

自律水温制御パイプクーリングシステム

橋梁下部工の温度ひび割れ防止

若築建設(株)技術企画部
小山稔樹

はじめに

- ◆ マスコンクリートの温度ひび割れ対策として、パイプクーリングは有効な方法である。
- ◆ パイプクーリングの効果や確実性を高めるため、自律水温制御システム『WIT P-Cool3A』を開発した。開発の主な目的は、
 - 1) 安定した温度(5~20°C)の冷却水を、必要量(60~120ℓ/分)製造し、躯体へ循環させる。
 - 2) 事前解析とは異なる温度変化に対応する。
 - 3) コンクリートが最高温度に達した後の、過冷却(≡急激な温度低下に伴う応力発生)を防止する。
 - 4) パイプクーリングに必要な機材をパッケージにする。
- ◆ 『WIT P-Cool3A』の概要、および中国地方の橋梁下部工事へ適用した事例を紹介する。

温度ひび割れの概説

温度ひび割れとは

- ◆ 温度ひび割れは、コンクリート硬化時の水和発熱と、硬化後の温度低下に伴って、コンクリートの体積が変化することで発生する。
- ◆ 温度ひび割れの発生は、温度応力解析で予測でき、ひび割れ指数で評価される。ひび割れ指数=1.0は発生確率50%に相当する。

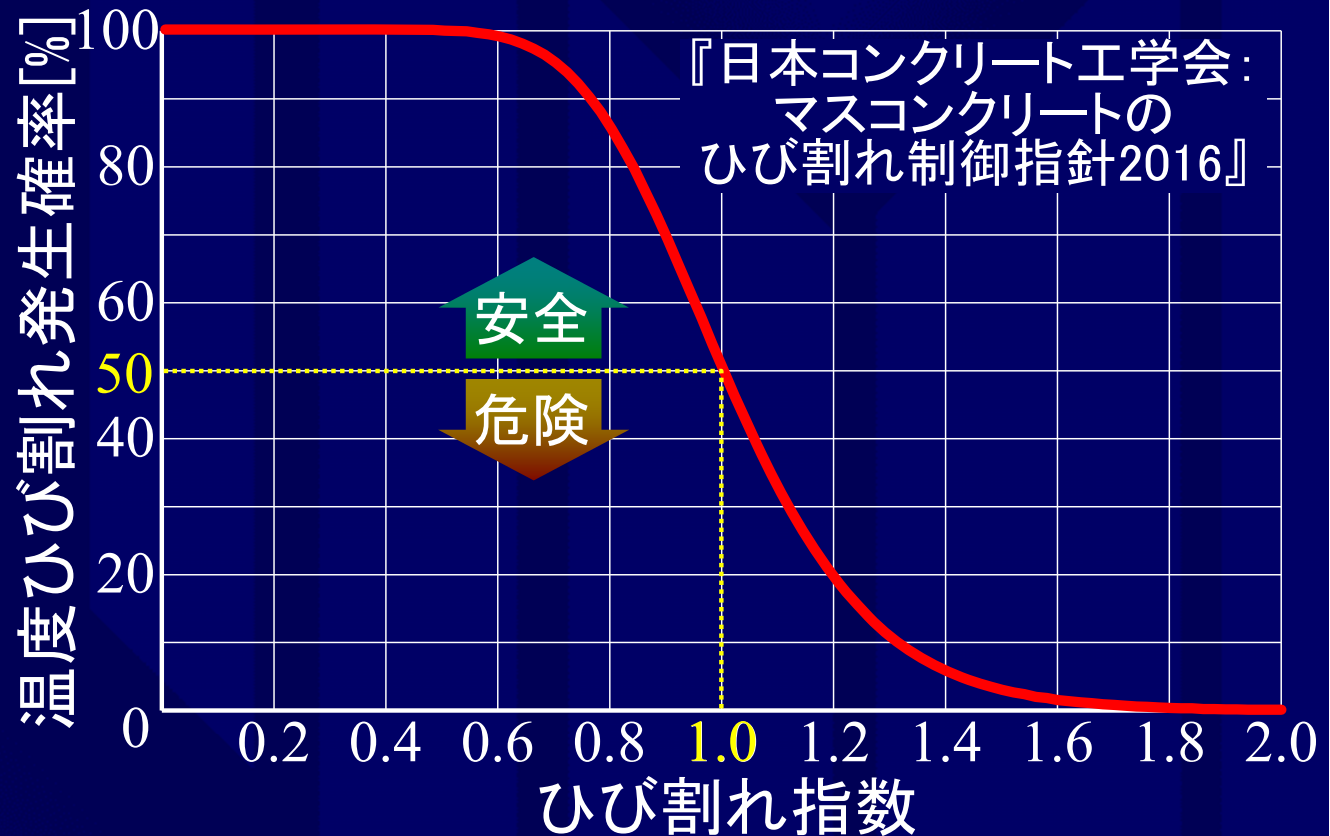
$$I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_t(t)$$

