

(38) 鋼板接着したコンクリート桁の補強効果と耐久性について

北海道開発局土木試験所 ○大橋 猛
北海道大学工学部 佐伯 昇
北海道開発局土木試験所 根本 任宏

1. まえがき

既設コンクリート橋の補修補強工法として、鋼板接着工法が多く用いられているが、その補修補強効果については、対象となるコンクリート橋の形状、劣化状況ならびに自然環境、補強鋼板の材質、接着剤の品質および施工の良否などが複雑に関係するため、適確に評価することには難しい側面がある。また、鋼板接着がコンクリート中の鉄筋の腐食挙動に与える影響についても不明な点がある。本文は、鋼板接着により補強した既設RC橋の主桁の静的載荷試験と疲労試験の結果¹⁾、同じくPC模型桁の静的載荷試験の結果、および鋼板接着したコンクリート中の鉄筋腐食のモデル実験の結果を報告するとともに、鋼板接着したコンクリート桁の補強効果と耐久性について検討したものである。

2. 既設RC橋の静的載荷試験と疲労試験

2.1 試験対象

本試験の対象は、一般国道228号函館市に架かる、橋長44mの4径間単純RCT桁の新久根別橋である。本橋は昭和27年度に完成したもので、昭和14年制定の旧示方書の1等橋13t荷重で設計したものと思われる。その後、交通荷重の増大および凍害や塩害を受け、床版と主桁コンクリートのひびわれ、剥落、鉄筋腐食など耐荷力の不足が目立つようになったため、昭和53年度にひびわれ個所にエポキシ樹脂を注入するとともに、床版と主桁に鋼板を接着して補修補強を行った。昭和59年度、道路拡幅のため架換られることになり、その際に主桁の静的載荷試験と疲労試験を行った。図-1に新久根別橋の概要と試験桁を示す。

2.2 試験方法

試験桁は図-2に示す形状で切り出し、図-3のように載荷した。静的載荷試験は5tきざみで各種測定を行った。疲労試験は1、2、5千回、1、2、5、10、20、50、100、200万回の各繰返し回数毎に、載荷を停止して測定した。

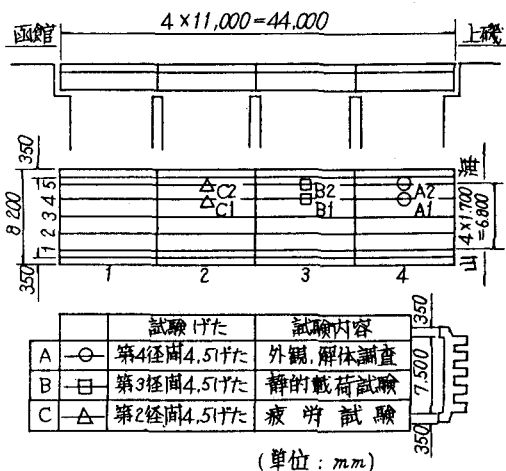


図-1 新久根別橋の概要と試験桁

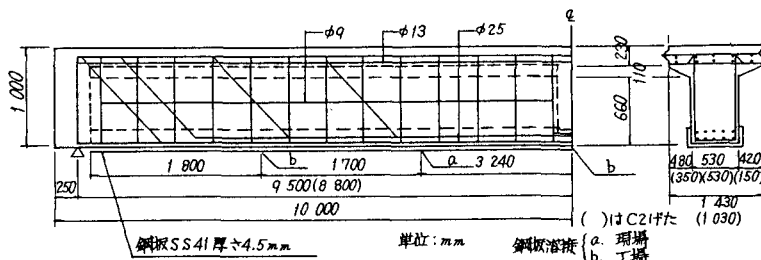


図-2 試験桁の寸法と配筋

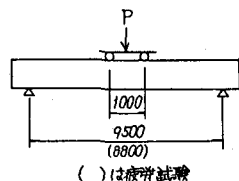


図-3 載荷位置

2.3 試験結果

材料の強度試験結果を表-1に、静的载荷と疲労試験の結果を表-2にそれぞれ示す。材料試験の結果から、鉄筋はS R 24 相当のものを使用したと思われる。外観調査と解体調査から、海側の耳桁の方が中桁に比べ、ひびわれ、鉄筋腐食とも進行していた。

