

# PC3径間連続ラーメン箱桁橋における 高強度コンクリートの適用

根本浩史<sup>1</sup>・大野浩<sup>1</sup>・近藤克己<sup>2</sup>・西野洋一<sup>3</sup>・辻正邦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 清水建設株式会社 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3パシオス館）  
<sup>2</sup>正会員 工修 清水建設株式会社 東北支店（〒980-0801 宮城県仙台市青葉区木町通り1-4-7）  
<sup>3</sup>清水建設株式会社 東北支店（〒980-0801 宮城県仙台市青葉区木町通り1-4-7）

岩手県釜石市に位置するPC3径間連続ラーメン箱桁橋(工事名称：一般国道45号両石高架橋工事 発注者：国土交通省東北地方整備局)では、上部工の軽量化を目的として、設計基準強度60N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートを適用した。PC箱桁橋にこのような高強度コンクリートが使用された実例は少ない。本報文は、高強度コンクリートの施工における検討課題であった「部材厚が大きい柱頭部に発生する温度ひび割れ制御対策の検討」,「コンクリートのフレッシュ性状の特性を考慮した箱桁部コンクリート打込み方法の選定」についての概要、対策内容及び成果について報告するものである。

**キーワード：**PC箱桁橋、高強度コンクリート、温度ひび割れ、充填性、打込み方法

## 1. 工事概要

本報告の対象工事である一般国道45号両石高架橋工事は現在整備中である岩手県釜石市と下閉伊郡山田町を結ぶ釜石山田道路の先行整備区間として現在建設中である。

本工事の特徴としては、高架橋上部工に高強度コンクリート( $f'_{ck}=60\text{N/mm}^2$ )を用いることで、上部工の軽量化を図り、下部工規模を縮小することで、経済化を図ったことがあげられる。図-1に側面図を、図-2に上部工標準断面図を示す。

以下に本工事の工事内容を示す。

【基礎工】形式：直接基礎（P2・A2）深礎杭（A1-2.5m・P1-3m）

【下部工】形式：逆T式橋台（A1・A2）壁式橋脚（P1）柱式（中空）橋脚（P2）

【上部工】形式：PC3径間連続ラーメン箱桁橋

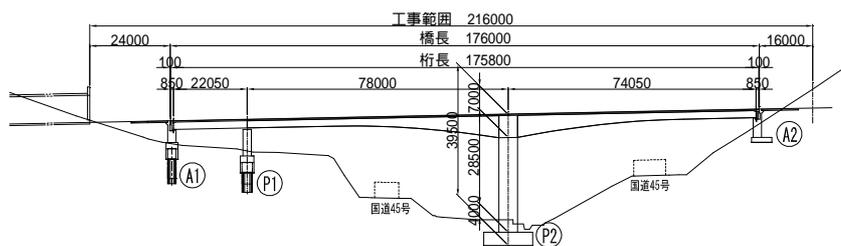


図-1 側面図

工法：片持張出し架設工法

橋長：176.0m

支間割：22.05m+78.0m+74.05m

有効幅員：9.5m

## 2. 高強度コンクリートの概要

### (1) 高強度コンクリート施工までの流れ

片持張出し部の箱桁断面コンクリートは、下床版上面には型枠を設置せずに、ウェブ内側の型枠は浮き型枠として設置し、下床版から上床版まで1回で打ち上げるのが一般的である。しかしながら、高強度コンクリートの場合は、普通強度のコンクリートと異なり、ワーカビリティを確保するために流動性が高くなることから、上述した一般的な箱桁断面の

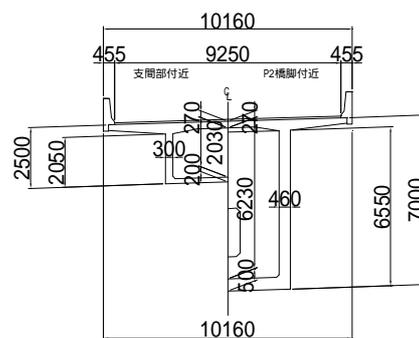


図-2 上部工標準断面図

打込み方法の適用が困難なことが想定された。

また、高強度コンクリートはセメント量が多くなるため、普通強度のコンクリートよりもセメント水和熱に起因する温度ひび割れが発生しやすくなる。そのため、部材厚が大きい柱頭部には有害なひび割れを制御する対策を講じる必要があった。

本工事では箱桁断面に高強度コンクリートを適用するにあたって、ひび割れ制御対策及びフレッシュコンクリートの特性を考慮した上で、図-3に示す流れで配合及び打込み方法を決定した。

