

最新の PC 橋梁技術 — 耐久性向上への取組み —

角 昌隆*1・大城 壮司*2

1. はじめに

コンクリート構造物は社会資本を整備形成する上で主要な役割を果たしている。重要な社会資本である第二東名・名神高速道路をはじめとした高速道路橋においては、複合橋も含め、多くのコンクリート橋梁が建設されている。

一般に橋梁の耐用年数は 50 年以上といわれてきたが、近年、一部のコンクリート橋において、劣化損傷が顕在化しており、「コンクリートはメンテナンスフリーではない」という認識が広まってきていることも事実である。このことは、一般的にローメンテナンスであると考えられてきた PC 橋においても、例外ではない。

現在における高速道路建設は第二東名・名神高速道路に代表されるように、その大半が急峻山地部を通過していることから、構造物比率が非常に高く、長大橋も数多く計画されている。現在供用している高速道路の橋梁全体における維持補修費は年間約 500 億円にも達し、今後も数多くの長大橋の供用や延長拡大とともに増大していくものと思われる。

これらの状況をふまえ、JH では橋梁の耐久性向上と工費削減を目指し、新技術や新工法の開発に全面的に取り組んでいるところである。本稿では、そうした耐久性向上への新たな取組みについて紹介する。

2. コンクリート構造物の品質管理

2.1 品質管理体制

コンクリート構造物の劣化や損傷が問題となるなか、コンクリート構造物の維持補修費を削減するため、コンクリート構造物の製造から維持管理まで含めた総合的な品質保証システムの確立が急務となっている。

コンクリートの耐久性に対する品質確保には、近年の損傷事例から、水セメント比や鉄筋かぶり、および締固めな

どの管理が重要な要素であると考えられる。しかしながら、現行の品質管理項目ではコンクリート構造物の製造過程に主眼が置かれており、実構造物が所定の耐久性を確保しているかどうか直接評価できていないのが現状である。

今後の品質管理のあり方としては、性能確認、耐久性確保の観点から実構造物に対し評価するシステムが望まれる。JH においても実構造物検査へ重点をおいた品質管理として、平成 15 年度にはコンクリート強度と鉄筋かぶり確認について非破壊検査を適用する予定である。

2.2 コンクリート強度

実構造物のコンクリート強度確認手法としては、テストハンマーによる反発硬度法を用いる。強度については、試験練り時に圧縮強度試験用供試体を作成し、これを基準供試体として反発度を測定しておき、本体構造物の反発度と比較して判定を行うものである。

測定方法は土木学会規準 JSCE-G 504「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」に準じており、さらなる精度向上策として、JH における今までの測定データを基に、構造物表面が湿潤状態にある場合や打撃方向に対する補正值を設定している。

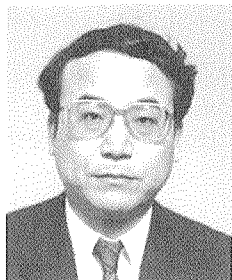
非破壊検査時には足場が必要となるため、足場存置期間中の検査が望ましい。そのため、弱材齢時においても強度確認ができるよう基準供試体は複数作成し、数種類の材齢における反発度の測定値から近似曲線を作成することによって、本体構造物の材齢に対応した基準供試体の反発度を推定し判定を行うこととしている。

なお、テストハンマーには現状では統一された機構や性能に関する規格がないため、性能確認のためテストアンビル（プリネル硬度 $H_b = 500$ で作られた供試体）にて反発硬度 80 ± 2 であることを確認して使用することとしている。

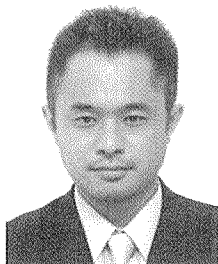
2.3 鉄筋かぶり

鉄筋かぶりの非破壊試験には、「電磁誘導法」または「電磁波（レーダ）法」を標準として適用する。

電磁誘導法は鉄筋による磁場の変化からかぶりを推定する方法である。電磁誘導法では、鉄筋のピッチなど配筋状態が異なれば、磁場の影響も変化するため測定誤差の要因となる。したがって、精度の良い測定値を得るためには、実際の配筋状態によって補正值を決定しておくことが必要となる。補正方法の例として、図 - 1 に示すように、コンクリート打設前の鉄筋前面に厚さ 25 mm の磁界に影響を及ぼさない材料を用いた板等を 5 枚用意し 1 枚ずつ重ねることによって、25 mm ~ 125 mm のかぶりに対し配筋の状態による測定値の誤差を測定し補正值とすることができる。



*1 Masataka SUMI

日本道路公団
技術部 構造技術課 課長

*2 Takeshi OOSHIRO

日本道路公団
技術部 構造技術課

電磁波法は、電磁波が鉄筋から反射してくる時間によりかぶりを推定する方法である。電磁波、超音波の速度はコンクリートに含まれる水分量に影響され、打設後の検査においては水分量が増えるために測定誤差の要因となる。精度の良い測定のためには、検査日のコンクリートの材料物性の状態により補正値を設定していくことが重要である。たとえば、図 - 2 に示すような基準供試体を測定個所に打設されるコンクリートから製作し、かぶり検査日に材料物性による補正値を設定しておくことが考えられる。

本体構造物の測定は、最外縁の鉄筋を対象に行うことが望ましいが、橋脚の場合には最外縁の鉄筋は中間帯鉄筋のフックであり、測定が困難な場合も考えられる。そのような場合には、帯鉄筋の測定を行い、設計かぶりとの比較を行うことで所定のかぶりを有しているかの判定を行う。