(A) 静的载荷試験結果

静的载荷試験では、B 1、B 2 桁とも鋼板が降伏した後、たわみが急激に増大し、スパン中央部の鋼板の破断により最終的に破壊した。破壊荷重は鋼板を同量の鉄筋増とみなして計算した曲げ耐力81.7tにほぼ等しかった。

(B) 疲労試験結果

疲労試験はまずC 1 桁について行い、上限荷重を現行示方書のL 荷重相当の13.2tとして200万回まで繰返したが、破壊しなかったために、以後鋼板応力度が3倍となるように上限荷重を57.08tとして継続した。なお、C 2 桁は初めから上限荷重を57.08tとして载荷した。

C 1 桁は当初の载荷荷重では、鋼板応力度が300~647 kgf/cm²であり、繰返し载荷前に生じたたわみ、鋼板のひずみおよびコンクリートのひびわれは、200万回繰返し後もほとんど増加しなかった。その後、荷重を上げてからはコンクリートに斜めひびわれが発達し、繰返し220.7万回でスパン中央から1.6mの位置にある鋼板の現場溶接部が疲労により破断した後、脆性的に桁のせん断破壊を生じた。一方、C 2 桁はC 1 桁よりも劣化が進んでいたこともあり図-4に示すように、桁のたわみ、鋼板ひずみともC 1 桁に比べ著しく大きかった。最終的には、繰返し1.9万回でスパン中央部の鋼板が破断し急激に破壊した。試験終了後、解体して調べた結果、破断した部分は工場溶接した個所であった。

疲労試験で2桁とも鋼板溶接部が破断して破壊に至ったことから、試験終了後、鋼板溶接部についてX線透過試験、表面の浸透探傷試験、引張試験を行った。図-4に示すように、溶接部のほとんど全体にわたり溶け込み不足などの欠陥が認められた。また、疲労試験で破断した個所の溶け込み量は全厚4.5mmのうち2~3mmしかなく、応力集中を受けやすい状態にあったと思われる。

2.4 まとめ

(A) 鋼板補強したRC桁の静的破壊荷重は、鋼板を同量の鉄筋とみなしたときの曲げ破壊耐力にほぼ等しかった。

表-1 材料試験結果

特 性 値	C 1 桁	C 2 桁
コンクリート圧縮強度(kgf/cm ²)	246	141
コンクリート弾性係数(%)	8.1×10 ⁻⁴	5.0×10 ⁻⁴
鉄 筋 降 伏 点(kgf/mm ²)	24.6	
鉄 筋 引 張 強 度(%)	34.6	
鉄 板 降 伏 点(%)	31.8	
鋼 板 引 張 強 度(%)	44.3	

鋼板はSS41

表-2 試験結果一覧

試験体番号	繰返し静的 载荷の区別	鋼板の応力度	繰返し数	繰返し荷重	破壊荷重	破壊形状その他
B 1	静的荷重	—	—	—	80.6t 以上	鋼板降伏・中央部分で破断
B 2	〃	—	—	—	80t 以上	〃
C 1	繰返し荷重	300 ~ 647kgf/cm ²	200 万回	1.4 ~ 13.2 ton	—	破断せず、以後荷重を上げて継続
C 1	〃	899 ~ 1938kgf/cm ²	220 万 7467 回	21.74 ~ 57.08ton	—	鋼板溶接部部分が破断
C 2	〃	1023 ~ 2208kgf/cm ²	1 万 8933 回	〃	—	鋼板が中央で破断

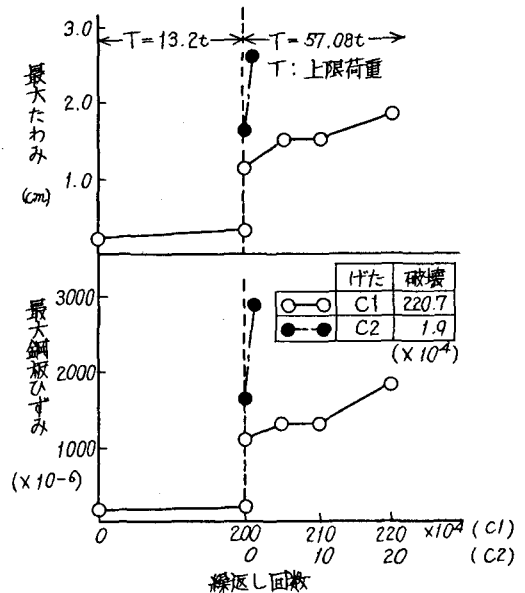


図-4 繰返し载荷時の桁のたわみと鋼板ひずみ

(B) 鋼板補強したRC桁において、繰返し載荷時の鋼板応力度が700 kgf/cm²程度以下であれば、ひびわれ、たわみ等は200万回繰返し後もほとんど増加しなかった。

