.
- その6 鉄筋工及び橋体コンクリート施工法に就いて、土木試験所報告第3号、pp.20-44、1948.3.
- その7 コンクリート・ロッカーに関する理論的並実験的研究、土木試験所報告第4号、pp.1-48、1948.4.
- 2) 青木義次：鉄筋の強度と断面のバラツキ、セメントコンクリート第384号、pp.22-29、1970.2.
- 3) 太田利隆：コンクリート橋の健全度に関する研究、開発上木研究所報告第99号、1993.3.
- 4) 岩本武男、太田利隆、今井益隆：稚内港ドーム（北瀬岸防波庇）の解体調査、第22回北海道開発局技術研究発表会論文集、pp.933-940、1979.2.
- 5) 普通鋼電炉工業会：電炉鉄筋棒鋼品質調査報告、1997.2.
- 6) 材料研究会：工業材料便覧（金属）、常磐書房、1937.12.
- 7) 大西弘之、太田利隆、松尾徹郎、中館真：RC橋の耐荷力調査について、第19回北海道開発局技術研究発表会論文集、pp.413-417、1976.2.
- 8) 永山政一：鉄の腐食と腐食生成物、防錆技術、Vol.17, No.12, pp.26-36、1968.12.

(2000.5.1 受付)

AN INVESTIGATION ON REINFORCING STEELS AND FORGING JOINTS IN A 56-YEAR-OLD REINFORCED CONCRETE BRIDGE

Moriaki KUMAGAI, Toshitaka OHTA, Noboru SAEKI and Toshihiko HOSHI

When Tokachi-ohhashi bridge was demolished in 1996, material tests were carried out on the reinforcing steels and forging joints. It became clear that the chemical content of reinforcing steels had been adjusted for optimum strength and forging. While the tensile strength of the reinforcing steel of 44mm in diameter measured up to JES No.24, broad variations were recorded. The standard deviation of tensile strength for reinforcing steel of 38mm or less in diameter was found to be almost the same as that of present reinforcing steel. However, the standard deviation of yield strength was considerably larger than that of present reinforcing steel as yield strength had not been standardized at the time of construction. The forging joints displayed full tensile strength.