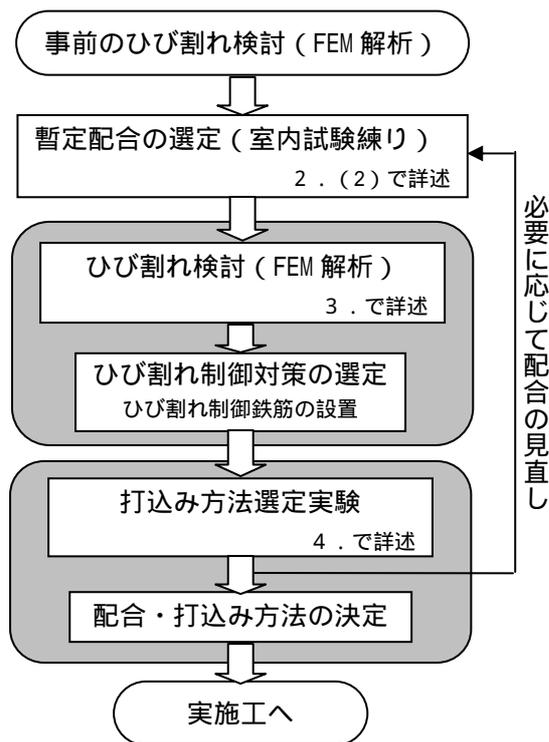


図-3 高強度コンクリート施工までのフロー

## (2) 暫定配合の選定

暫定配合を選定するための室内試験練りにおける試験配合は、設計基準強度を確保するために、W/Cは30%とし、温度ひび割れに対する影響が大きいセメント量を3段階（配合No.1～3）に設定した。各配合におけるフレッシュ性状を確認して暫定配合を選定することとした。

試験配合No.1及びNo.2は箱桁断面の打込み方法と

して一般的な方法（浮き型枠を使用する方法）を適用した場合、またNo.3は流動性を高めて箱桁下床版の上面型枠を設置して自己充填する場合を想定した配合である。試験配合を表-1に、使用材料を表-2に示す。

各配合の試験結果（スランプまたはスランプフロー）を表-3に示す。No.1のスランプは目標値を満足したが、粘性が非常に大きくワーカビリティが確保できていないと判断された。No.2は練混ぜ直後の性状は良好であったが、30分後には流動性が大きく低下し、ワーカビリティが確保できなかった。それに対して、No.3は練混ぜ直後から90分後まで良好な性

表-2 使用材料

材料名	記号	種類 (産地)	物性等
セメント	C	普通ポルト	密度 3.16(g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S1	砕砂 (大曽根産)	密度 2.70±0.02(g/cm <sup>3</sup> ) 粗粒率 2.80±0.15,
	S2	砂 (大槌地区)	密度 2.60±0.02(g/cm <sup>3</sup> ) 粗粒率 3.00±0.20,
粗骨材	G	砕石 2005 (大曽根産)	密度 2.74±0.02(g/cm <sup>3</sup> ) 実積率 59.0±2.0(%)
混和剤	SP	高性能 AE減水剤	No.1,2: ポリカルボン酸系 (高強度用, 低粘性型) No.3: ポリカルボン酸系 (普通～高強度用)

表-3 試験結果（スランプまたはスランプフロー）

配合 No.	スランプorスランプフロー (cm)				フレッシュ性状
	練混ぜ 直後	30 分後	60 分後	90 分後	
No.1	16.0	-	-	-	粘性が強く、施工性が悪い
No.2	54.5	30.5	-	-	練混ぜ直後は良好だが、30分後には粘性が強く、流動性が落ちる
No.3	62.5	55.0	58.0	63.5	90分後でも流動性が確保できている。暫定配合へ

表-1 試験配合

配合 No.	W/C (%)	スランプ 目標値 (cm)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					S P	想定した箱桁の 打込み方法
					W	C	S1	S2	G		
No.1	30	スランプ 15～18	53.0	4.5± 1.5	160	533	446	447	792	C×0.73% 3.89 kg/m <sup>3</sup>	一般的な方法（ウェブ内側の型枠は浮き型枠）
No.2	30	スランプ フロ- 50cm程度	53.7	4.5± 1.5	165	550	446	445	767	C×0.90% 4.95 kg/m <sup>3</sup>	
No.3	30	スランプ フロ- 60cm程度	53.0	4.5± 1.5	170	567	432	432	767	C×1.10% 6.24 kg/m <sup>3</sup>	下床版上面に型枠を設置し、自己充填