(C) 鋼板補強したRC桁の疲労耐力については、鋼板溶接部の施工良否が大きく影響することがわかった。

3. PC桁載荷試験

3.1 試験の概要

試験は、桁断面および鋼板接着による補強の種類の異なるポストテンションPC桁(表-3)について、図-5に示すような静的載荷を行い、ひびわれ、たわみ、ひずみ等を測定し、補強効果やその他の性状を調べることとした。

3.2 試験桁の製作

PC桁は、桁長3.4m(支間3.0m)、高さ0.4mで、図-6に示すような長方形(B桁)とT形(S桁)の2種類の断面形とした。コンクリート強度は450 kgf/cm²とし、図-7のように、スターラップは20cm間隔で、PC鋼棒は曲げ上げて配置した。

鋼板の接着は、プレストレスを導入し、シーす内のグラウトが硬化した後、図-8に示す位置に行った。曲げ補強では桁底面に厚さ6.0mmの鋼板を、せん断補強では桁側面に高さ27cm、厚さ4.5mmの鋼板をホールインアンカ(φ10)を併用し、グラウト厚さを5mmとして注入法により行った。鋼板の材質はSS-41で、ショ-ボンド製のシール材(101#)とグラウトを使用した。

試験に用いた鋼材の性質を表-4に示す。なお、PC桁には初期ひびわれを導入していない。

表-3 試験桁の種類

桁番号	補強の種類
B-1	—
B-2	曲 げ
B-3	曲 げ+せん断
S-1	—
S-2	曲 げ
S-3	せん断
S-4	曲 げ+せん断
S-5	せん断

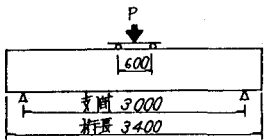


図-5 載荷位置

表-4 鋼材の性質

種 類	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	備 考
PC鋼棒 A種1号	93	108	2.04	B桁φ32
PC鋼棒 C種1号	122	137	2.04	S桁φ32
鉄筋 D10	37	53	2.10	SD30
鉄筋 D13	37	53	2.10	SD30
鉄筋 D19	34	53	2.10	SD30
鋼板 4.5	29	45	2.10	SS41
鋼板 6.0	33	44	2.10	SS41