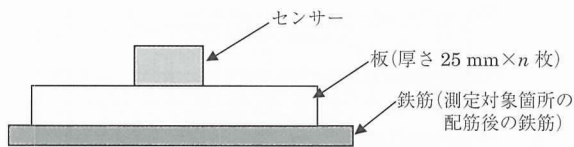


図 - 1 電磁誘導法の補正方法

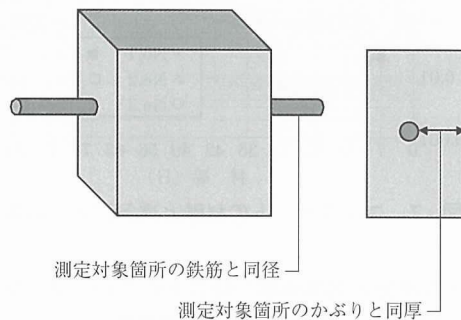


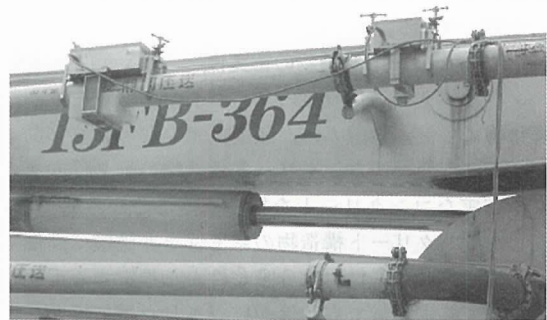
図 - 2 電磁波(レーダ)法の補正方法

2.4 フレッシュコンクリートの単位水量

フレッシュコンクリートの単位水量は試し練りによって示方配合を定め、骨材の粒度や表面水量の変動に応じて配合修正を行い決定される。現場で打設されるコンクリートは、この配合に基づいて計量された単位水量のものが出荷されることとなる。一方、単位水量が正しく配合されているかの確認は、コンクリート製造工場における印字記録、フレッシュコンクリートのスランプ試験、供試体による硬化コンクリートの強度管理によって行うことができるが、いずれもコンクリート打設時に定量的に確認できるものではない。

単位水量はコンクリートの耐久性を大きく左右する要因であることから、コンクリート打設時点でこれを確実に確認することができれば、より高耐久なコンクリートが施工できると考えられる。

フレッシュコンクリートの水分量測定方法としては、単位体積質量から求める方法、乾燥前後の質量差から求める方法、中性子線を用いて測定する方法、静電容量により測定する方法などが提案されているが(図 - 3)、測定方法に



配管に RI 測定器を設置し連続的に単位水量を測定する

a) 全数方式 RI 測定法



水量が変化すると単位容積質量が変化することを利用し測定

b) 単位容積質量法

図 - 3 単位水量測定法の例

は以下の性能が求められる。

- ① 測定に伴う現場負担の省力化
- ② 測定結果の活用性(品質管理へのフィードバック)
- ③ 測定結果の精度および公正性

現状では十分な精度をもって単位水量を計測できる機器として確立されたものはないため、補正方法を含め、簡便で精度の高い測定手法について検討しているところである。現場試験結果を図 - 4 に示す。

これらの得られた試験結果をもとに、補正方法の設定や

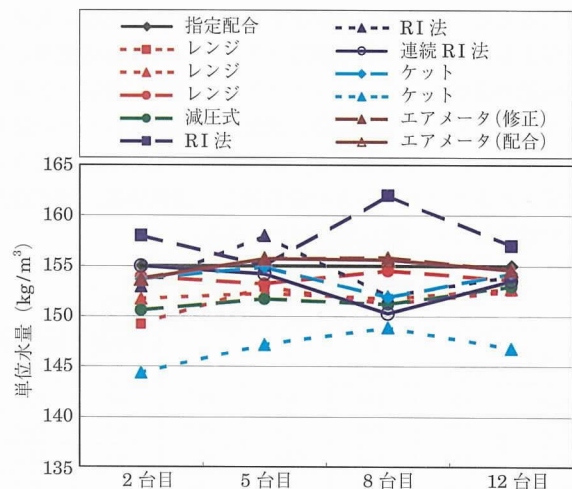


図 - 4 現場試験結果(指定配合 155 kg/m³)

管理基準値の検討を行っており、品質管理手法として早期導入を図っている。

2.5 コンクリート構造物の密実性

コンクリートの劣化現象の多くは、コンクリート内部での塩化物イオン、炭酸ガス、酸素、水などの物質移動と深い関係があるため、コンクリート構造物の耐久性向上のためには密実なコンクリートを構築することが重要である。完成したコンクリート構造物の密実性を非破壊で評価するには、透水性、透気性、水分吸着性から推定する手法などがあるが、基礎実験で有効性が確認された透気性から推定する手法について実用化に向けた検討を行っている。

透気性によりコンクリートの密実性を評価する手法としては、コンクリート表面に負圧を与え回復までの時間や圧力経時変化を測定するトレント法¹⁾があり、現在 JH では、トレント法による検査の実用化に向けた試験を行っている。図 - 5 に透気性試験のイメージ図を示す。密実性の評価指標は透気係数で、密実なコンクリートほど透気係数が小さく表される。