ここに、

$I_{cr}(t)$: ひび割れ指数

$f_t(t)$: 材齢 t 日の引張強度

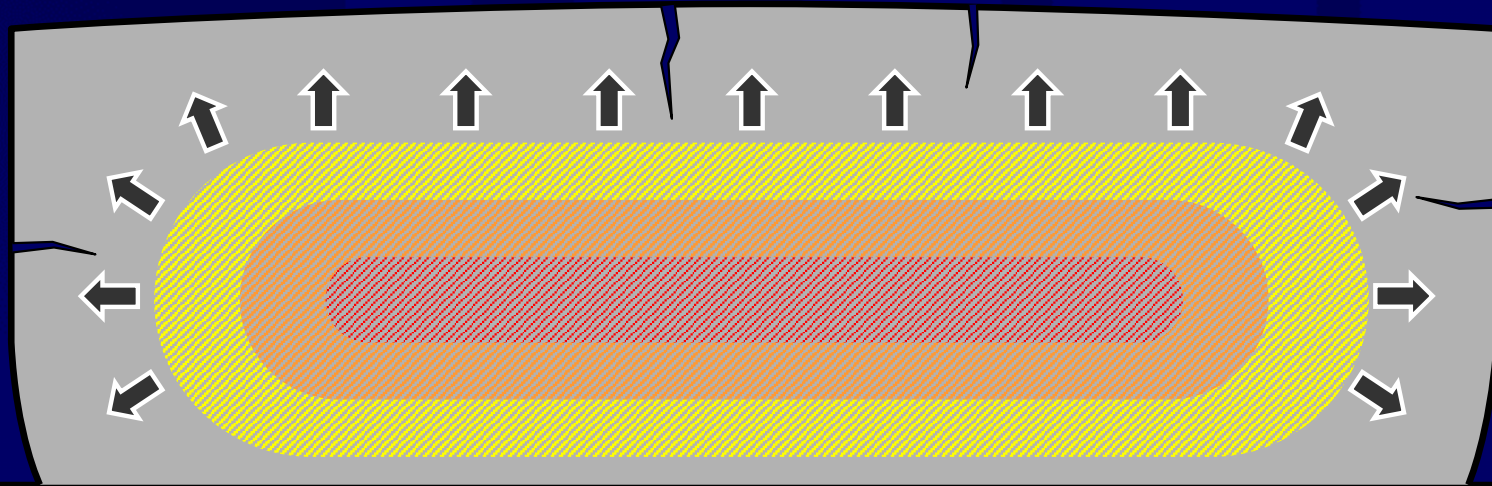
$\sigma_t(t)$: 材齢 t 日の引張応力



- ◆ 温度ひび割れには、2つのメカニズム（内部拘束／外部拘束）があり、それぞれで発生時期や発生パターンおよび抑制対策が異なる。

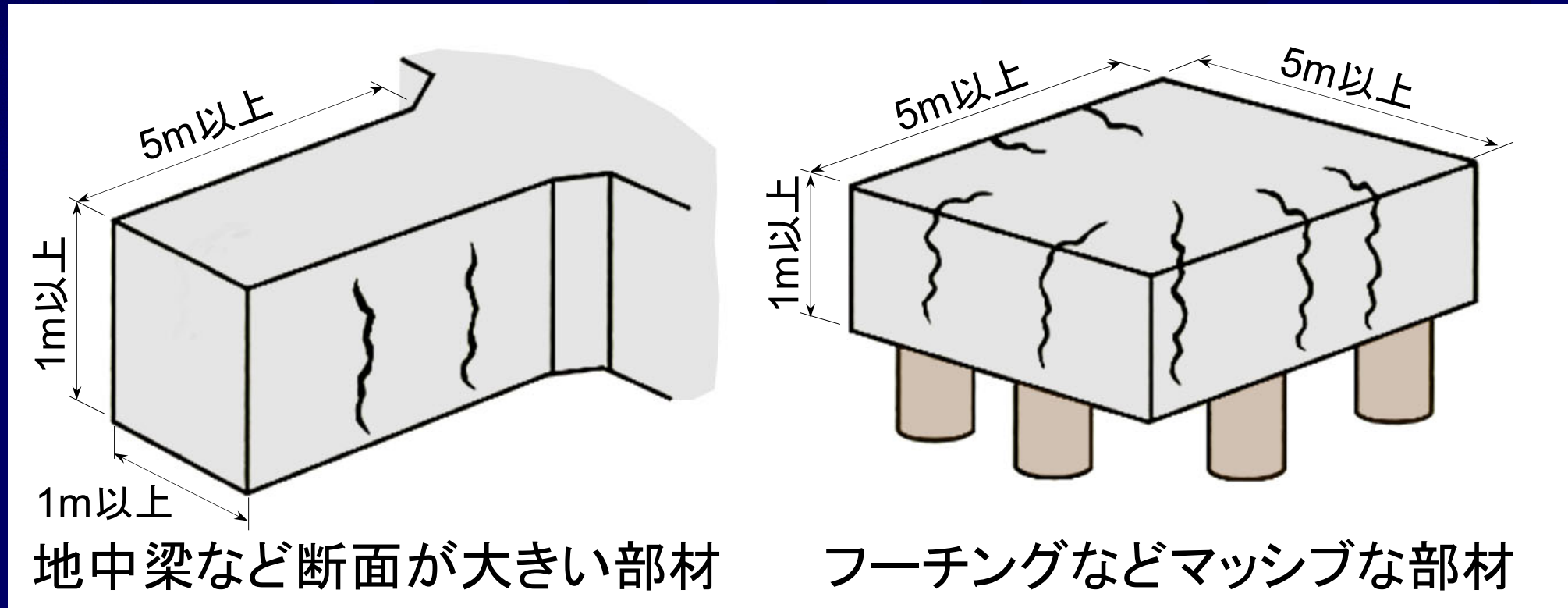
内部拘束型の温度ひび割れのメカニズム

- ① 厚さ1m程度以上の部材では、コンクリートの水和熱(セメントと水の反応熱)によって、内部の温度は70°C以上になる。
- ② 部材の表面は外気に触れているので、温度が高くない。
- ③ 内部の熱膨張に対して、表面は温度が低いため膨張しない。
- ④ 膨張量の差によって、表面にひび割れが発生する。



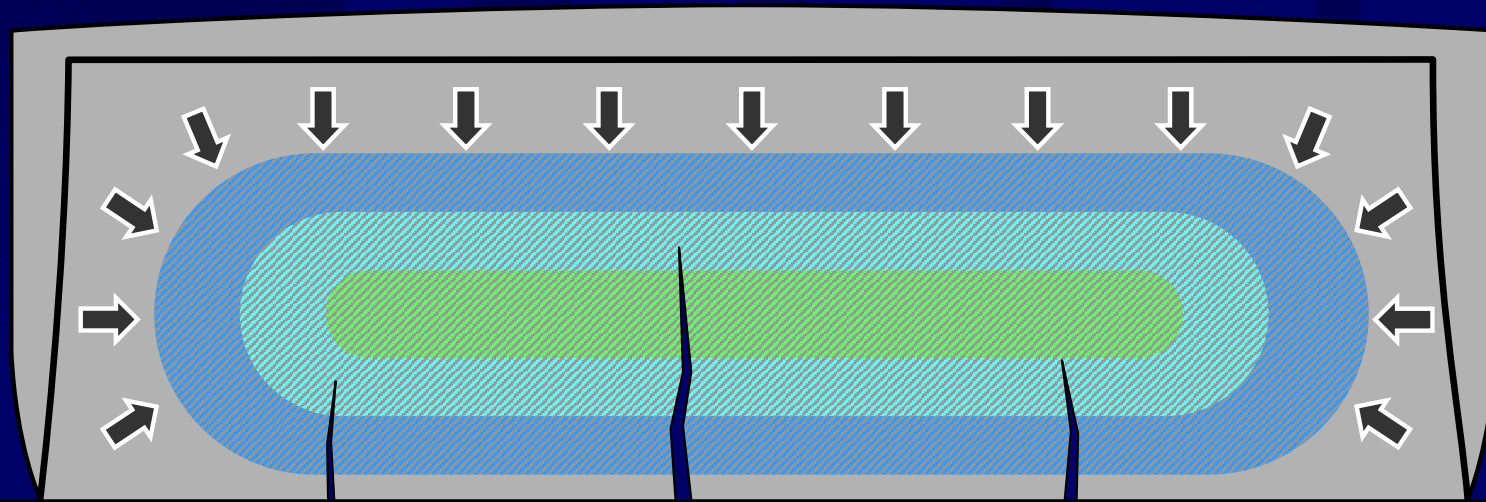
内部拘束型の温度ひび割れの特徴

- 部材の側面や天端面、隅角部に発生する。
- 部材の長手方向に直交して発生する。
- ひび割れの間隔は、2~5m程度。
- 材齢1~3日程度に発生する。(脱型時に発見されることが多い)
- 材齢の経過(=温度低下)とともに、ひび割れ幅が小さくなる。



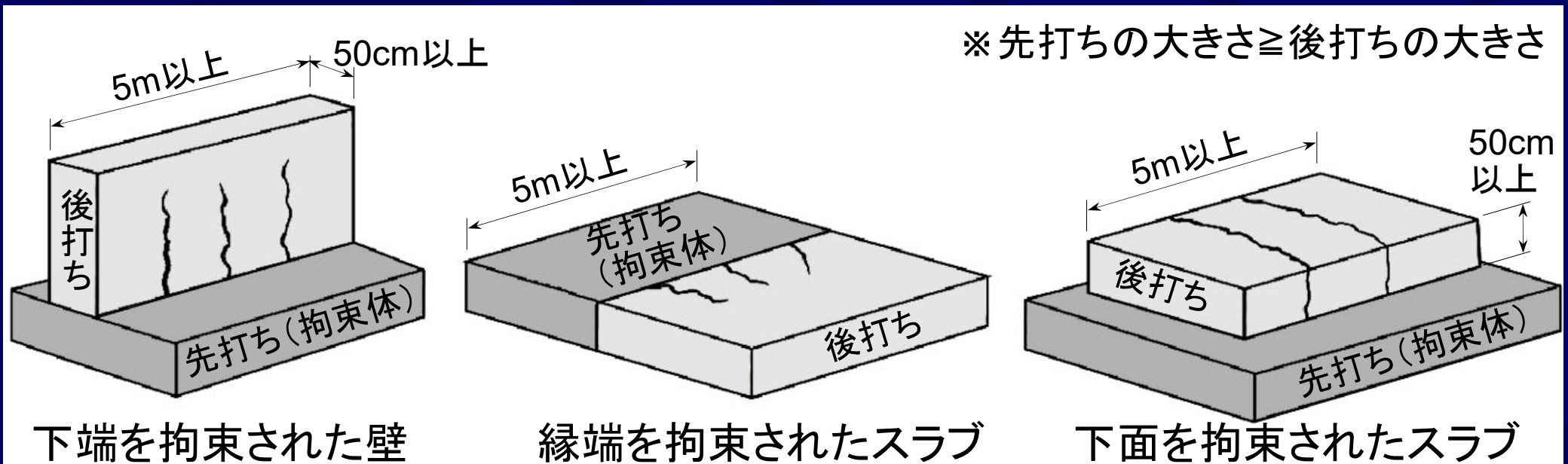
外部拘束型の温度ひび割れのメカニズム

- ① 厚さ50cm程度以上の部材では、コンクリートの水和熱によって、内部の温度は50℃以上になる。
- ② 温度が高い状態で硬化する。
- ③ 硬化後、温度の低下に伴って部材全体が収縮する。
- ④ 既設コンクリートなどで拘束されると、部材を貫通するひび割れが発生する。



外部拘束型の温度ひび割れの特徴

- ・ 拘束体に近いところから発生する。
- ・ 部材を貫通して発生する。
- ・ 部材の長手方向に直交して発生する。
- ・ ひび割れの間隔は、2~5m程度。
- ・ 材齢7~14日程度に発生する。(脱型後に発生することが多い)
- ・ 材齢の経過(=温度低下)とともに、ひび割れ幅が大きくなる。



温度ひび割れの対策 (1)

種類	方法および目的	摘要
セメント量低減	高性能AE減水剤などを用いて単位セメント量を低減し、水和熱を低減する。	経済性・施工性に優れるが、低減できるセメント量には限りがあるため、この対策のみで十分な効果を得ることは難しい。
打込み区画の変更	打込み区画の面積やリフト高さを小さくすることによって、コンクリート内部の温度上昇を低減する。	十分な効果を得るためには、1層あたり1～2mで打設する必要がある。構造物の一体性を確保するためには、打継ぎ目の数は少ないほうが良いため、適用できる部材が限定される。また、工程が遅延する。
低熱セメントの使用	低発熱型のセメントを使用することによって、水和発熱量を低減する。	ひび割れ抑制効果が高く、施工性、経済性に優れる。ただし、製造可能なプラントが限られることや、コンクリートの硬化が遅いため、工程が遅延するなどのデメリットがある。
膨張材の添加	コンクリートに膨張材を添加することによって、温度低下時のコンクリートの収縮を補償する。	壁部材など、外部拘束型の場合は、ひび割れ抑制効果が高い。 一方、マッシュな部材では、躯体内部の熱膨張に、膨張材による膨張が加わることになるため、内部拘束型の場合は逆効果である。

