

PC 構造物の品質向上施策と施工管理

— 鉄道橋を中心に —

野澤 伸一郎*

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC という）構造物の施工管理は設計図どおりに構造物を建設するために施工を管理することであり、安全管理や工程管理も含まれると考えられるが、今回は、所定の品質が確保できるように管理することに限定する。その施工管理は設計や施工後の維持管理と関わることが多いため、設計や維持管理についても触れながら品質向上に向けた施工管理を中心とする内容としたい。緊張管理やグラウト注入などPC 構造特有の品質向上施策および施工管理と、コンクリート構造として鉄筋コンクリート構造物と共通の内容について、東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR 東日本という）で採用している鉄道橋に対する実施例を中心に紹介する。その後、今後の品質向上施策と施工管理に関しては私見を述べたい。

2. PC 構造としての品質向上施策と施工管理

2.1 ケーブルおよび鋼棒破断対策

PC 構造物の耐久性に及ぼす影響として、まず、鋼材の腐食が考えられる。写真 - 1 は横締め用の PC 鋼棒が破断し、



写真 - 1 横締め用 PC 鋼棒の破断・拔出し状況

側面から抜け出た状況である。当該箇所の補修と類似箇所の調査は終了している。破断にいたる鋼棒または鋼材の腐食の原因は、一般にグラウト未充てん、グラウト施工不良、端部からの雨水等の浸入が考えられる。

これまでの現場における施工管理では、グラウト未充てんや充てん不足がとくに心配であった。グラウトによる防食は完全ではない場合があったが、施工性やコストからグラウトによる防食が選ばれてきた。これに対して海外を含めて高粘性型ノンブリーディンググラウトおよび低粘性型ノンブリーディンググラウトが開発され、施工時にはグラウト流量計による注入量のチェックや空隙率の確保などがなされている^{1,2)}。

JR 東日本においては 2001 年より横締め等に用いる PC 鋼材やシングルストランドにはプレグラウト PC 鋼材または被覆 PC 鋼材を用いている。

2008 年より、主ケーブルの PC 鋼材の防錆対策としては、

- ・プラスチックへのシース材料の変更
- ・樹脂被覆 PC 鋼より線の適用

を実施することにした。シースを絶縁材であるプラスチック製シースとすることで、PC 鋼材の防錆を高め、グラウトと合わせた二重防錆を実施することとした（図 - 1）。



図 - 1 PC 鋼より線の防錆対策

加えて、プレキャストブロック工法やプレキャスト T 形桁等のようにコンクリートを一体に施工せず、PC 鋼より線を緊張することにより一体化を図る場合には、ブロックの継目等から浸水する危険性があるため、プラスチック製シースによる対策に加え、PC 鋼材に樹脂被覆 PC 鋼材を用いることにより、防錆効果を高めることとした（図 - 2）。

さらに、グラウト充てん忘れを防止するために、PC 鋼より線を束ねたマルチケーブルを使用する場合、図 - 3 に示すグラウトキャップを使用することとした。JR 東日本の土木工事標準仕様書においては、「グラウトキャップを取り外し、グラウトされていることを確認する。」と定めている。写真 - 2 にグラウトキャップ取外し後の状況を示す。



* Shinichiro NOZAWA

東日本旅客鉄道(株)
構造技術センター 次長

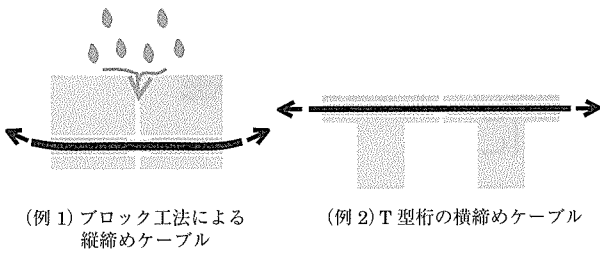


図 - 2 樹脂被覆 PC 鋼より線適用箇所イメージ

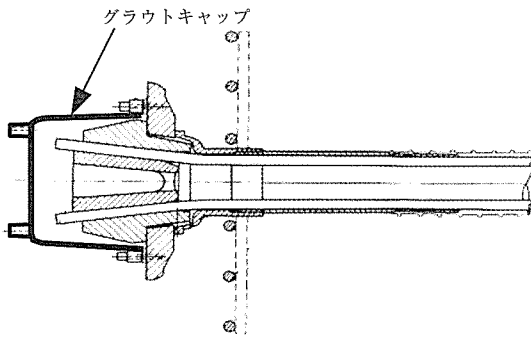


図 - 3 グラウトキャップ



写真 - 2 グラウトキャップ取外し後の状況

なお、プレグラウト PC 鋼材を使用する場合も、セメント系プレグラウト鋼材を使用することを原則とした。これは、樹脂系と比べて環境に優しく、安価であるためである。ただし、工場でのグラウト材製造日から、夏季は 30 日、それ以外は 60 日以内に現場での緊張を終えることが可能である場合とした。