状を確保することが出来た。No.1及びNo.2において粘性が強くワーカビリティが確保できなかった理由として、単位水量がNo.3と比較して少ないことが考えられる。

この室内試験練り結果から、暫定配合はセメント量は最も多いが、良好なフレッシュ性状が得られたNo.3を選定した。

### 3. 柱頭部における温度ひび割れ検討

P2橋脚柱頭部においては、セメント量の多い（暫定配合で567kg/m<sup>3</sup>）高強度コンクリートを適用し、さら片持張出し部よりも部材厚が大きいため、セメント水和熱に起因する温度ひび割れが発生が懸念される。

柱頭部における温度ひび割れ検討では3次元有限要素法を用いた非定常熱伝導解析および応力解析を実施し、応力算定結果を用いて土木学会コンクリート標準示方書に示される曲げひび割れの検討方法により、発生するひび割れ幅を予測した。

本構造物における許容ひび割れ幅はコンクリート標準示方書に基づき、鋼材の腐食に対する環境条件を一般の場合とし0.175mmと設定した。温度ひび割れ制御対策は、算定されたひび割れ幅が許容ひび割れ幅を満足するようにひび割れ制御鉄筋を設置する対策を講じることとした。

#### (1)解析ケース、解析モデル及び解析条件

柱頭部のコンクリート打設は、型枠や鉄筋組立の施工性等を考慮し、柱頭部下床版下面から5.5mの位置を打継ぎ面とした2回打設を計画していた。柱頭部の上床版下部は部材厚が1.5mと厚く（上床版も含む）、水和熱による温度変化量が大きい。当初計画

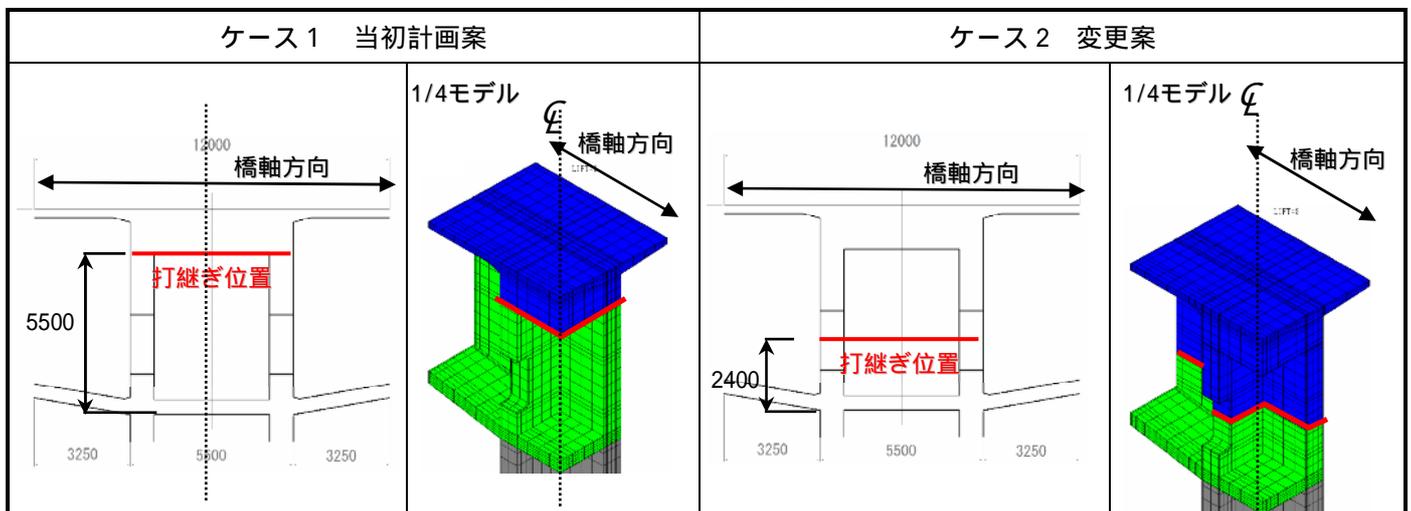
案のリフト割りは、上床版下部の温度変化による体積変化が1リフトに拘束されるため、温度ひび割れに対して厳しい条件であることが推定された。