文字色の意味： 有意な点。 留意点。 不利な点。

温度ひび割れの対策 (2)

種類	方法および目的	摘要
プレクーリング	骨材などの冷却や、アジテータトラックに液化窒素を吹込む方法で、 コンクリート打設温度 を低減。	一般的な生コンプラントには骨材などを冷却する設備がない。また、液化窒素を使用するプレクーリングは、 コンクリートの品質管理が難しく、施工実績が少なく、かつ高価 。
パイプクーリング	部材内部にパイプを配管し、配管内に水を流すことによって、 部材内部の熱を排出 する。	温度ひび割れを抑制する効果が大きく、構造物の形状寸法に関わらず適用性が広い 。ただし、十分な効果を得るためには、 適切なパイプの配置と、精密な温度管理が必要 。
保温養生	部材内部が高温である期間中に、表面を保温し、 部材内部と表面の温度差を緩和 する。	内部拘束型の場合は、 表面ひび割れの発生を抑制 できる。しかし、保温によって部材内部の温度が高くなるため、 外部拘束型の場合は逆効果 になることがある。
ひび割れ誘発目地	誘発目地を設置することによって、 ひび割れの発生位置を制御 し、補修の確実性を高める。	壁部材には適用可能であり、 効果が見込める 。ただし、一体性を確保しなければならない構造物においては、目地を設置する場所や、 設計上問題がないか検討が必要 。
ひび割れ抑制鉄筋	ひび割れを分散させ、 ひび割れ幅を低減 する。	ひび割れを許容し、分散させることでひび割れ幅を低減する方法である。 ひび割れ発生を防止することは困難 。

温度ひび割れ対策の評価

抑制対策	有効性		汎用性 (適用性)	施工性 (工程)	経済性 (費用)
	内部拘束	外部拘束			
セメント量低減	△	△	○	◎	◎
打込み区画の変更	○	△	△	×	○
低熱セメントの使用	◎	◎	×	○	○
膨張材の添加	×	◎	○	◎	○
プレクーリング	○	○	◎	◎	×
パイプクーリング	◎	◎	◎	○	△
保温養生	◎	×	◎	△	△
ひび割れ誘発目地	×	○	△	△	○
ひび割れ抑制鉄筋	△	△	○	○	◎

自律水温制御パイプクーリングシステム

『WIT P-Cool3A』の概要

『WIT P-Cool3A』の特徴

『**WIT P-Cool 3A**』は、マスコンクリートでの温度ひび割れ抑制として、パイプクーリングを実施する際に使用する冷却水循環装置。

Autonomously コンクリートの温度および外気温の変動に応じて、冷却水の水温を自律的に制御できる。

All in One 水温制御用のインバータチラー、貯水タンク、送水用ポンプ、分岐ヘッダ・集合ヘッダ、流量計、温度計、自律水温制御装置など、パイプクーリングに必要な機材を全て備えている。
コンクリート躯体内に配置されたパイプに接続するだけで、すぐにパイプクーリングを実施できる。

Adaptability 送水用ポンプとしてインバータポンプ×2台(標準用、高揚程用)を備えており、揚程35mまで送水することができることや、最大8系統まで独立して流量調整できることなど、幅広い現場条件に適応できる。