このほか、設計段階での考慮となるが、主ケーブルの上縁定着については、後埋め材と本体コンクリートとの付着が完全でないために、雨水の浸透しやすい構造となり、PC 鋼材やシース管の腐食に至ることとなるため、原則として主ケーブルの上縁定着は行わないことにしている。また、PC 下路桁のウェブの鉛直締めは行わないこととして設計を行ってきたが、再度 PC 下路桁や箱桁のウェブにおける主ケーブルの定着位置を注意し、上縁定着が無いようにしている。

ちなみに、過去に施工された上縁定着などの PC 鋼材が破断する可能性のある箇所には、図 - 4 に示すように定着部に鋼板・繊維シートを貼り付け、破断時に変状が確認できるようにして補修している。

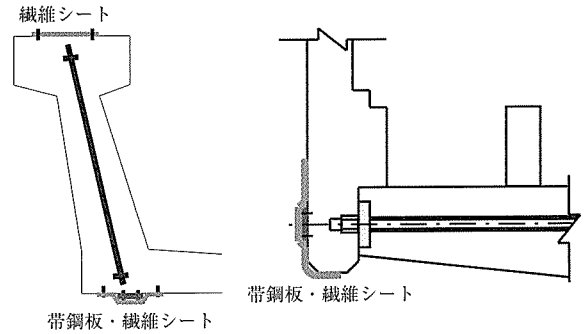


図 - 4 上縁定着等の補修断面図

2.2 上げ越し量の管理

PC 桁では、死荷重クリープに加え、プレストレスによるクリープを考慮して桁の高さを管理する。鉄道、とくに新幹線においては車両走行の安定性を保つために上下方向の軌道変位を少なくすることが望まれる。

過去の PC 桁では、新幹線開業後もクリープが進行し、単純桁では桁が反り上がり（桁の中央部が高くなり）、軌道整備を余儀なくされた場合もある。最近では、PRC 構造を採用することにより、クリープによる長期変形の影響を極力小さくしている。

一般に、上げ越し量は、

- ① 死荷重（桁、軌道等）
- ② プレストレス
- ③ クリープ
- ④ 乾燥収縮
- ⑤ 施工上の荷重（移動作業車等）
- ⑥ 景観

などを考慮して決定している。

図 - 5 は、PC ランガー桁である長町荒巻青葉山線 Bv（架道橋：道路を跨ぐ線路橋）の一般図であり、表 - 1 に解

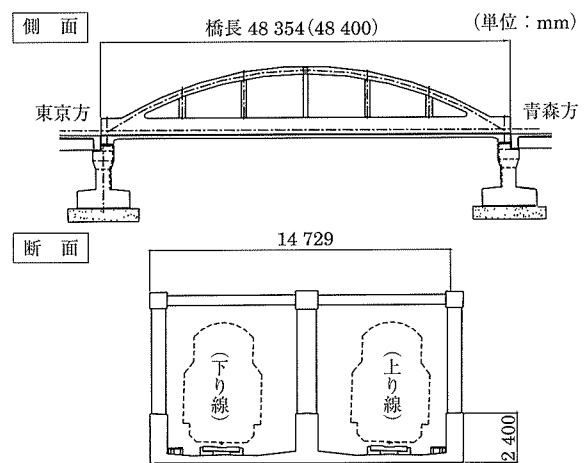


図 - 5 長町青葉山線 Bv 一般図

析に用いたコンクリートの物性値、表 - 2 に施工材齢を示す。本橋の場合、上げ越しの管理としては、計算上のクリープ変位をすべて考慮したうえで、永久荷重作用時に橋面がレベルとなるように上げ越し量を決定した³⁾。

表 - 1 コンクリートの物性 (解析)