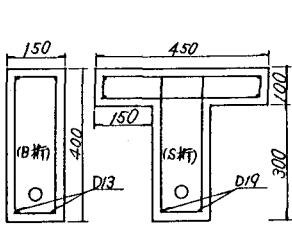


図-6 桁断面図

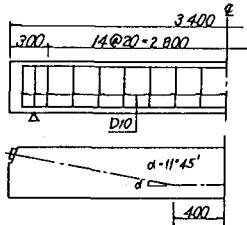


図-7 配筋図

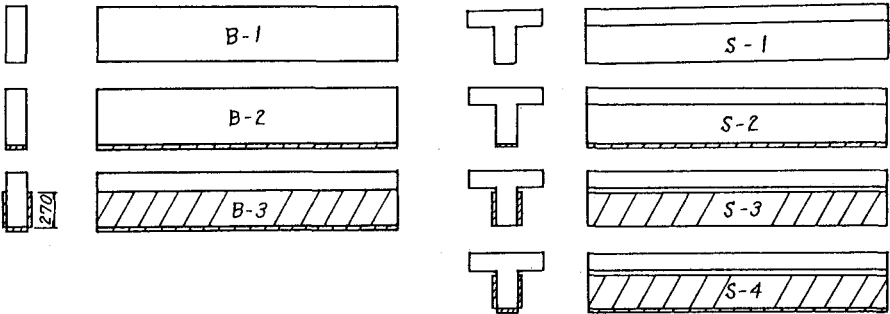


図-8 鋼板接着位置

3.3 試験結果と考察

表-5に試験結果を示す。

(A) ひびわれおよび破壊性状

試験桁は全桁とも圧縮部のコンクリートの圧壊により曲げ破壊した。

鋼板を桁底面に接着した場合(B-2、S-2)の桁側面のコンクリートのひびわれは無補強桁に比べ、荷重が増加してもひびわれ幅は小さいが、その数は多くなる傾向にあった。また、図-9に示すように、スパン $\frac{1}{4}$ 付近の斜めひびわれから鋼板の剥離が生じ、その両方が発達し、コンクリートの圧壊により破壊した。同様に、桁側面に接着したS-3も無補強桁に比べ桁底面のひびわれ数が多い結果となった。なお、補強桁のひびわれ発生荷重は無補強桁の約2倍程度となった(表-5)。

(B) 鋼板剥離とひずみ性状

鋼板は接着位置によっても異なるが、その応力度が $22 \sim 32 \text{ kgf/mm}^2$ 程度に達したときに、スパン $\frac{1}{4}$ 付近で剥離する傾向にあった(表-5)。また、S桁において、接着が健全なときにはスターラップに応力はほとんど作用しないが、桁側面に接着した場合特に、鋼板剥離後急激に、スターラップの応力が増加した(図-10)。

(C) 鋼板接着による補強効果

鋼板接着による補強効果は、表-5に示すように、曲げ補強では20%、せん断補強では31%、その両補強では47~68%程度耐荷力が増加した。

破壊荷重の実測値と、表-4の値を用い、鋼板を軸方向鉄筋の一部とみなして計算した値^{2),3)}を比較すると(表-5)、B桁ではいずれも、ほぼ同様の値が得られた。また、S桁ではS-1、S-2はせん断破壊の計算値より37~38%高く、曲げ破壊の計算値より10~12%低い荷重で破壊した。S-3、S-4は、桁側面に鋼板接着をしているため、せん断破壊の計算値は非常に大きくなり、曲げ破壊したが、曲げ破壊の計算値に比べても24~26%低い結果となった。

鋼板接着をする場合には、曲げとせん断の補強分担を十分考慮する必要があると思われる。

3.4 ま と め

(A) PC桁に鋼板接着をした場合、ひびわれ発生荷重は約2倍となり、一方、ひびわれ数は多くなる傾向にあった。

(B) 鋼板の応力が $22 \sim 32 \text{ kgf/mm}^2$ 程度に達すると、剥離の傾向にあった。

(C) せん断補強の場合の耐力算定は今後の検討課題である。

4. 鋼板接着によるコンクリート中の鉄筋の防食挙動

4.1 接着板のない場合の鉄筋の腐食

接着板のない普通の場合における鉄筋の腐食について、図-11に示すような両引き試験用供試体を用いて塩分含有による発錆挙動を実験により調べた。これにより、接着板による防食効果および補修時のコンクリート表層の塩分浸透を除去するためのハツリ深さに

表-5 試験結果

桁番号	破 壊 荷 重				鋼 板 の 剥 離		ひびわれ発生荷重(t)
	計 算 値 P(t)	実 測 値 T(t)	耐 荷 力 (%)	T/P(%)	荷 重 (t)	鋼板応力度 (kgf/mm ²)	
B-1	32.4	28.9	100	89	—	—	5.0
B-2	37.5	34.5	120	92	28.0	26	12.0
B-3	46.5	48.3	168	104	—	—	—
S-1	58.2 (37.2)	51.0	100	88	—	—	6.5
S-2	69.6 (45.0)	62.6	123	90	35.0	22	12.0
S-3	87.8 (196.8)	66.6	131	76	50.0	32	—
S-4	100.9 (211.8)	75.0	147	74	60.0	26	—

注) () はせん断破壊の場合

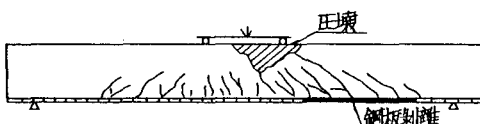


図-9 破壊例(B-2)