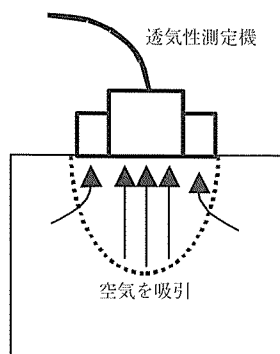
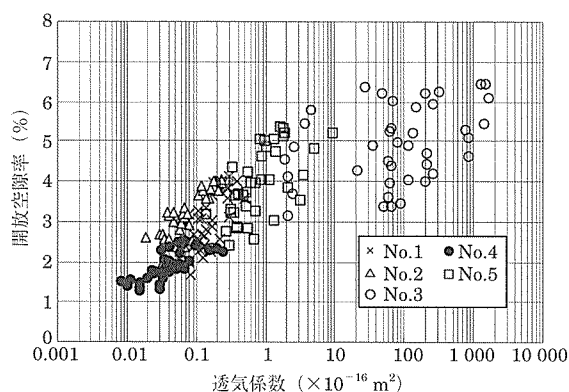


図 - 5 透気性試験

普通、早強、高炉セメントの3種類を用い、水セメント比やセメント量を変化させた配合で20×20×15 cmの試験体を作成し、各材齢で試験を実施している。配合の一例として、普通セメントの配合と物性試験結果の一部を表 - 1 に示す。また、コンクリート中の気体の移動は、水分によって占有されていない空隙（開放空隙）に生じると考えられるため、開放空隙率が透気係数に大きな影響を及ぼすと考えられる。図 - 6 に試験より得られた開放空隙率と透気係数の関係を示す。図 - 6 より、一般的に密実だと考えられる配合では、透気係数、開放空隙率ともに小さい結果を得ている。このことから、水セメント比や単位水量から想定されるコンクリートの密実性と、透気係数、開放空隙率の関係はよく一致しているといえる。

表 - 1 供試体の配合と物性試験結果

配合 No.	W Kg/m ³	C Kg/m ³	W/C	S/a	空気量 %	圧縮強度 N/mm ²
No.1	160	320	50.0	39.0	4.0	44.6
No.2	135	270	50.0	39.0	4.7	48.3
No.3	185	270	68.5	46.0	4.4	21.6
No.4	135	370	36.5	36.0	4.7	70.3
No.5	210	370	56.8	60.0	4.6	36.9



$$\text{開放空隙率} = (\text{飽水時の重量} - \text{それぞれの乾燥状態の重量}) / \text{飽水時の重量}$$

図 - 6 透気係数と開放空隙率の関係

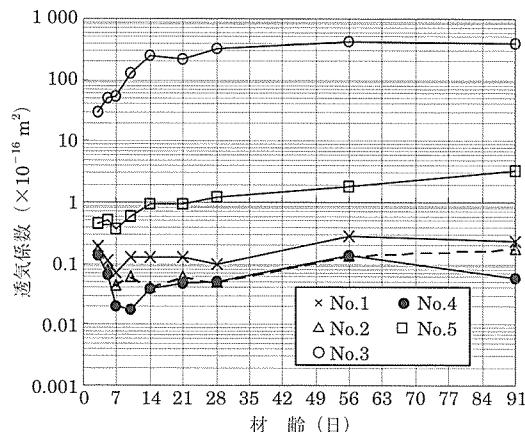


図 - 7 コンクリートの材齢と透気係数の関係

図 - 7 に材齢と透気係数の関係を示すが、型枠脱型から材齢10日までは、多少の透気係数の変動がある。これはセメントの水和反応やコンクリートの乾燥の影響が考えられる。しかし、それ以降はどの配合もほぼ安定しており、透気係数を指標とした密実性検査は、材齢の初期においても十分適用可能と考えられる。

小型試験体と実構造物では施工方法や養生方法が異なるが、これらはコンクリートの密実性に大きく影響すると考えられるため、1.0×1.0×1.0 mの大型試験体で、型枠脱型日を2、5、10日と変化させた3種類について、試験体側面の上面（上面から20 cmの位置）および下面（下面から20 cmの位置）において試験を実施している。試験の結果を図 - 8 に示す。

各試験体の測定位置による影響は、下側の方が上側より透気係数が小さい。これは、下方のコンクリートは上部のコンクリートの重量で締固められ密実なコンクリートとなることや、上方はブリージング水が上昇するため密実性が得られないためと考えられるが、脱型時期が10日になると位置による差も無くなっており、初期養生を十分行えば、コンクリート表面付近の密実性が確保されることがわかる。

透気係数はコンクリートの含水率に試験結果が大きく左右されるため、実構造物を屋外で検査する場合には含水率の測定精度の向上と補正方法など、まだいくつかの課題が

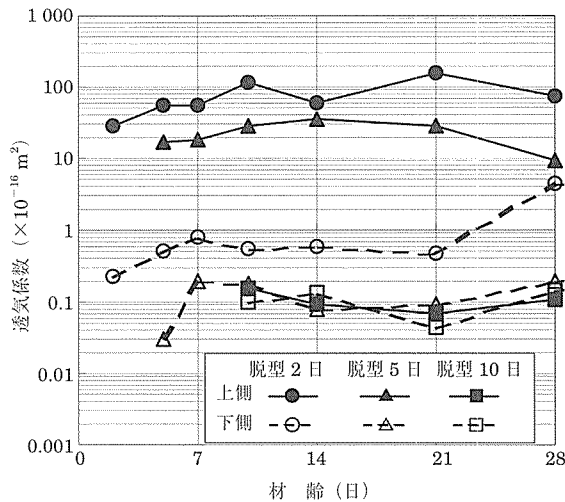


図 - 8 大型試験体による試験結果

ある。完成したコンクリート構造物の品質を評価できる検査方法として、今後さらに検討を進めていく予定である。

3. PC グラウト

近年、JH では、プレテンション方式、全外ケーブル構造、プレグラウト PC 鋼材を採用することで、内ケーブルのグラウト注入作業を排除し、PC 橋の耐久性向上を図ってきた。