そのため、解析では打継ぎ位置を柱頭部下床版下面から2.4mの位置に変更したケースも実施し、比較

表-5 解析条件（ケース2の場合）

項目	温度解析条件
打設時期	1リフト:11月上旬 2リフト:12月上旬
外気温	1リフト:5.8 2リフト:3.7 釜石市 月別平均気温より設定
打設温度	1リフト,2リフト:14 プラントにおける冬期練上り温度の実積より
熱伝導率(W/m)	2.7
比熱(kj/kg)	1.15
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2371
断熱温度上昇特性	1リフト,2リフト: Q :70.04( ) :0.920
熱伝達率(W/m <sup>2</sup> )	散水:14 型枠:14 マット:5 脱型後:14
型枠設置期間	1リフト 上面:散水7日 側面:型枠7日 2リフト 上面:散水7日 側面:マット7日
温度応力解析条件	
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	$f'c(t)=t/(0.0193+0.01332 \times t)$
引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	$0.44 \times \{f'c(t)\}^{0.5}$
有効ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	$(t) \times 4700 \times \{f'c(t)\}^{0.5}$ $(t)=0.73 (t \ge 3) \quad (t)=1.00 (5 \le t)$
ポアソン比	0.20
線膨張係数(μ/)	10
自己収縮ひずみ(μ)	(社)日本コンクリート工学協会 「自己収縮研究委員会報告書」より $'as(t)= 'as [1-\exp\{-a(t-ts)^b\}]$ $'as(t)$ :凝結の始発から材齢 t までのコンクリートの自己収縮ひずみ(×10 <sup>-6</sup> ) :セメントおよび混和材の種類の係数(1.0) $'as$ :自己収縮ひずみの最終値(×10 <sup>-6</sup> ) $'as = 3070 \exp\{-7.2(W/C)\}$ W/C:水セメント比 ts:凝結の始発(日)(0日) a, b:自己収縮の進行特性を表す係数 (W/C=30%の時, a=0.60, b=0.50)

表 - 4 解析ケース及び解析モデル



検討した。表-4に解析ケース及び解析モデルを示す。温度及び応力解析の解析条件を表-5に示す。

工事においては、打込み方法を選定するための実験を実施した。以下に実験内容の詳細を示す。

### (2)温度応力解析結果

温度応力解析結果として、表-6に各ケースの引張応力最大値の分布を示す。ケース1については、推定通り、温度変化の大きい上床版下部において、最大引張応力が発生する結果となった。それに対してケース2では、2リフト最下部のウェブ断面内部に最大引張応力が発生した。引張応力最大値はケース1が10.5N/mm<sup>2</sup>に対し、ケース2では8.5N/mm<sup>2</sup>に低減した。

### (3)柱頭部における温度ひび割れ制御対策

温度応力解析結果より、許容ひび割れ幅を満足するひび割れ制御鉄筋量(計画時からの増量)を算定した結果、ケース1では1,883kg、ケース2では793kgとなり、打継ぎ箇所を変更することによる、ひび割れ制御鉄筋の削減効果が確認された。

以上の温度ひび割れ検討結果より、柱頭部における温度ひび割れ制御対策として、ひび割れ制御鉄筋の設置及び打継ぎ位置の変更を採用した。

## 4. 高強度コンクリート打込み方法選定実験<sup>1)</sup>

柱頭部を含む箱桁におけるコンクリートの施工はフレッシュコンクリートの特性を十分考慮した上で打込み方法を設定する必要があった。そのため、本

### (1)実験の目的

実験の目的を以下に示す。

- ポンプ圧送によるコンクリート性状変化を確認する(水平換算距離160m)。
- 下床版上面型枠の型枠設置方法(3ケース)の違いによるコンクリートの充填性や施工性を比較し、型枠設置方法及び打込み方法を選定する。
- コンクリート打込み後、下床版上面の仕上げ処理の可否を確認する。

### (2)試験体形状

コンクリートの充填性や施工性を確認するため、下床版上面型枠の設置方法の異なる実大試験体を3種類製作した。試験体の形状を表-7に示す。

ケース1の試験体は下床版上面型枠(以下、押さえ型枠と称す)を全面に設置した。ケース1では、高強度コンクリート打込み時の締固め作業が不可能であるため、コンクリート打込みによる自己充填状況を確認した。

ケース2の試験体は、下床版の一部は押さえ型枠を設置せず、開放した状態である。ケース2では、下床版打込み時に縦断勾配(5.5%)による流動状況及び仕上げ可否の確認、また、下床版打込み完了から90分後にウェブ部コンクリートの打込み可否(ウェブ部の打込みにより下床版コンクリートが押出されるか否か)を確認した。