『WIT P-Cool3A』の特徴

冷却装置

循環水槽

制御機器

分配／集合配管

長さ = 5.30 m
幅 = 1.80 m
高さ = 2.30 m
重さ = 3.50 t

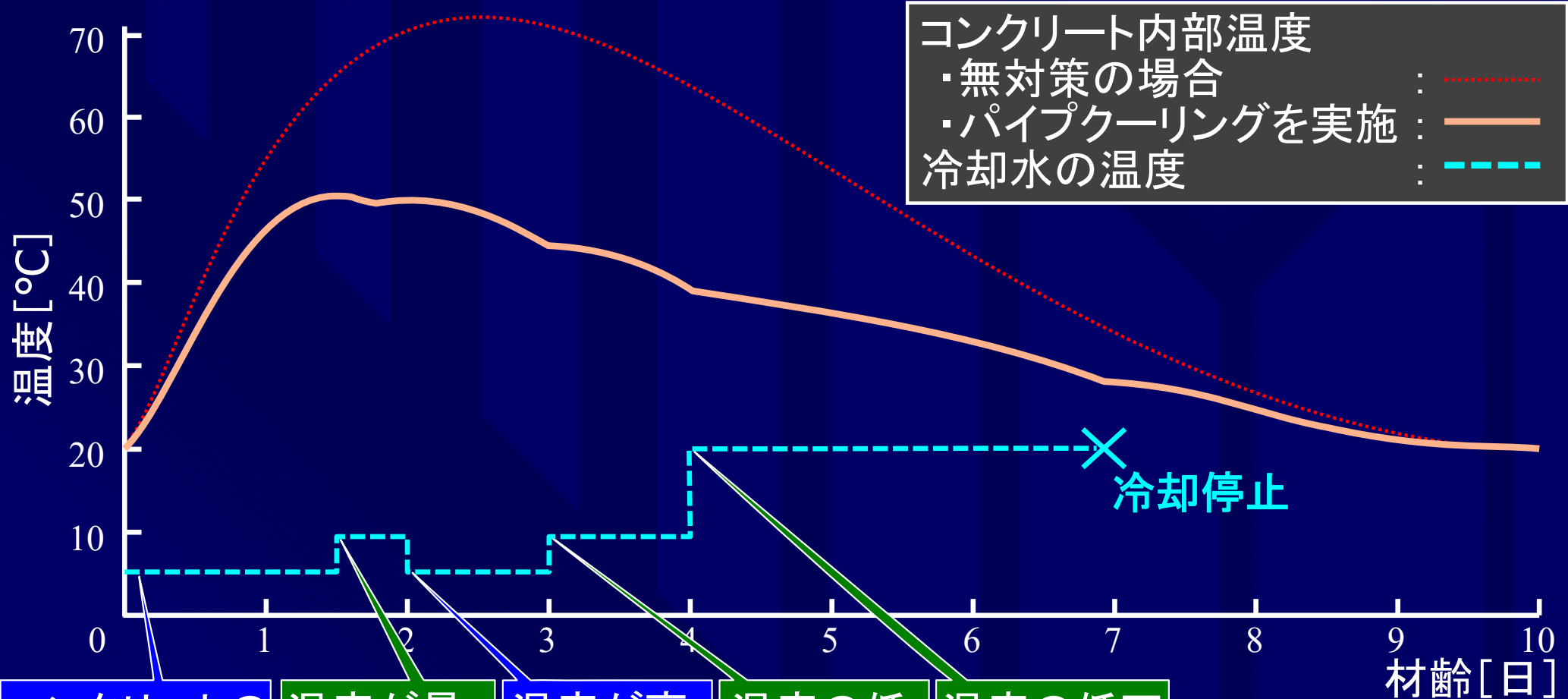


自律水温制御のイメージ

最高温度を下げる。

最高温度に達した後は、温度を緩やかに低下させる。

目標温度まで低下したら、冷却を停止する。



コンクリートの発熱が多い期間は、高い能力で冷却する。

温度が最高に達したので、冷却を弱める。

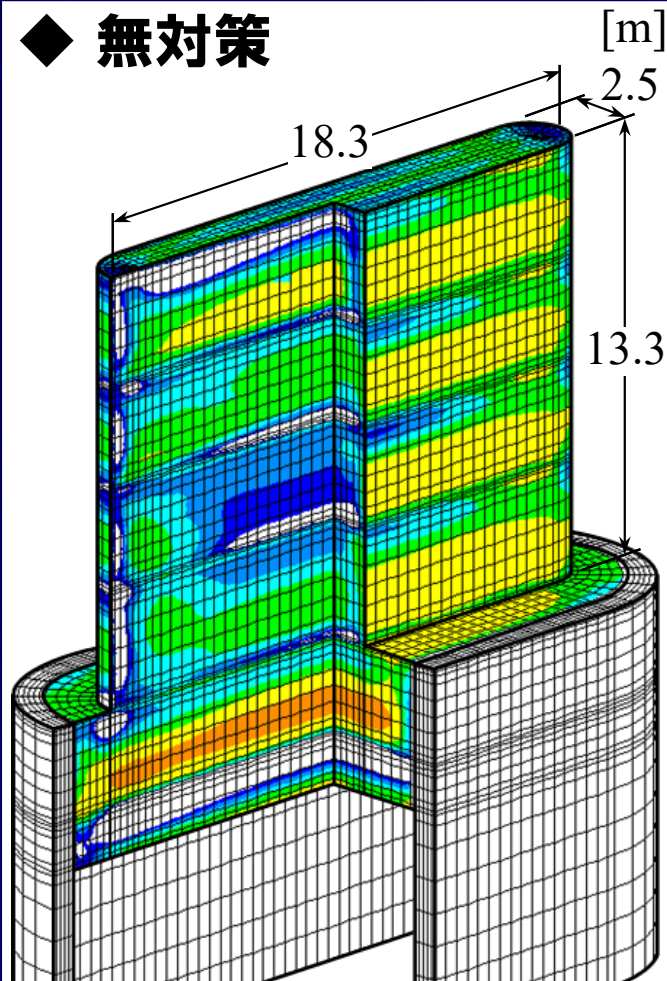
温度が高くなり始めたので、冷却を強くする。

温度の低下速度が速いので、冷却を弱める。

温度の低下速度が速いので、さらに冷却を弱める。

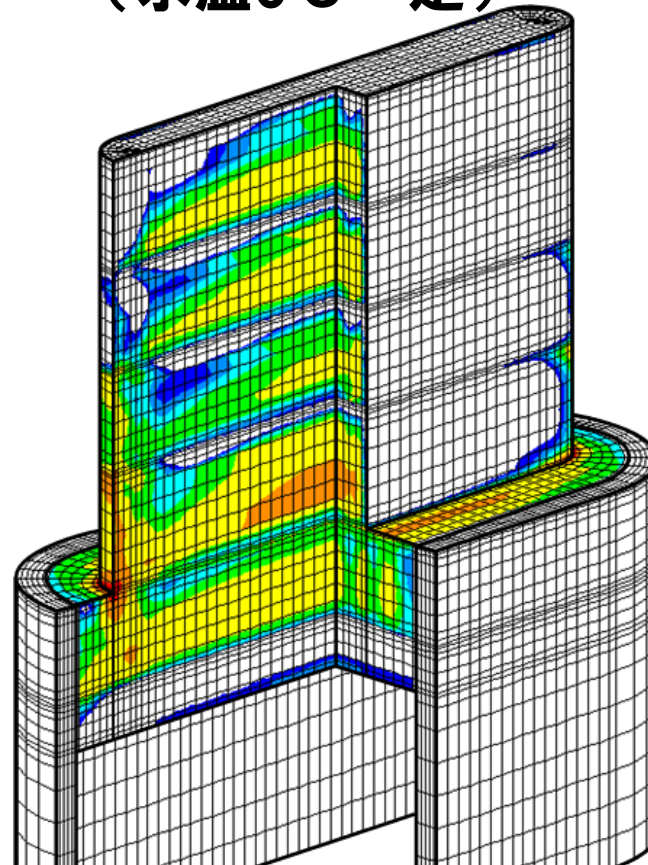
『WIT P-Cool3A』は、この水温制御を自律的に行う。

◆ 無対策



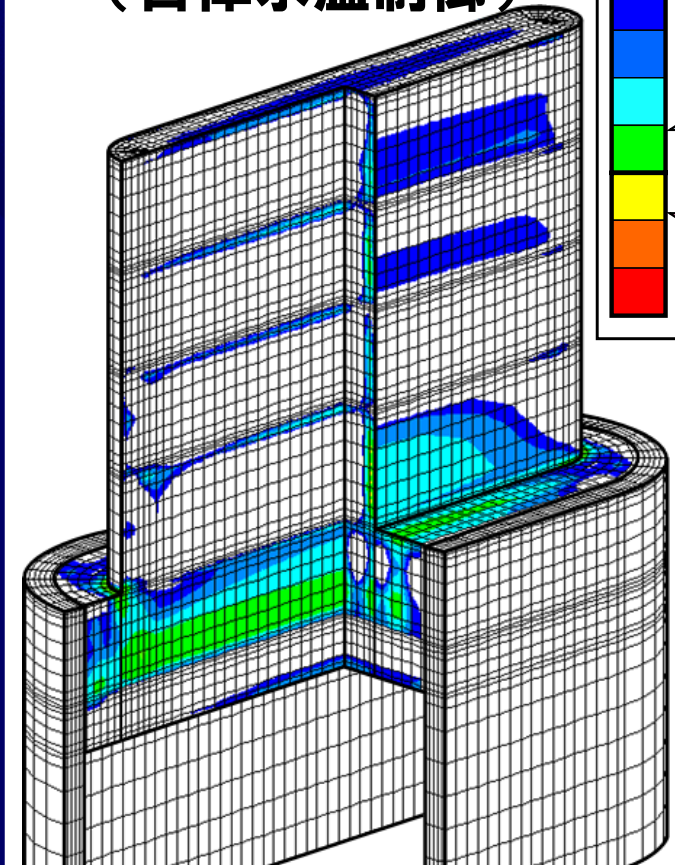
- ・ 頂版の内部と表面、および躯体の表面で、温度ひび割れが発生すると予測された。

◆ パイプクーリング (水温5℃一定)

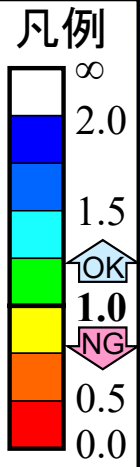


- ・ パイプクーリングによって、躯体表面のひび割れは抑制できるが、躯体内部にひび割れが発生する。これは、温度低下時の過冷却が原因。

◆ パイプクーリング (自律水温制御)



- ・ コンクリートが最高温度に達した後、段階的に冷却水の温度を上げることで、橋脚全体のひび割れ指数を1.0以上に改善できる。



『WIT P-Cool3A』の適用事例

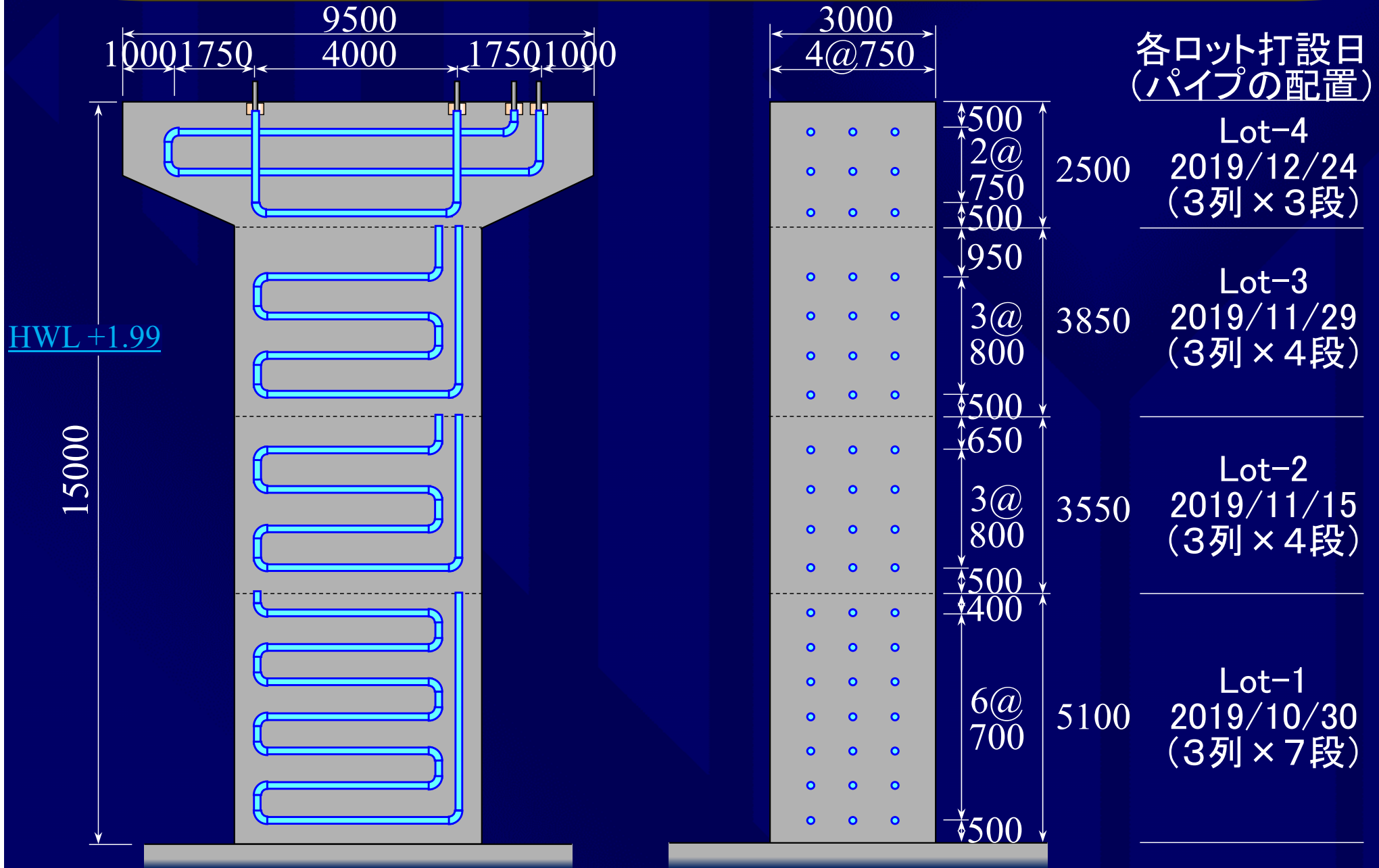
中国地方の橋梁下部等工事



下部工の施工条件

		P2	P3	P1
基礎工形式		鋼管矢板井筒基礎		
使用セメント		高炉セメントB種		
単位セメント量		329 kg/m ³		345 kg/m ³
水セメント比		48.9 %		50.0 %
コンクリートの打設日	頂版	2019/10/16	2019/10/31	2021/ 9 /20
	Lot-1	10/30	11/19	10/18
	Lot-2	11/15	12/ 6	11/ 1
	Lot-3	11/29	12/25	11/22
	Lot-4	12/24	2020/ 1 /22	—
パイプクーリングの方法	冷却水温 (自律制御)	① 温度差が拡大している間は 7°C ② 温度差が30°C以下になるまでは 15°C ③ 上記②が終了した後は 20°C		
	流量	15~20 リットル/分		
	冷却期間	打設から 4日間		5日間