しかし、PC 橋における工費削減策として、架設工法によっては内ケーブル工法に経済的な優位性があり、再度、採用が強く要請されてきた状況にある。そのためには内ケーブル工法の耐久性を確保する必要があり、PC グラウトの問題点とその解決方法について実用化に向けた検討を行っている。

1) 内ケーブル配置

グラウト充填とその検査方法を容易にする鋼材配置例を図 - 9 に示す。内ケーブルは、床版内に直線配置することによってグラウトの先流れによる空隙を生じさせないように配慮するとともに、非破壊検査の容易さのため、ウェブ直

上への配置を避けている。

2) 品質管理

近年、高粘性、低粘性さらには超低粘性など、種々の粘性を有するノンブリーディングタイプのグラウト混和剤、もしくはプレミックスのグラウト材料が開発されている。これに対応するため、グラウトの流動性試験は、今まで用いていた J14 漏斗に替わり JP 漏斗を用いることが標準となった。しかし、それ以外の試験方法は、ほとんど見直しが行われておらず、ブリーディング率試験ではポリエチレン袋方法が現在でも使用されている。一方、海外では、鉛直管試験 (Vertical Tube Test) や傾斜管試験 (Inclined Tube Test) などの新しいブリーディング試験が採用されている²⁾。これらの試験は、シース内に充填されたグラウトをさまざまな観点からモデル化して、ブリーディングの発生状況を確認しようとするもので、ポリエチレン袋方法に比べ、より実構造物に近い性状を示すものと考えられる。

① 鉛直管試験

ブリーディング率試験および膨張率試験は、従来から、高さ 200 mm 程度の円柱供試体 (ポリエチレン袋) を用いて実施されてきた。しかし、鉛直管に PC 鋼より線を配置した試験では、より多くのブリーディングが生じることが確認されている。これは PC 鋼より線が“ランプの芯”のように、ブリーディング水を上昇させるために生じるもので、実際のシース内でも同様のメカニズムにより、ブリーディングが生じている可能性があると考えられている。図 - 10 に示す PC 鋼より線を挿入した鉛直管試験を実施し、グラウト材料のブリーディング発生状況を従来のポリエチレン袋方法の試験結果と比較し適用性の評価を行っている (図 - 11)。

② 傾斜管試験

fib マニュアル²⁾ ではブリーディング率試験として、30° の傾斜角を有する長さ 5.0 m、内径 80 mm の透明管を用いた傾斜管試験を実施することを推奨している。図 - 12 に、傾斜管試験の実施状況を示す。この方法は、管を傾斜することにより材料分離が生じやすくなるものである。ま

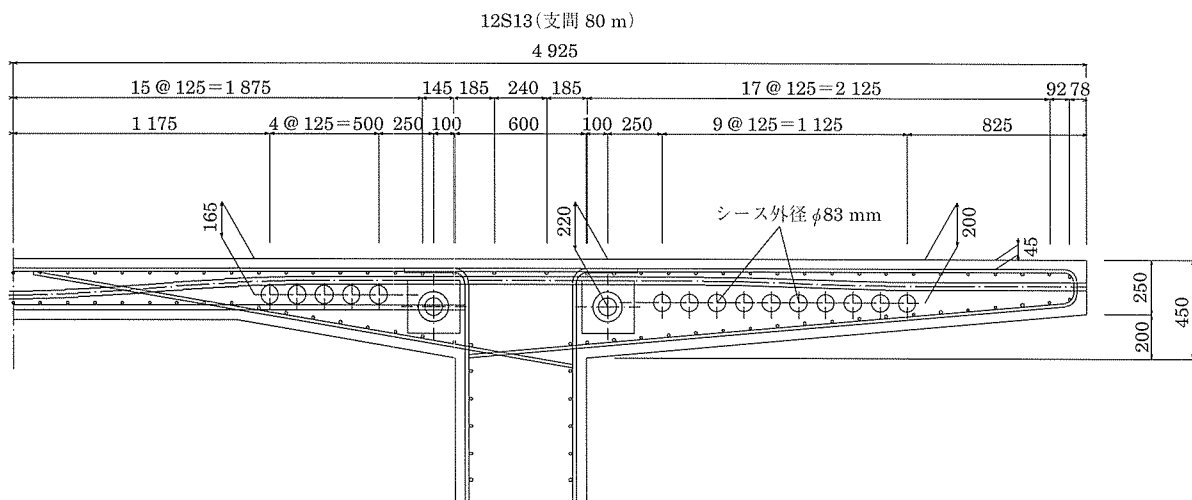
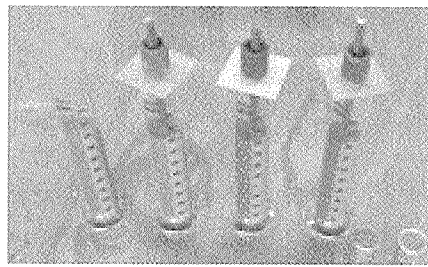
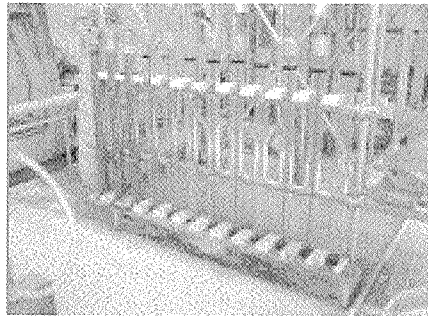