	補剛桁	アーチ材	鉛直材
設計基準強度 (N/mm ²)	40	60	50
弾性係数 (kN/mm ²)	31	35	33

表 - 2 施工材齢

STEP	施工状況	解析	実績
0	施工開始 補剛桁コンクリート打設	0日	0日
1	構造系完成時 支保工撤去	28日	86日
2	橋面工完成時 軌道敷設	118日	320日
3	クリープ終了時	∞	∞

図 - 6 は各ステップ時の橋梁の鉛直変位について、解析値と実測値を示したものである。解析時に仮定した施工日数と実際の施工日のずれは表 - 2 のとおりである。軌道敷設後の実測値は、バラスト撒布後の測定を実施していなかったため、507 日後における桁スパンの変位量を参考までに示した。

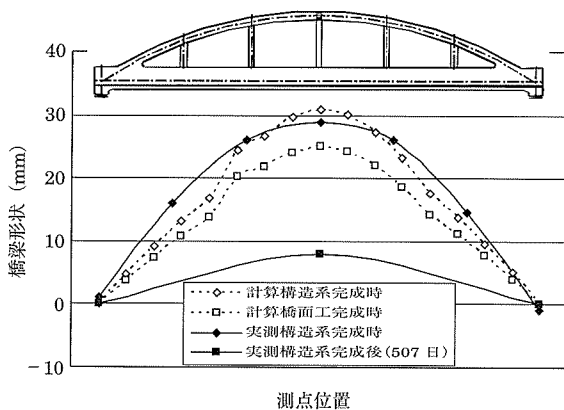


図 - 6 鉛直変位計測結果

形状が複雑な構造や吊構造、複合構造ではこの上げ越し計算が複雑で、施工後のトラブルなどによる緊張時期の変更があると、実際にあわせた上げ越し量を算定するのに手間がかかる。

さらに、鉄道改良工事において鉄道を一線一線切り替えながら用地の制約のなかで新設線を建設する場合など、すでに営業を開始している桁と一体とする形で、新設部分にプレストレスを導入することがある。この場合、PC 鋼材位置と断面図心との偏心などによりクリープによる桁の変位が鉛直方向だけでなく水平方向にも生じることになり、水平方向の検討も必要になる。

3. コンクリート構造としての品質向上施策と施工管理

3.1 単位水量と鉄筋のかぶり⁴⁾

JR 東日本では、コンクリートの耐久性に大きな影響を与える水セメント比に着目して、2001 年から新たな品質管理を行うこととした。まず、単位水量の上限値を設定し、打ち込むコンクリートの品質を確保することとした。たとえば粗骨材の最大寸法が 25 mm 以下の場合、175 kg/m³ 以下と定めた。

コンクリートの受入れ時には単位水量を試験・管理することで、コンクリートの品質管理を実施している。PC 構造も同様に、静電容量方式による単位水量測定器による試験を使用し、適用している。写真 - 3 は受入れ試験の状況である。頻度はコンクリートの打込み前に 1 回、以後 1 時間を超えるごとに 1 回実施している。承諾した配合の単位水量に 10 kg/m³ を加えた値または単位水量の上限値のうち小さい方を警告値として、これを超えた場合は原因を調査して、次の練混ぜまでに改善を図っている。一方、スランブは任意に定めてよいこととした。

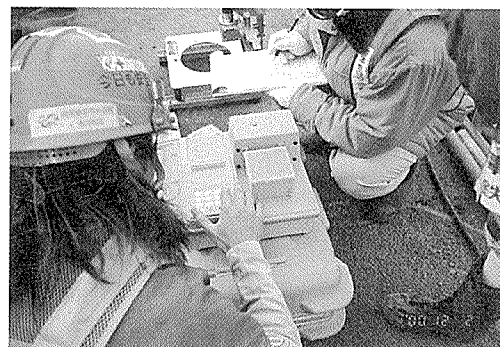


写真 - 3 コンクリート受入れ時の単位水量試験

また、検査面での取組みを充実させることで、施工会社の品質管理を発注者として期待するものとずれがないようにした。まず、施工の許容誤差・基準を明確化した。あわせて、構造物の仕上り寸法の規格値を制定した。

これらを竣工検査において確認することとした。とくに耐久性を左右する鉄筋かぶりに関しては、2001 年より竣工時に非破壊検査（電磁誘導法等）を用いて測定するようにしている。写真 - 4 は竣工検査での測定状況である。鉄筋