表-6 応力解析結果

	ケース1 当初計画案	ケース2 変更案
引張応力最大値分布図		
引張応力最大値	10.5 N/mm <sup>2</sup>	8.5 N/mm <sup>2</sup>
ひび割れ制御鉄筋量(計画時からの増量)	1,883 kg	793kg

ケース3の試験体は、ケース2と同様に下床版の一部は押さえ型枠を設置せず開放した状態とした上で、下床版内部にラス網を設置した。ラス網設置の目的はウェブ部打込みによる下床版コンクリートの流動を抑制することである。ケース3ではラス網設置の効果による下床版からウェブ部への連続打込みの可否を確認した。

### (3)実験結果

各実験目的に対する実験結果及び考察を以下に示す。

#### a) ポンプ圧送によるコンクリート性状変化について

高強度コンクリートは単位セメント量が増加する配合となり粘性が非常に大きくなるため、管内圧力損失が増大するとともに、圧送後に流動性が大きく低下する場合があることが報告されている<sup>2)</sup>。

本実験では上部工スパン中央部施工時と同程度の圧送負荷を想定して、配管長は水平換算距離(約160m)を確保した。また、実験にはアジテータトラック3台分のコンクリートを使用したため、各トラックにおいて、出荷時、現着時(圧送前)及び圧送後に品質試験を実施してフレッシュコンクリート性状を確認した。

現着時スランプフローの基準値は $60 \pm 10$ cmと設定したため、高性能AE減水剤の添加量によりスランプフローの目標値を1台目は70cm、2台目は60cm、

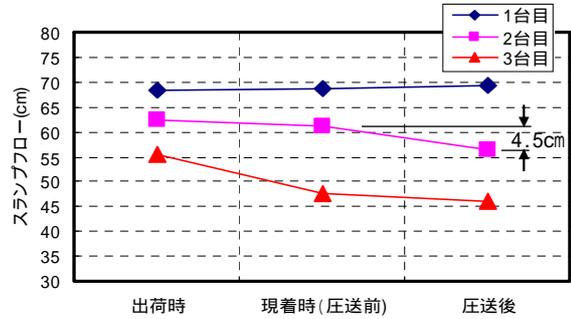


図-4 スランプフローの変化

3台目は50cmとした。図-4に品質試験結果(スランプフロー)を示す。

現着時のフレッシュ性状はスランプフローが基準値下限に近い3台目は上限に近い1台目よりも粘性が大きいものの、それぞれ良好な状態を確保していた。また、圧送後においてもスランプフローの低下は最大4.5cmであり、流動性が大きく低下することはなく、圧送後も良好な性状が確保され、3台とも順調に圧送することが出来た。この結果より、ポンプ圧送によるコンクリートの性状変化の影響が打込み施工性に与える影響は小さいと判断された。

#### b) 下床版上面型枠の型枠設置方法による比較検討

ケース1~3の試験体にコンクリートを打込んだ結果を以下に示す。

ケース1(押さえ型枠全面設置)では、下床版からウェブ部まで連続して打込むことで、良好に充填出来た。コンクリート打込みによる圧力で、押さえ

表-7 試験体形状および打込み状況

ケース No.	ケース1 押さえ型枠全面設置	ケース2 押さえ型枠一部設置	ケース3 押さえ型枠一部設置及びラス網設置
試験体形状			
打込み方法	下床版からウェブまで連続して打込み	下床版を打込み完了から、90分後にウェブ部打込み	下床版からウェブまで連続して打込み
充填状況	良好に充填	90分後、ウェブ部を打込みより、下床版コンクリートが押出される。	ラス網設置箇所の外側(かぶり部分)からコンクリートが回り込み、ウェブ部打設時には下床版コンクリートが押出される。
仕上げ状況	打込み後約3時間後に押さえ型枠を取外し、仕上げ可能。ただし、わずかに流動性が残っている。	押さえ型枠を設置していない箇所では、コンクリートの流動性が高いため、縦断勾配5.5%を確保した仕上げができない。	

型枠が一部変形したことから、コンクリートの流動性が高いため、液圧相当の圧力が作用していることが想定された。

ケース2（押さえ型枠一部設置）では、下床版打込み完了から、90分後にウェブ部にコンクリートを打込んだが、下床版のコンクリートが押出される結果となった。

ケース3（押さえ型枠一部設置及びラス網設置）では、下床版からウェブまで連続して打込もうとしたが、ラス網設置箇所の外側(かぶり部分)からコンクリートが回り込み、ウェブ部打設時には下床版コンクリートが押出される結果となった。