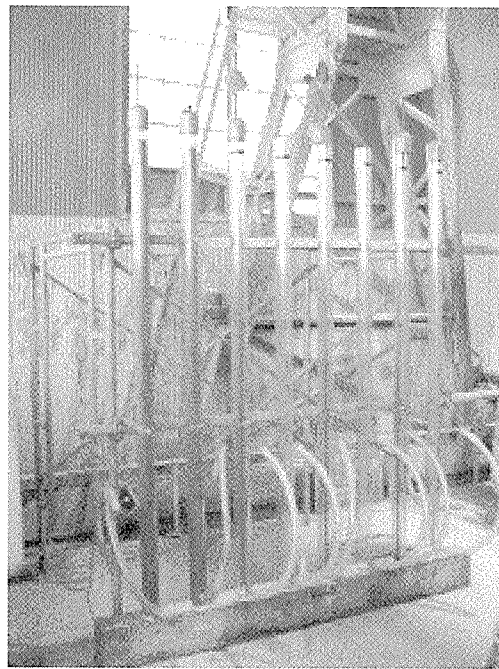
図 - 9 内ケーブル配置例



a) メスリンダー試験

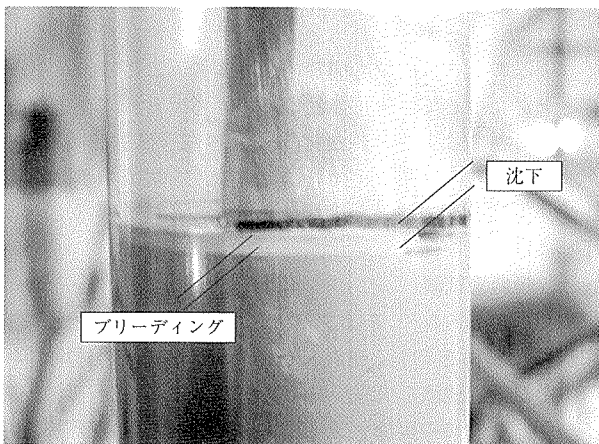


b) 1.0m 鉛直管



c) 2.0m 鉛直管

図 - 10 鉛直管試験



※ポリエチレン袋方法ではブリーディングが生じない材料を使用

図 - 11 2.0m 鉛直管試験結果

た、管内に 12 本の PC 鋼より線を配置することにより、前述した“ランプの芯効果”も PC 鋼より線を 1 本配置するのに対して顕著になると考えられる。

この傾斜管試験結果（図 - 13）より各グラウトのブリーディング発生状況および分離状況を確認し、また、傾斜管試験と鉛直管試験の結果を比較することで、日常的な試験に適した鉛直管試験の妥当性を検証している。

3) 非破壊検査

グラウトの充填度確認および注入忘れなどのヒューマンエラーを防ぐ手段として、非破壊検査の実用化に向けた実験研究を行っている。非破壊検査は、グラウト注入中に行うものとグラウト硬化後に行うものに対してそれぞれ検討を行っている。

① 注入時非破壊検査



図 - 12 傾斜管試験

グラウト注入中の非破壊検査の一例として、熱電対式放熱抵抗センサー（MS センサー）による検査の概要を以下に示す。

MS センサー（図 - 14）は、センサー内のヒーターで加熱された熱が周囲媒質（例：空気）へ放熱され、

センサー内で生じた温度差により発生する出力電圧が、周囲媒質によって一定値を示すことを利用したものである。周囲媒質が変化すると（例：水、グラウト）、放熱量が変化し、出力電圧も変化する。グラウト充填度の確認はこれを検知することで行う。センサーの性能

確認試験で実施された結果を図 - 15 に示す。

これによると、グラウト充填前には 9.0 ~ 10.0 mV の出力電圧であったものが、注入後には 1.0 mV 程度に下がっており、グラウト充填の確認が可能であることが分かる。時間の経過とともに、出力電圧は 2.0 mV まで上昇しているが、全体的には低い値を示しており、長期計測に対する可能性も示唆している。

② 硬化後非破壊検査

グラウト硬化後に非破壊検査による充填度の確認が可能か検証を行うため、グラウトの充填率を 100 %、50 %、0 % とした試験体を製作し、非破壊試験を実施している。非破壊検査手法は、超音波透過法、衝撃弾性波法、中性子透過法、電磁波レーダー法を用いた。試験供試体例を図 - 16 に示す。これまで 12.5 cm や 15 cm といった近距離で並列配置されたシース内グラウトの充填度を検査した例はなく、直上に鉄筋が密に配置されていることや、隣接して配置されたシース内の空隙の影響を受けるため現状では充填度の明確な識別が困難な状況にある。今後、隣接部の空隙の影響をどの