写真 - 4 鉄筋かぶり測定状況

のかぶりを施工中に管理することは重要であるが、コンクリート打設中にかぶり変動する可能性もあることから、最終の確認をすることとした。なお、検査項目は耐久性との関連の深い最外縁鉄筋のかぶりのみとし、検査精度を踏まえ、極端なかぶり不足を見つけ出すことに重点を置いている。非破壊検査の頻度は、1 構造物あたり 2, 3 箇所、1 箇所あたり 1 ~ 2 m² 程度を標準としている。

3.2 はく落防止対策

コンクリート片のはく落は、鉄筋のかぶり不足やコンクリートの中性化、塩害など多種多様であるが、結果として旅客、一般公衆、列車、車両等に危害を及ぼすおそれのある場合には、合成短繊維の添加によりそれを防止することとした。2004 年より PC 桁においても、設置環境がコンクリート片のはく落により危害が発生するおそれがある場合には合成短繊維を添加している。

写真 - 5 は合成短繊維の添加によるはく落防止効果を把握するために打撃試験を実施している状況である。図 - 7 に示すような 150 × 150 mm の断面に D-10 鉄筋を配置し、充てん孔に膨張材を添加してひび割れを発生させたあとに、ハンマーでたたいて合成短繊維のはく落防止効果を検査するものである。



写真 - 5 打撃試験状況

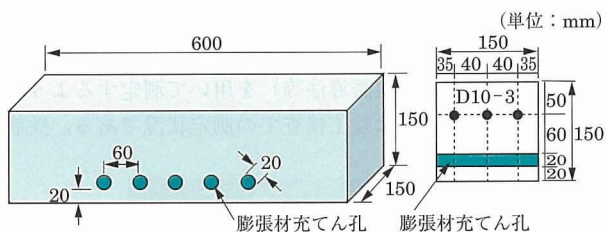


図 - 7 合成短繊維添加の効果確認試験

3.3 塩害対策

日本海側の海岸近くに建設された PC 桁はとくに塩分の影響を受ける。写真 - 6 に塩害の被害を受けた PC 桁を示す。当該箇所補修と類似箇所の調査は終了している。

建造物設計標準・コンクリート構造物⁵⁾においては、鋼材の腐食に関する検討は、ひび割れ、中性化および塩化物

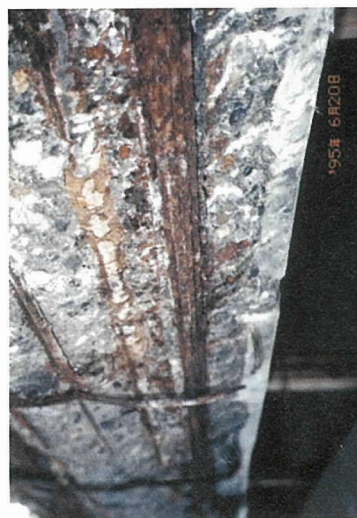


写真 - 6 塩害による PC 桁の被害

イオン等の劣化因子の影響による鋼材の腐食が発生しないことを確かめることにより行うこととしている。このため、施工管理においては、設計で定められたコンクリートの水セメント比やかぶりが適切に確保できていることを確認することが非常に重要になる。コンクリートの水セメント比やかぶりだけでは対応できない場合は、エポキシ塗装鉄筋や前述の樹脂被覆 PC 鋼より線などの使用や、飛来塩分の進入を防ぐコンクリート表面保護を施した方が、コストを下げた施工管理も容易になる場合がある。

3.4 アルカリ骨材反応抑制対策の方針

これまでコンクリート構造物におけるアルカリ骨材反応抑制対策は、主に使用骨材についてアルカリ骨材反応試験で「無害」と判定された骨材を用いることによって実施してきた。しかし、JIS 規格による判定基準で「無害」と判定された骨材を用いても、アルカリ骨材反応を生じる事例が見られ (写真 - 7)、骨材のみに依存したアルカリ骨材反応抑制対策では必ずしも抑制しきれないことが分かってきた。当該箇所の補修は終了している。



写真 - 7 アルカリ骨材反応による PC 桁の被害

そこで、今後のアルカリ骨材反応抑制対策としては、コンクリート中のアルカリ総量に応じて限定した骨材を使用する方法、限定した骨材の使用ができない場合は、抑制効果のある混合セメント等の使用を検討したいと考えている。