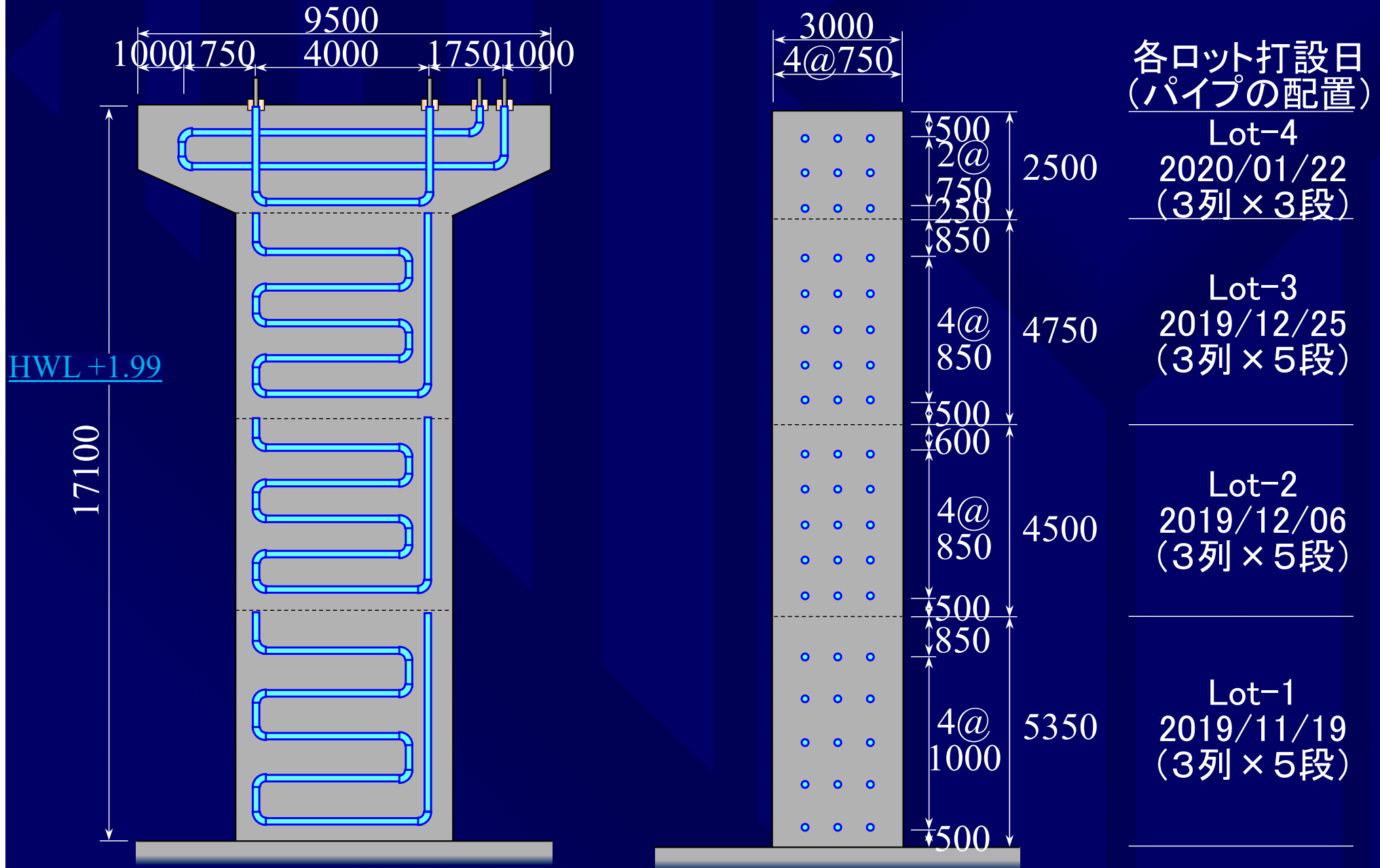
下部工の形状寸法、およびパイプの配置 [P2] ^{p.20}



 冷却用パイプ

[mm]

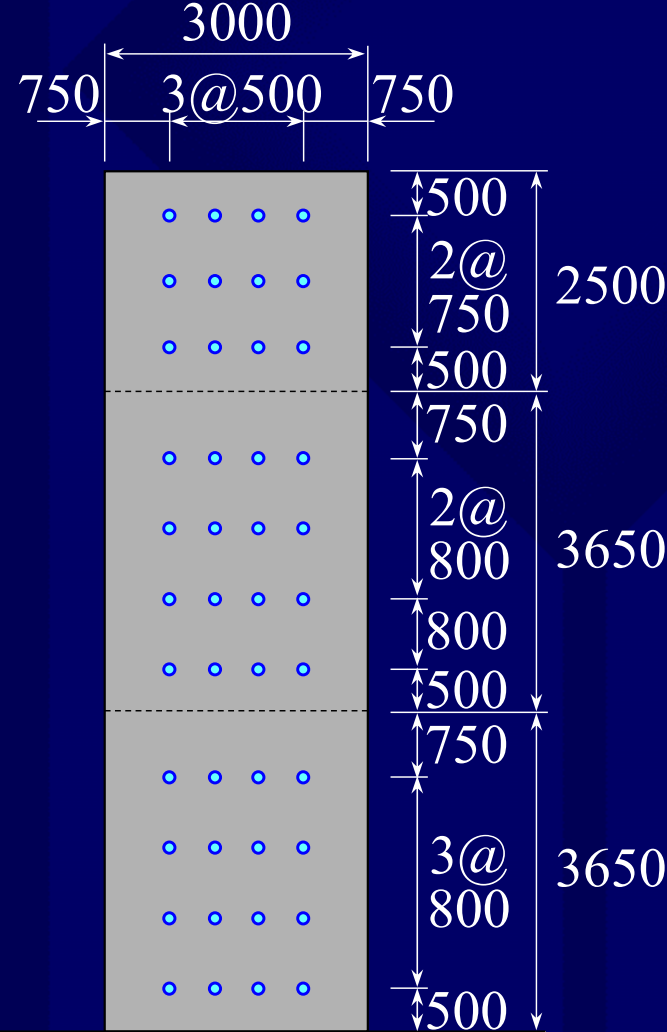
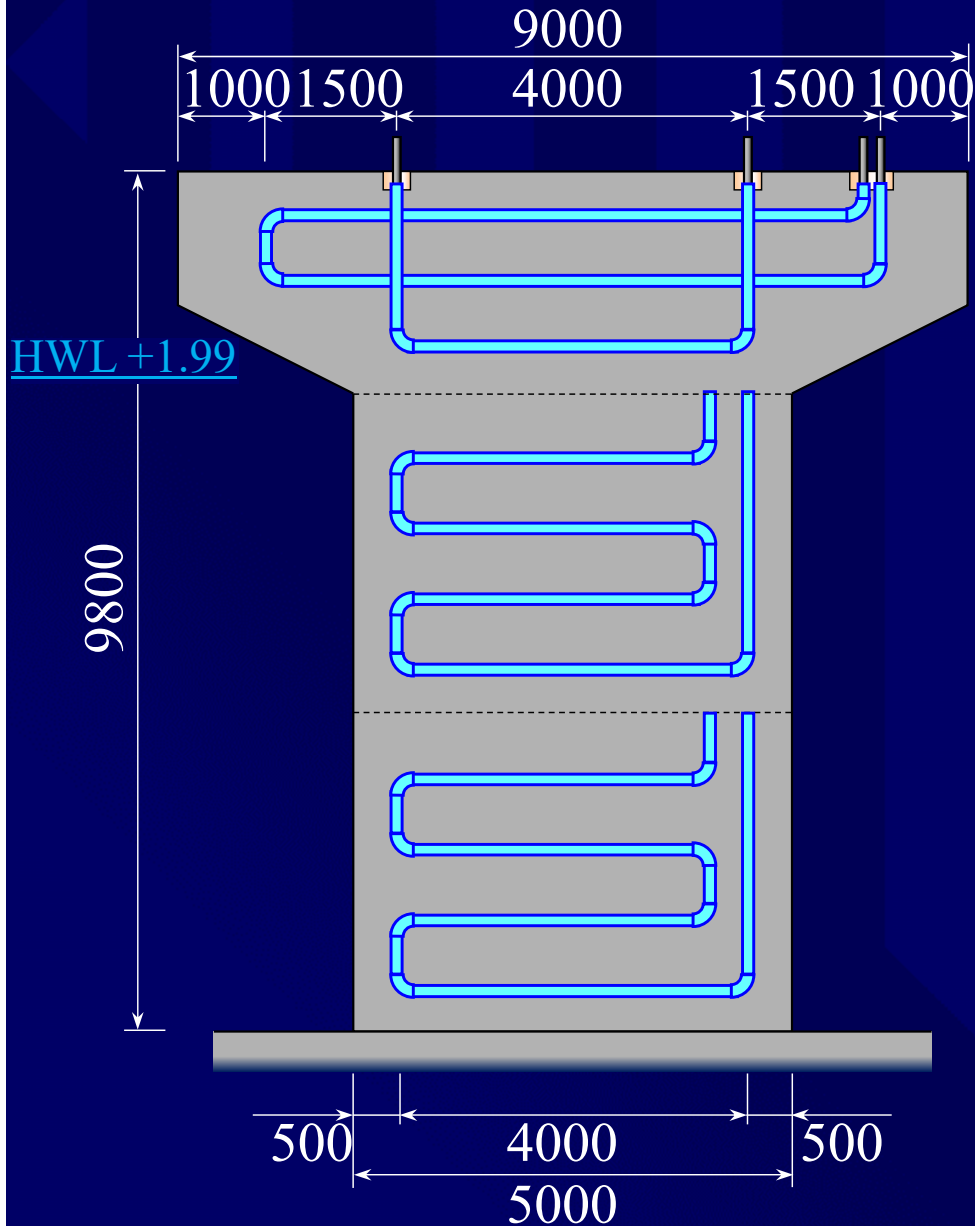
下部工の形状寸法、およびパイプの配置 [P3] ^{p.21}