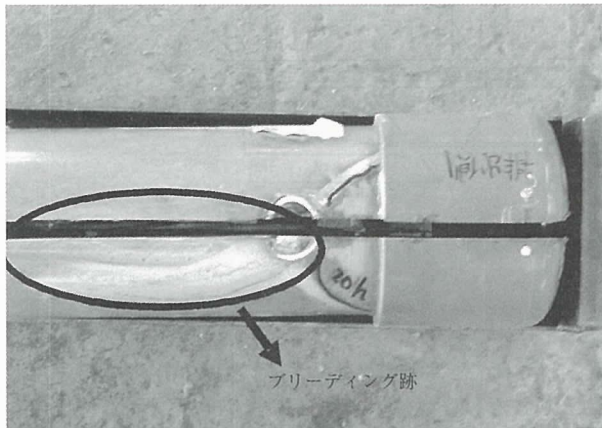


図 - 13 傾斜管試験ブリーディング発生状況

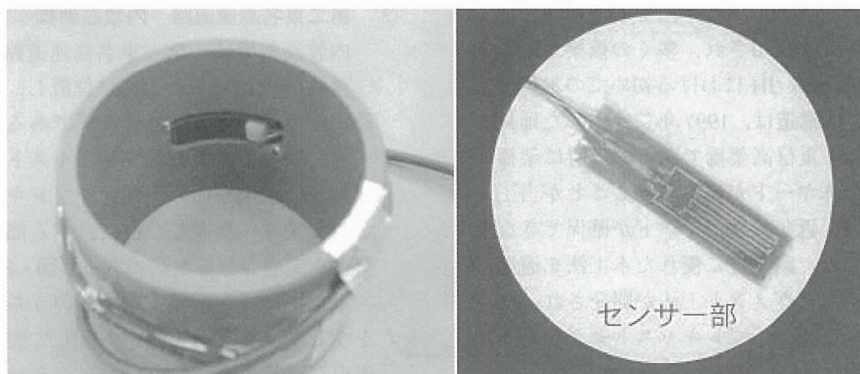


図 - 14 MS センサーのシース取付状況

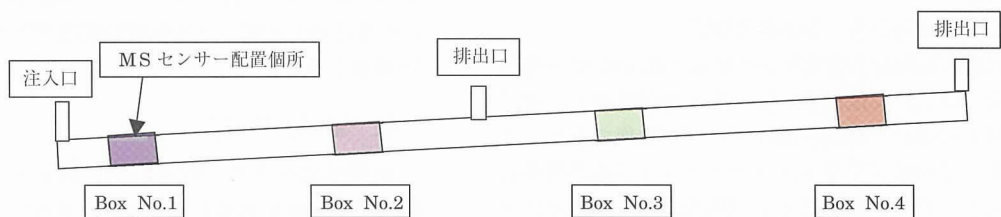
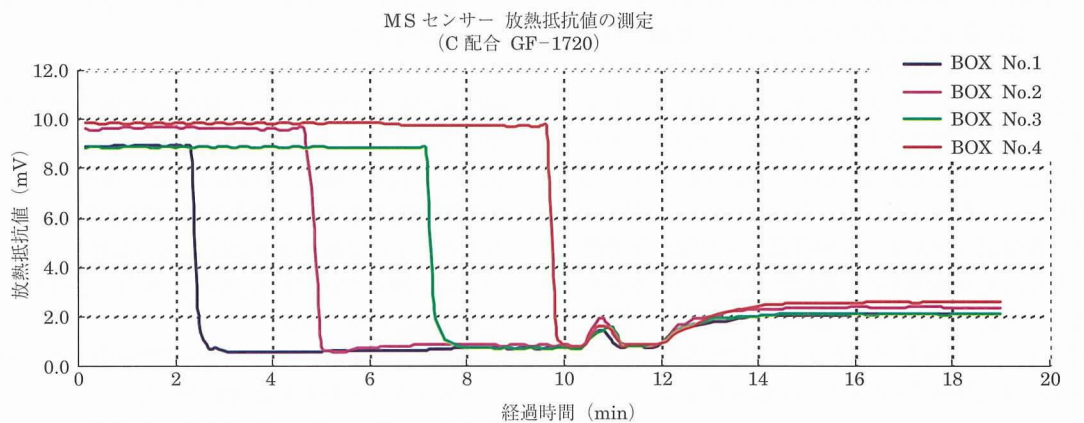


図 - 15 MS センサーの測定結果

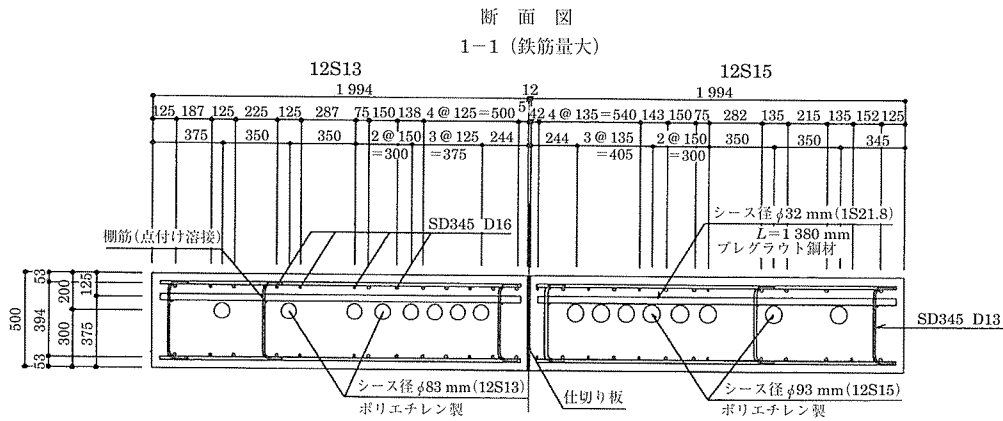


図 - 16 50 cm 厚非破壊試験供試体

ように除去できるかがグラウト硬化後の非破壊検査の課題となると考えている。

4. プレキャストセグメント構造

施工の省力化・品質の確保から、わが国でも本格的にプレキャストセグメント工法が採用され、多くの橋梁が架設されるようになってきている。JHにおける初めての本格的なプレキャストセグメント構造は、1997年に完成した延長約1.9 kmの松山自動車道 重信高架橋である。当時は架橋地点近傍にセグメント製作ヤードが確保されることが当工法の採用条件であったが、近年では、ヤードが確保できない都市部の橋梁においても、耐久性に優れた本工法を適用できる工場製プレキャストセグメント工法が開発され、採用されるようになった。以下に、プレキャストセグメント工法を採用した最近の事例を紹介する。