3.5 コンクリート打設

最近のPC構造物は、景観や従来不可能と考えられていた形状への挑戦、さらには地震力を受ける部材は考慮すべき地震による慣性力が増加したことなどから、形状が複雑となったり鉄筋やPC鋼材が増加し、結果としてコンクリート打設の難易度が高いものが増加している。複雑な形状の型枠でバイブレーターが届かない場所や、集中配置されたPC鋼材の裏側などにはコンクリート未充てんやジャンカが生じやすい。写真-8に工事で発生したジャンカの例を示す。当該箇所は耐久性を考え、作り直している。

ジャンカ防止には、設計段階での断面形状および鉄筋やPC鋼材の配置の検討が重要である。施工時は、バイブレーターが届くように型枠に窓を開けたり、写真-9に示す長尺バイブレーターを使用することもある。

さらに特殊な断面形状や締固め困難が想定される場合は、実物大の模擬型枠を作成して、実際と同じPC鋼材や鉄筋の配置のもと、コンクリート打設試験を実施している。写



写真-8 ジャンカの例

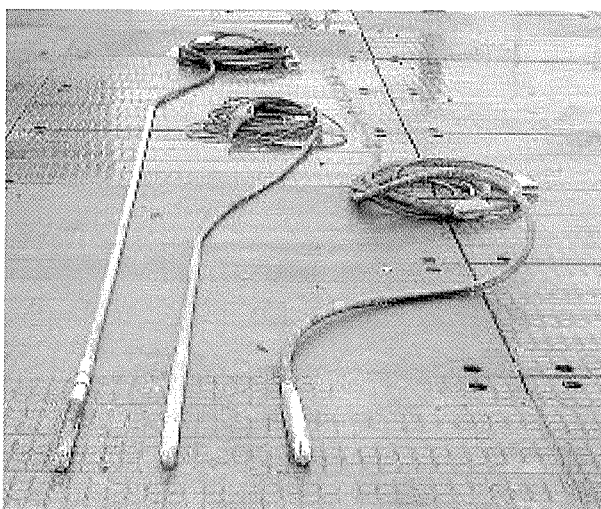


写真-9 長尺バイブレーター

真-10は試験終了後、脱枠した試験体である。今から50年以上前の第一大戸川橋梁建設時でも実施された事柄であるが、PC橋梁の重要性に鑑み、現在でも慎重な施工を目指して実物大コンクリート打設試験を実施する場合がある。写真-10で示した2008年に実施された試験においては、その結果から施工を計画した方法が妥当であることを検証できた項目とともに、一部スターラップの配筋ピッチやコンクリート打設高さ、内型枠の脱枠方法などを改善した項目も生じた。これらを踏まえて本施工に臨んだ結果、より品質の高いPC橋梁を建設することに効果があったと考えている。



写真-10 コンクリート打設試験脱枠後

3.6 その他の品質向上施策

PC構造物の耐久性向上は施工に携わる人間の情熱による場所も大きい。施工者の品質管理や監督者の検査を責任をもって実施してもらうために、2001年より図-8に示すコンクリート構造物補助標を取りつけることとしている。PC構造以外のコンクリート構造物と同様に、PC橋梁が竣工したとき、施工会社を代表した現場代理人と発注側代表である監督員の名前を構造物に残している。

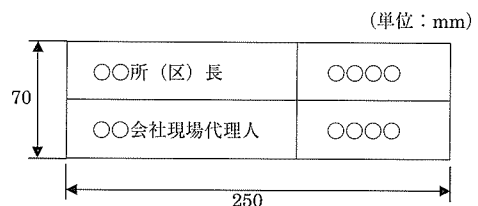


図-8 コンクリート構造物補助標

また、PC構造物の品質確保のために、とくに難易度の高い橋梁等は、施工会社に経験を有する技術者の配置と施工時の技術支援体制を義務付ける取組みも一部始めている。工事の規模や難易度に応じて経験を有する現場代理人または監理技術者を配置することは、構造物の品質を確保するためにきわめて重要と考えるためである。また、特殊な工法や材料等を用いる場合には、施工時の詳細検討について

施工会社からの技術支援が欠かせない。このため、工事契約にあたり、経験を有する現場代理人または監理技術者の配置、ならびに技術支援体制を契約条件として盛り込み、経験のある優秀な技術者に担当していただき、品質確保に努めることとした。