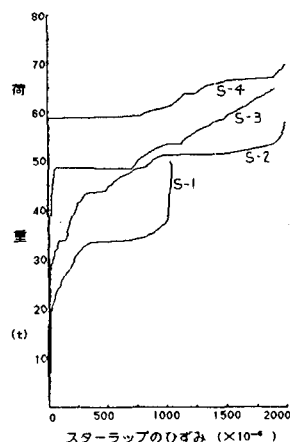


図-10 スターラップのひずみ

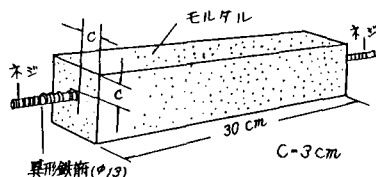


図-11 供試体

ついて検討した。

(A) 材料および配合

使用材料は普通セメント、鶴川海岸砂（比重 2.69、吸水率 1.42%、塩分量 NaCl で 0.04%）、静内川砂利（比重 2.77、吸水率 1.19%）を用い、配合は水セメント比 45、50 および 60% の 3 種で、練り混ぜ時に NaCl をセメント重量に対して 0、0.1、0.2、0.35、0.5 および 1% 混入した。コンクリートは目標スランプ 8 cm、空気量 5% の AE コンクリートとした。

(B) 実験方法

実験方法は黒皮を除いた異形鉄筋（D13）を用い、かぶりは 3 cm として、図-11 に示す寸法の供試体を用いた。水中養生を材令 28 日まで行った後、フレーム内に固定して両引き載荷を行って鉄筋応力を 0、1000、2000 kgf/cm^2 （ひびわれ幅 0~0.35mm）の 3 種類変化させた。その後、腐食促進室（室温 25℃、湿度 80~90%）に一週間放置した。腐食量の測定は促進試験後、コンクリートを割裂し、鉄筋を取り出して、メンディングテープを貼って腐食部分を写し、腐食面積を測定した。測定対象の全面積に対する腐食面積の割合を腐食率として表示した。

(C) 実験結果および考察

図-12 は実験結果を示したもので縦軸は腐食率、横軸はセメント重量（C）に対する Cl^- 量で表示した。 Cl^- 量は練り混ぜ時に混入させた NaCl の他に水、セメント、砂、砂利および混和剤によって入るものが 0.09%（ Cl^-/C ）含まれており、これを加えたものである。腐食率は水セメント比、ひびわれ幅によってあまり変わらない性状を示した。 Cl^-/C が 0.2% 以下では発錆は起こらず、0.3% になると発錆が起こっている。これより発錆の限界値は Cl^-/C でほぼ 0.2% と考えられる。単位セメント

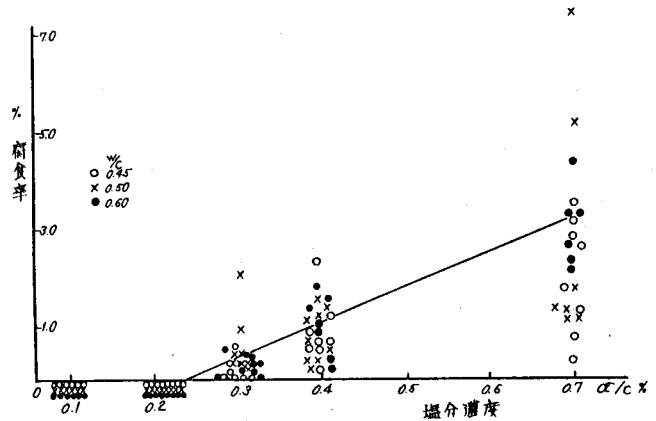


図-12 塩分濃度と腐食率

量が 300 kg/m^3 の場合、コンクリート 1 m^3 当り 0.6 kg の Cl^- 量ということになる。補修を行う場合、この程度の塩分が浸透しているコンクリート表層部を除去することが必要である。ただし Cl^-/C が 0.2% は練り混ぜ時の値であり、実際の硬化コンクリート中では Cl^- が固定される量があり、測定方法にもよるが硬化コンクリートから試料を採取して、滴定法で試験すると実際に混入した量の半分程度が検出されるという測定結果⁴⁾もある。硬化コンクリートから塩分量を測定した場合 Cl^-/C の限界値を下げる必要がある。スウェーデン⁵⁾では塩分が浸透していてコンクリートを除去する場合、0.13%（ Cl^-/C ）を基準として除去し、補修している。