① 第二名神高速道路 古川高架橋

古川高架橋は、伊勢湾岸自動車道のみえ川越IC～みえ朝日IC間に位置する延長約1.5 kmの工場製プレキャストセグメント工法を採用した都市内高架橋である。JIS工場で作成したセグメントは、一般道を介してトレーラーにより運搬を行なうことから、セグメントの重量と寸法に制限を受ける。このため、本橋ではU形コア断面+リブ構造(図-17)および設計基準強度60 N/km²の高強度コンクリートの採用により軽量化を図り、1個あたりのセグメント重量を30 tf以下におさえている。架設はスパンバイスパンによりU形コア断面にて架設後、リブ上にプレキャストPC板を敷設し、更にその上に場所打ちにてPC床版を構築している(図-18)。

② 伊勢湾岸自動車道 上和会高架橋

上和会高架橋は伊勢湾岸自動車道の豊田南IC～豊田JCT間(仮称)に位置する都市内高架橋である。古川高架橋と同様に、近隣に製作ヤードが確保できないことから、工場製プレキャストセグメント工法を採用しているが、本橋においては2主箱桁断面とし、セグメントを1主箱桁ごとに分割して製作し、架設時に場所

打ちにて2主箱桁に連結する(図-19)構造を採用している。接合部の構造はダブルループ継手を採用し(図-20)、事前に実物大実験を行い安全性や施工性を確認している。

③ 第二東名高速道路 内牧高架橋

内牧高架橋は、第二東名高速道路の静岡IC(仮称)～藤枝岡部IC(仮称)間に位置し、内牧川盆地部を横過する個所に架橋される橋梁である。本橋はこれまでに前例のない断面分割プレキャストセグメント工法を採用し、主桁断面の一部分をプレキャストセグメントとして製作・架設した後に、残る部分を架設して断面全体を完成させる工法である(図-21)。

本橋では、主桁幅17.68 mのうち中央9.2 mの部分をプレキャストセグメントとして製作・架設し、残る張出し床版部分(2×4.24 m=8.48 m)を場所打ちする工法を採用している。これにより、セグメント製作重量として、従来工法と比較した場合約28%の軽量化を実現している。

また、本橋では等間隔に配置した斜めストラットにより張出し床版を支持するストラット付PC箱桁構造を採用している。ストラット付PC箱桁構造を採用することにより、従来のPC箱桁構造に比較して底版の幅を狭くすることで、主桁断面縮小化から上部構造の大幅な軽量化が達成された。さらに、上部構造の底版幅縮小化と軽量化により橋脚断面および基礎についても小規模化が図れ、全体的にスレンダーな構造となっている。

内牧高架橋では、直径30 cmのプレキャスト製コンクリートストラットを約3 m間隔で設置し、ストラットの長さは約5 m、重さは約9 kNであり、同幅員でストラットのない一室箱桁と比較した場合は底版幅が約38%、断面積で約25%減となる。