4. これからの品質向上施策と施工管理

PC 構造は、材料の特徴をうまく取り入れた合理的な構造である。ひび割れの制御も可能で、本来ならばメンテナンスフリーに近い構造物にできる可能性がある。

コンクリートの品質管理としては、よい物性をもった骨材が減少していることが大きな課題である。使用する骨材を用いたコンクリートに関して乾燥収縮量が事前に把握でき、アルカリ骨材反応に対しても長期の膨張予測ができることが必要である。骨材をはじめとする材料に起因するコンクリートの変化の予測ができたいうえで、施工が容易にできることが望ましい。鉄筋の本数や配置の誤り、かぶり不足、コンクリート打設時のトラブルなどを防止し、施工の信頼性をあげるためには、鉄筋や PC 鋼材の配置の簡略化をより進めたいと思う。これらは設計時の施工に対する配慮がなされているかどうかを重要と考える。

PC としては、PC 鋼材の腐食を防止するため、材料や構造を変えることで、難しい施工管理によらなくても対応できる改良が進むことを望む。上げ越し量に関しては、桁の構造が複雑になったり、複合構造の採用でますます予測計算が煩雑となるが、解析技術の向上などで対応できるのではないかと考えている。施工中のトラブルなどにより、コンクリートの打設や PC 鋼材を緊張する時期に中断があっても、すぐに変更後の工事工程にあわせた上げ越し量を計算できれば、施工管理に大いに役立つと思う。

施工時の品質管理と並んで、発注者側が実施する検査の方法も発展が期待できる。非破壊検査技術が進歩して、竣工した PC 構造物に対して、鉄筋の本数や配置、かぶり、コンクリートの品質、さらには導入プレストレス力やグラウトの状況も検査できれば品質向上に大きく貢献できると考えられる。ただし、施工後の検査で不適切な事象を発見しても、取り壊して再び建設することや補修が必要となるため、施工時の品質管理の重要性は変わらないと思われる。

一方で、PC 構造物は緊張管理やグラウト注入を各箇所を実施する必要がある構造物が多い、など施工管理に手間がかかる部分が残っていると認識している。

PC 構造がもっと使用されるためには、より簡便に施工管理できることが必要であると思う。たとえば、主ケーブルの緊張は、ケーブル配置の形状・寸法が異なることから、事前に試験緊張を行い、見かけ上の摩擦係数やヤング係数を求め、それを基に一本一本緊張管理することが多い。これを割り切って、似たケーブルは一つのグループとして、同一緊張力を設計時点で定めて施工を進めることもよいのではないかと考える。緊張力が不足しないようになど、設計での配慮と若干の安全側への統一によるロスが生じても、工程短縮には寄与できる。

施工管理が簡単な構造とすることで、人的ミスを減らし、品質も向上することが望ましい。さらに、このことで工期短縮とコスト縮減が達成でき、耐久性の高い PC 構造の適用が広がれば、環境問題を含めて社会に貢献できると考えている。

5. おわりに

変状が生じると、補修することに時間と経費がかかるなど損失が大きいことから、現在は資格試験を導入し施工に携われる人間を増やし、その他各社でもその施工を担当する社員に教育をほどこしている。当然ながら、施工段階のすべてが簡単になることは困難と思われるので、これまでどおりの施工者の情熱と施工管理、および監督者の適切な検査と対応、これらを支える教育がますます重要となる。

一方で前述したような特別な注意を払わなくても耐久性を確保できる PC 構造とすることや、簡便な施工管理への変革は、PC 構造の発展のためにも必要と考えている。この両輪を今後ともうまくかみ合わせて、後世に誇れる品質の PC 構造物を残していきたいと思う。

参考文献

- 1) 土木学会：PC 構造物の現状の問題点とその対策、コンクリート技術シリーズ 52, 2003. 6
- 2) 土木学会：PC 構造物の現状の問題点とその対策（その 2）、コンクリート技術シリーズ 70, 2006. 5
- 3) 北野雅幸、鈴木慎一、高木芳光：PRC 桁等におけるクリープを考慮した鉛直変位量の解析値と測定結果 SED, No.27, 2006. 11
- 4) 菅野貴浩：JR 東日本におけるコンクリート構造物の長寿命化への取組み、コンクリート工学 Vol.40, No.5, 2002. 6
- 5) 国土交通省鉄道局監修・鉄道構造物等設計標準・コンクリート構造物, 2004. 4

【2009 年 1 月 15 日受付】