 冷却用パイプ

[mm]

下部工の形状寸法、およびパイプの配置 [P1] p.22



各ロット打設日
(パイプの配置)

Lot-3
2021/10/19
(4列 × 3段)

Lot-2
2021/10/19
(4列 × 4段)

Lot-1
2021/10/12
(4列 × 4段)

冷却用パイプ

[mm]

施工前の温度応力解析による予測 [P2]

【無対策】

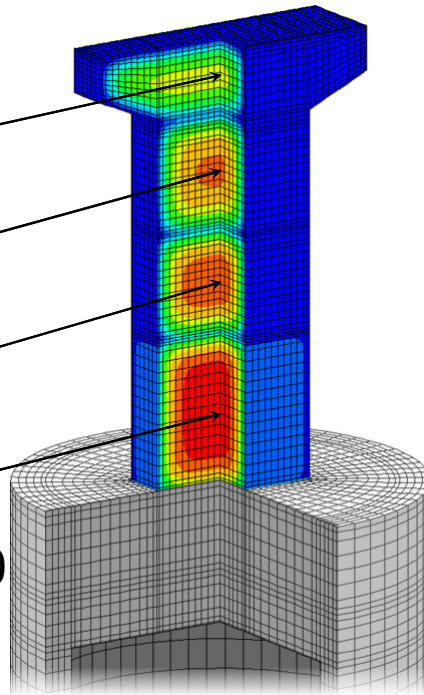
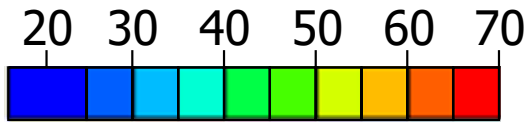
最高温度

52.3°C

60.4°C

63.7°C

65.2°C



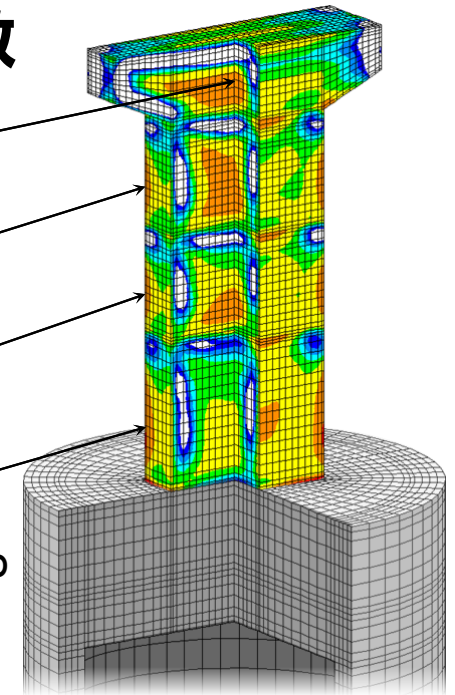
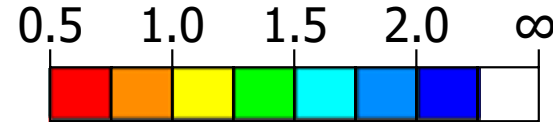
最小ひび割れ指数

0.79

0.76

0.79

0.71



【パイプクーリング】

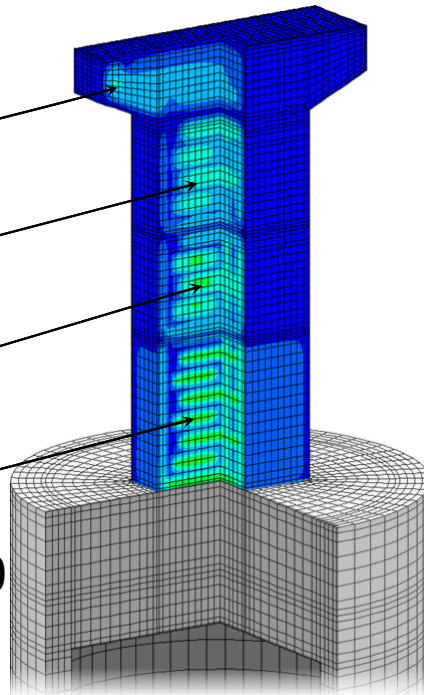
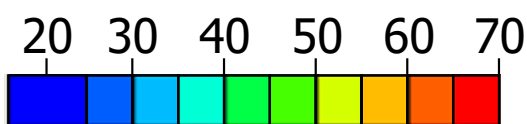
最高温度

37.7°C

37.8°C

40.6°C

46.5°C



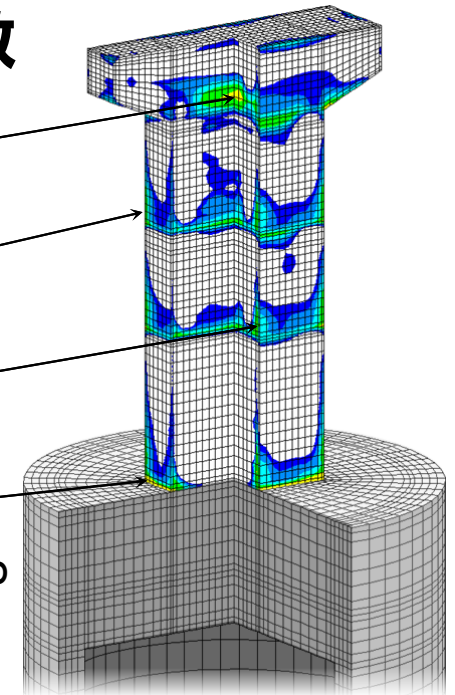
最小ひび割れ指数

1.15

1.14

1.17

1.07



施工前の温度応力解析による予測 [P3]

【無対策】

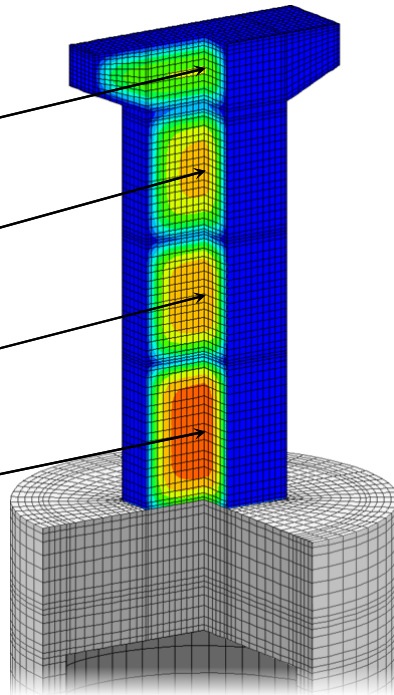
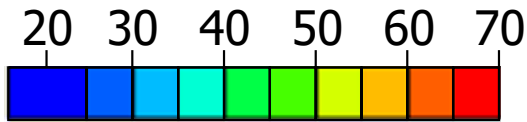
最高温度

50.2°C

56.6°C

59.9°C

63.7°C



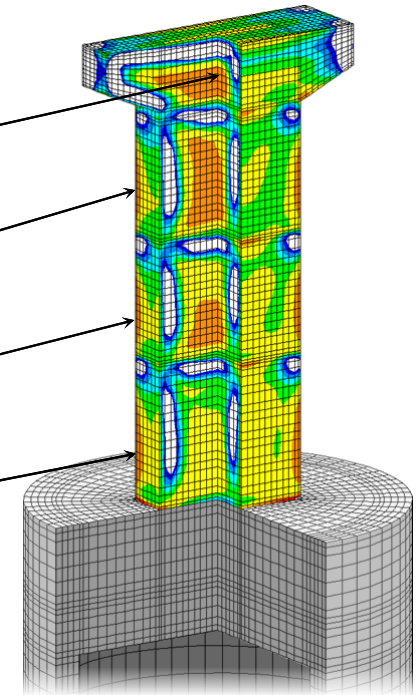
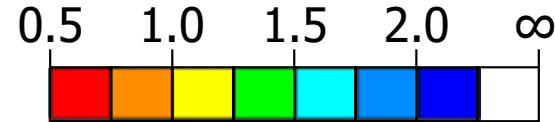
最小ひび割れ指数