5. おわりに

JHではこれまで、PRC構造、外ケーブル構造などの新技術・新工法を採用しているが、さらなる耐久性向上のために、コンクリートの品質管理手法としての非破壊検査や

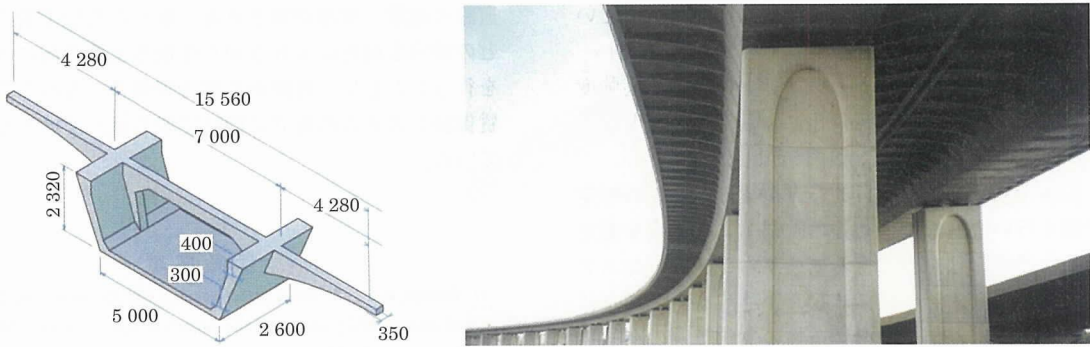


図 - 17 U形コア断面+リブ構造

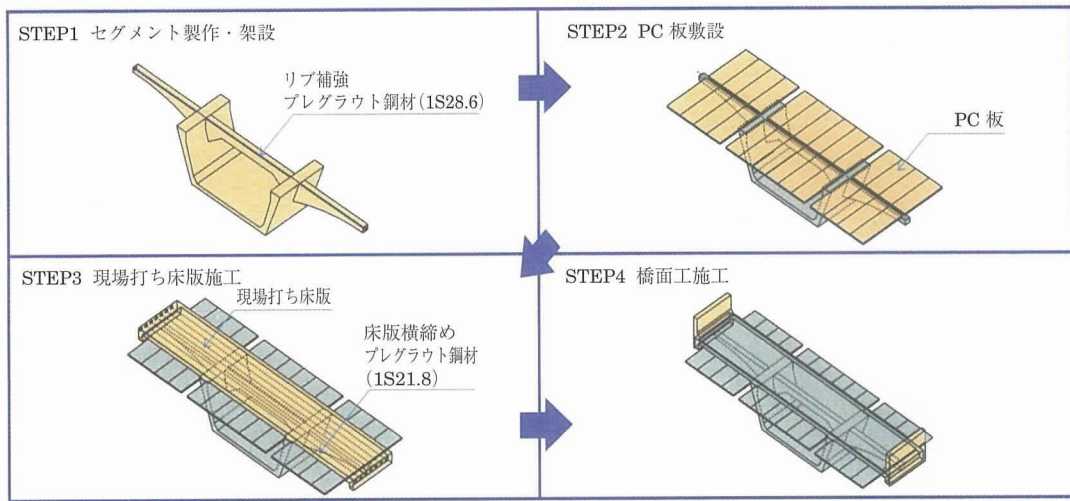


図 - 18 古川高架橋床版部施工概要

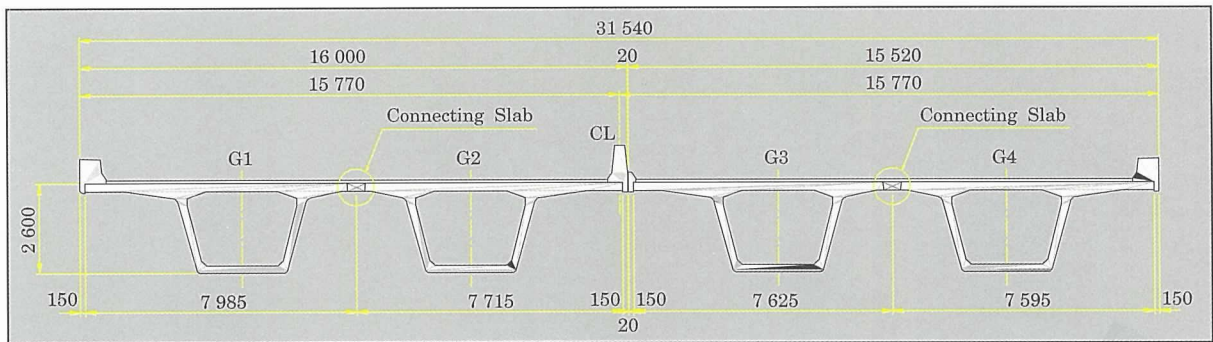


図 - 19 上和会高架橋断面図

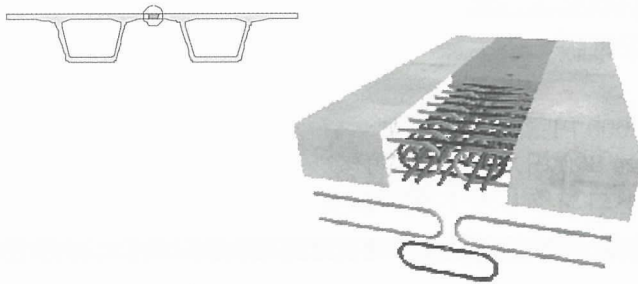


図 - 20 上和会高架橋床版接合部概要図

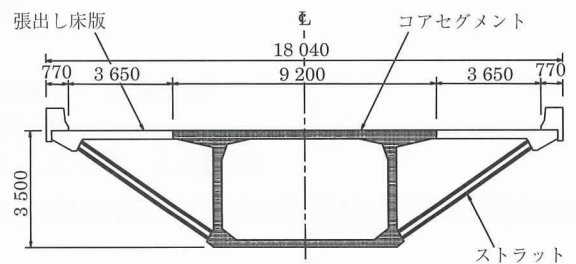


図 - 21 内牧高架橋主桁断面図とコアセグメント

単位水量検査の採用などについて積極的に検討を行っている。

本稿で紹介したプレキャストセグメントにおける高強度コンクリートの採用などは、軽量化による工費削減とともにコンクリートの耐久性向上に大いに貢献している。

また、維持補修費の縮減を目的に、橋梁の健全性の判定と劣化予測を行い最適な補修補強の時期および工法を選定し、計画的な維持管理を支援する橋梁マネジメントシステム（JH-BMS）の構築を行っている。また、本システムに非破壊検査で得られたデータを構造物の劣化予測の初期データとして有効に活用することも検討している。

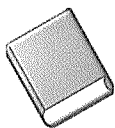
現在のJHの置かれている立場は、マスコミなどで話題のとおり厳しい状況にあり、これまで以上に効率的な高速

道路の建設、管理が望まれる。新たな発想や新たな材料などの採用も視野に入れながら今後も工費削減に向けた検討を行うとともに、建設から維持管理まで含めた総合的な品質保証システムの確立に向けて取り組んでいきたいと思っている。

参考文献

- 1) Torrent, R.J. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, Vol.25, No.150, pp. 358-365, July, 1992
- 2) *fib* Task Group 9.8 Grouting : Grouting of tendons in prestressed concrete Guide to good practice, pp. 45, July, 2002

【2003年9月9日受付】



刊行物案内

PC 橋架設工法 2002年版

頒布価格：会員特価 4 000 円（送料 400 円）

：非会員特価 4 800 円（送料 400 円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会