4.2 接着板のある場合の鉄筋の腐食

図-13 に示すような桁を用いて接着板による腐食挙動について検討した。

(A) 材料および配合

4.1 の場合と同じ材料を用い、配合は水セメント比 50% の一種で、混入した NaCl の量はセメント重量に対して 0、0.2、0.4、1.0 および 2.0% である。目標スランプ 8 cm、空気量 5%、目標強度 $\sigma_{28} = 320 \text{ kgf/cm}^2$ の AE コンクリートとした。

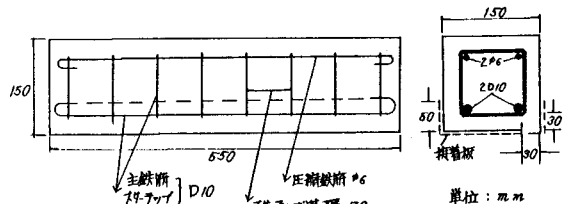


図-13 供試体寸法・配筋図

(B) 実験方法

供試体を湿潤養生し、材令28日で3等分点載荷による曲げ荷重（主鉄筋応力約3000kgf/cm²）をかけ、最大曲げひびわれ幅0.05～0.08mmを生じさせた後、除荷し残留ひびわれ幅0.025～0.03mmの状態とした。その後ただちに主鉄筋側の側面－底面に接着板（ボンデー鋼板あるいはトタン板）をショーボンドで張り付け、1日室内に放置した後、前述した腐食促進室にセットした。3週間放置した後、曲げ載荷して破壊し、鉄筋を取りだし、圧縮鉄筋と引張鉄筋の腐食面積の測定を行った。

(C) 実験結果および考察

図-14は接着板がある場合の鉄筋の腐食率を示したものである。横軸のCl⁻量は練り混ぜ時に混入したNaClによるものの他に水、セメント、砂、砂利、混和剤から入ってきたもの（0.09%Cl⁻/C）を加えたものである。接着板によって保護されていない圧縮鉄筋は塩分の増加に伴って腐食率も大きくなっておりCl⁻/C量が0.2%程度になると腐食はほとんど発生していない。これは4.1で述べた接着板がない場合と同じ結果となっている。一方接着板に囲まれている引張鉄筋の錆の程度は小さく、コンクリート中の塩分濃度に関係なく、約1%程度の腐食率を示している。この実験では比較的短い期間での促進試験であり、長期の実験においては塩分量による腐食率の差が出てくる可能性はあるが、この試験条件下では接着板による防食効果は大きいことが認められた。

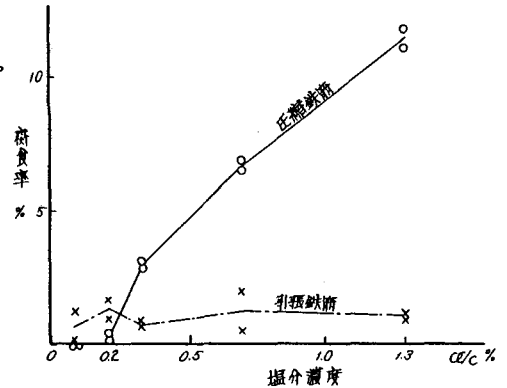


図-14 引張鉄筋および圧縮鉄筋の腐食率

4.3 まとめ

(A) コンクリート中にセメント重量に対して塩分（Cl⁻）が0.2%程度含まれると鉄筋は発錆するので、補修の際にこの程度の塩分濃度を含んでいるコンクリートはハツリ除去することが必要である。ただしこの0.2%濃度は練り混ぜ時における値であり、硬化コンクリートから塩分濃度を測定する場合、この値より小さな値となるので、これを考慮して0.2%（Cl⁻/C）より小さな値を基準としてハツリ深さを決める必要がある。

(B) 接着板による鉄筋の防食効果は大きいことが認められたが、この促進試験は比較的期間が短いことから、さらに長期的な試験によって有効性を確認する必要がある。

参考文献

- 1) 大橋ほか：鋼板接着により補強した既設RC橋の耐久性について、土木試験所月報 No.389、1985.10
- 2) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針（案）、コンクリートライブラリー第52号、1983.11
- 3) 日本道路協会：コンクリート道路橋設計便覧、昭和60年10月
- 4) 佐伯ほか：コンクリート中の塩分による鉄筋の発錆について、土木学会第40回年次学術講演会概要集V、1985、PP121～122
- 5) 北海道開発技術センター：北方圏諸国におけるコンクリート構造物の補修の現状と維持管理技術、1985.3