0.78

0.80

0.78

0.75



【パイプクーリング】

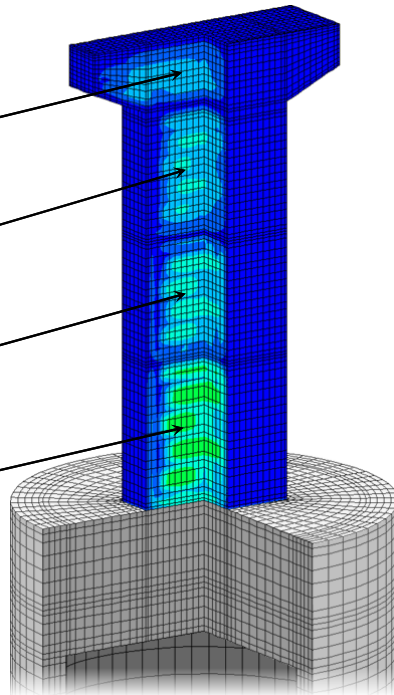
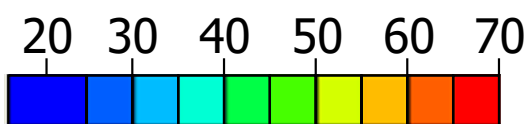
最高温度

32.6°C

36.0°C

38.7°C

43.8°C



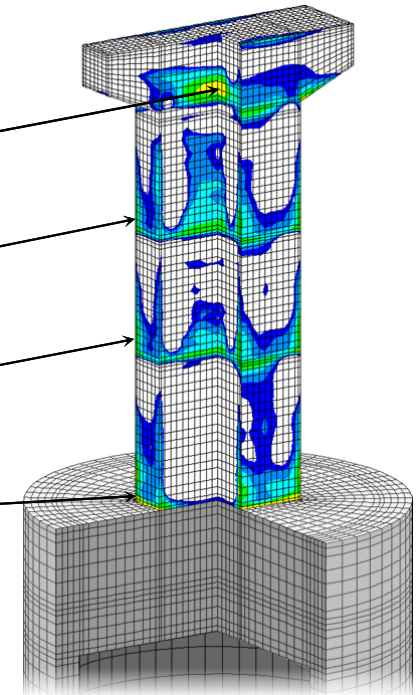
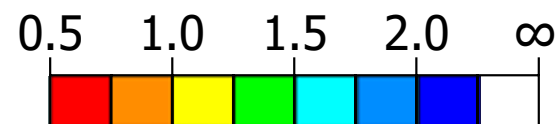
最小ひび割れ指数

1.10

1.10

1.09

1.04



施工前の温度応力解析による予測 [P1]

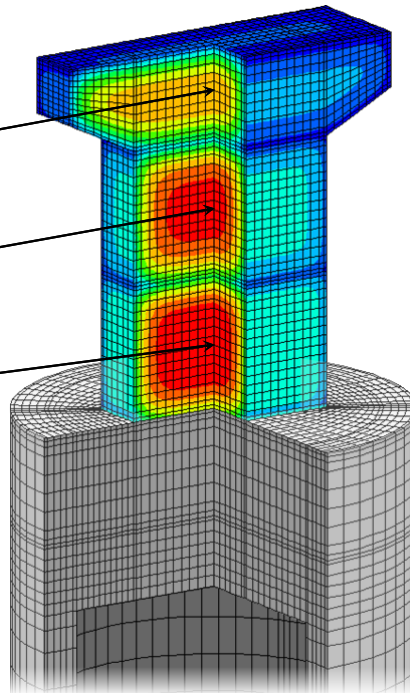
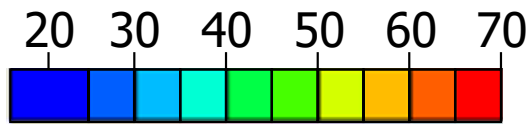
【無対策】

最高温度

59.4°C

68.0°C

71.4°C

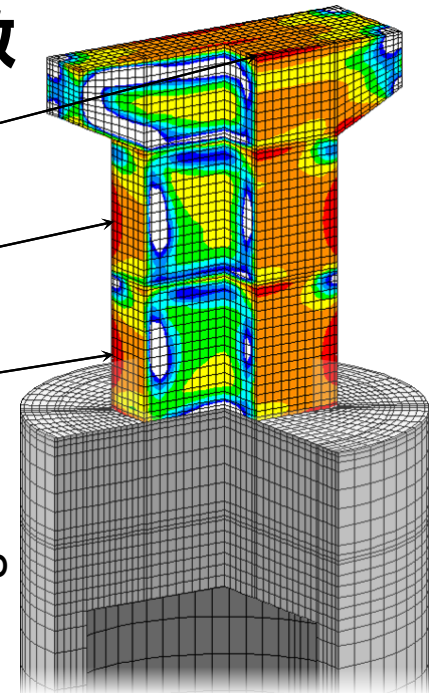
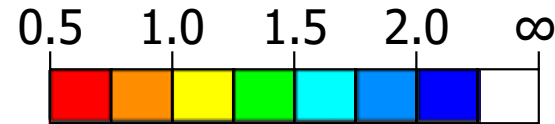


最小ひび割れ指数

0.63

0.51

0.49



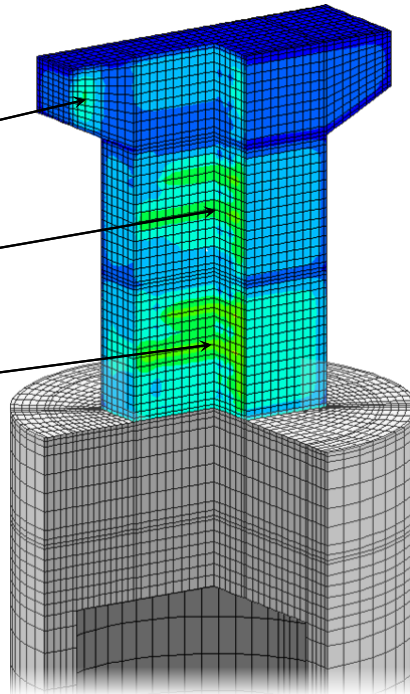
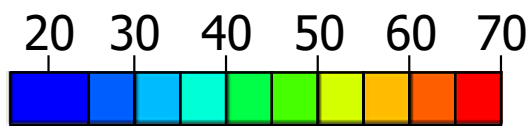
【パイプクーリング】

最高温度

39.5°C

44.5°C

48.0°C

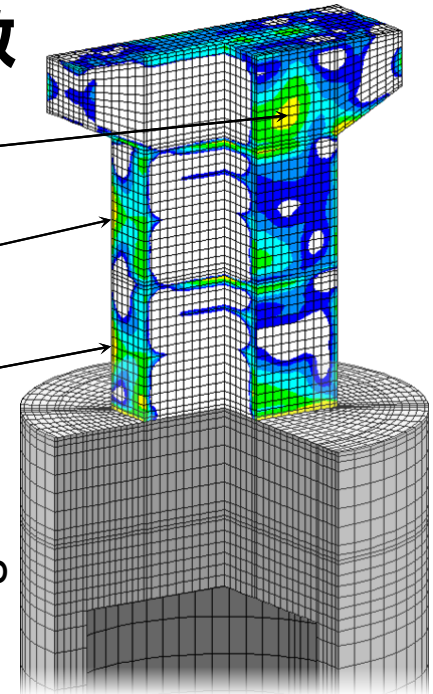
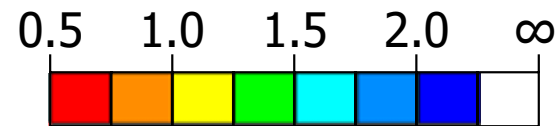