以上の結果より、本箱桁の高強度コンクリートの打込みでは、下床版上面全面に押さえ型枠を設置する必要があると判断された。

### c) 下床版上面の仕上げ処理の可否について

一般的に押さえ型枠を設置した場合、コンクリート内に巻き込んだ空気泡などの逃げ場がなくなり、アバタが発生しやすくなる。そこで、ケース1の試験体においては、打込み終了から約3時間後に押さえ型枠を取り外し、コテ仕上げが可能かを確認した。その結果、下床版コンクリートが押出されることはなく、コテ仕上げに必要な程度のわずかな流動性も確保されていたため、仕上げることが可能であった。

また、ケース2では、押さえ型枠を設置していない箇所、コンクリートの流動性が高いため、縦断勾配5.5%を確保した仕上げができない結果となった。

本実験では仕上げのタイミングを現場で簡易的に管理する方法として、N式貫入試験<sup>3)</sup>により貫入量を測定した。ケース1では、押さえ型枠を取り外した時点での試験体における貫入量は5.5cmであった。

N式貫入試験による貫入量と経過時間の関係を図-6に示す。ケース1及びケース2において貫入量の測定を行なったが、試験体と容器（バケツ）における貫入量と経過時間には同様な関係が得られた。ケース1とケース2における関係の相違は、コンクリートのフレッシュ性状の差によるものと考えられる。本管理方法は、浮き型枠を用いるコンクリート打込みや仕上げのタイミングの管理方法として有効であると考えられる。

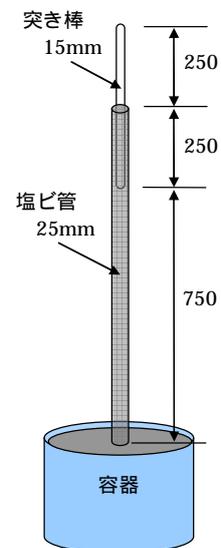


図-5 N式貫入試験

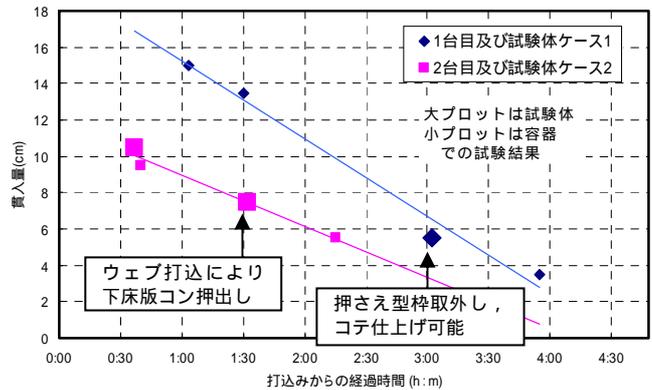


図-6 N式貫入試験による貫入量と経過時間の関係

### d) 打込み方法選定実験から設定した打込み方法

本実験結果より、押さえ型枠を全面に設置していない場合は、ウェブ部打設時に下床版コンクリートが押出されること、また、縦断勾配を確保した仕上げが出来ないことが分かった。そのため、コンクリート打込みには押さえ型枠が必要であると判断した。

また、本実験ではケース1においては打込み後3時間後に押さえ型枠を取外したうえで、コテ仕上げが可能であったが、狭隘箇所での型枠取外し作業の負担や、コンクリートが押出された場合のリスク等を考慮し、実施工においては押さえ型枠を取外して仕上げ作業は実施せず、コンクリートが硬化するまで押さえ型枠を残置する方針とした。

## 5. まとめ

本工事においては、高強度コンクリートをPC箱桁橋上部工に適用するため、図-3に示す施工フローに基づき、柱頭部のひび割れ制御対策、充填性確保を考慮した打込み方法、コンクリート配合を選定した。

柱頭部の施工は2008年1月に完了し、良好な仕上がりのコンクリートが得られ、有害なひび割れの発生も確認されていない。7月末現在、張出し部15ブロック中8ブロックが完了し、2009年3月の竣工を目指し、引続き張出し部を施工中である。

### 参考文献

- 1) 栃木謙一他：高強度コンクリートを使用したPC箱桁橋の施工性能確認試験，土木学会年次講演会，2008
- 2) コンクリートポンプ施工技術調査委員会報告書，日本コンクリート工学協会 pp. 170-171，2007.9
- 3) コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策，土木学会コンクリートライブラリー103，pp. 51-67，2000.3