最小ひび割れ指数

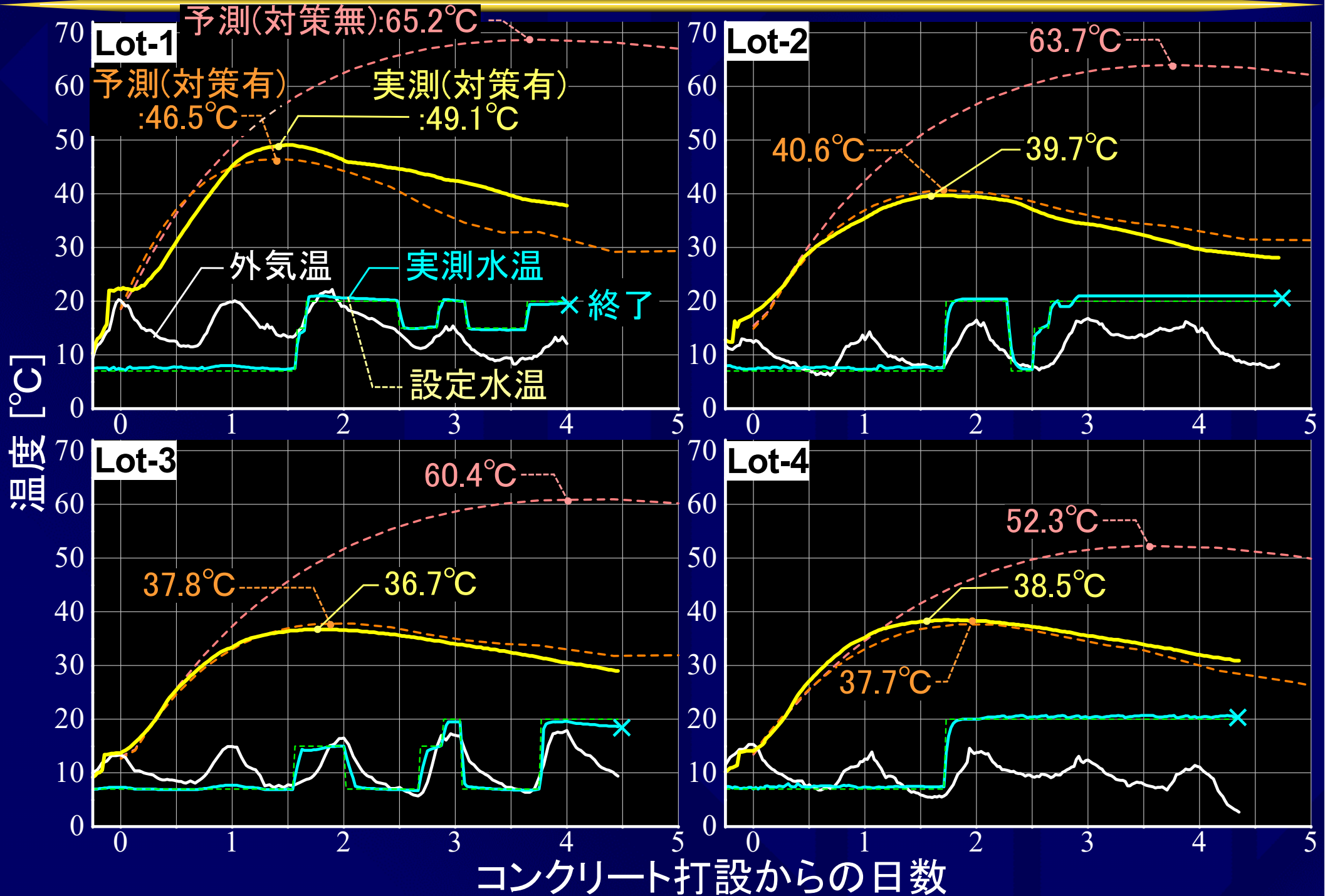
1.07

1.05

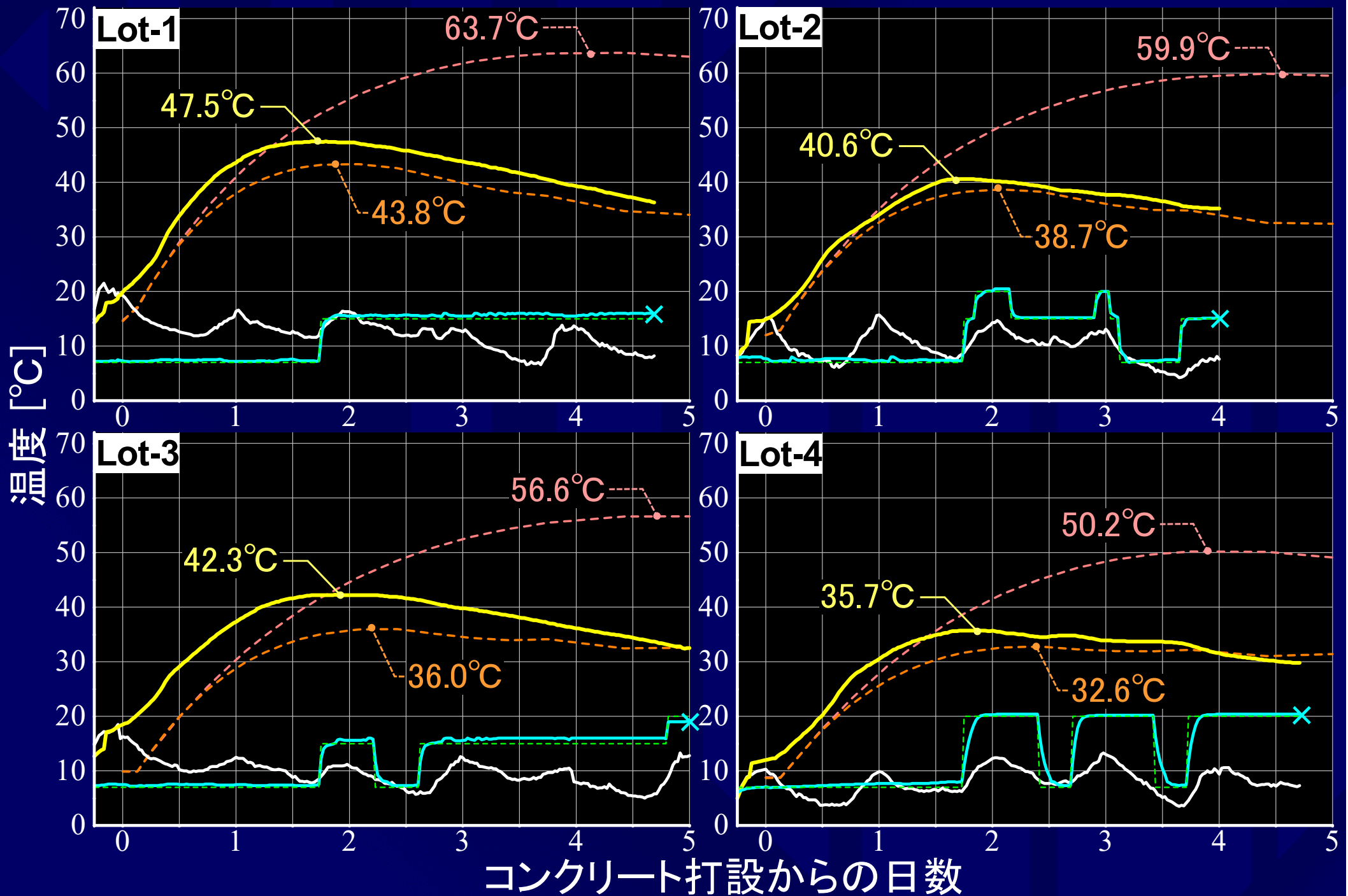
1.04



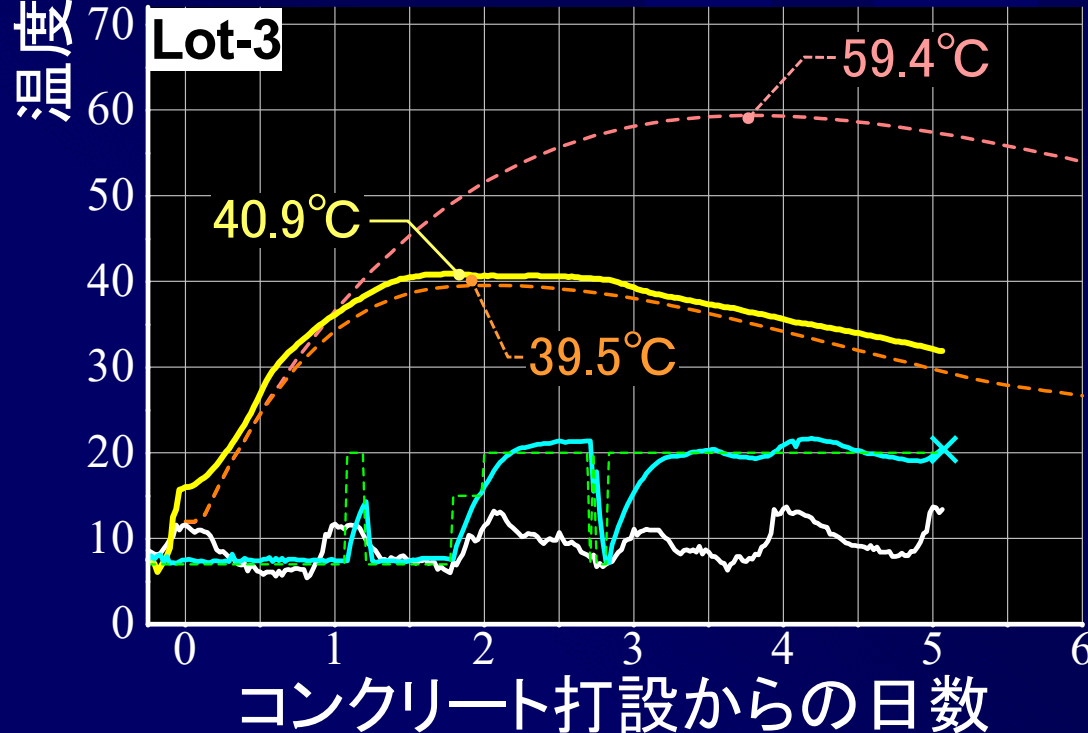
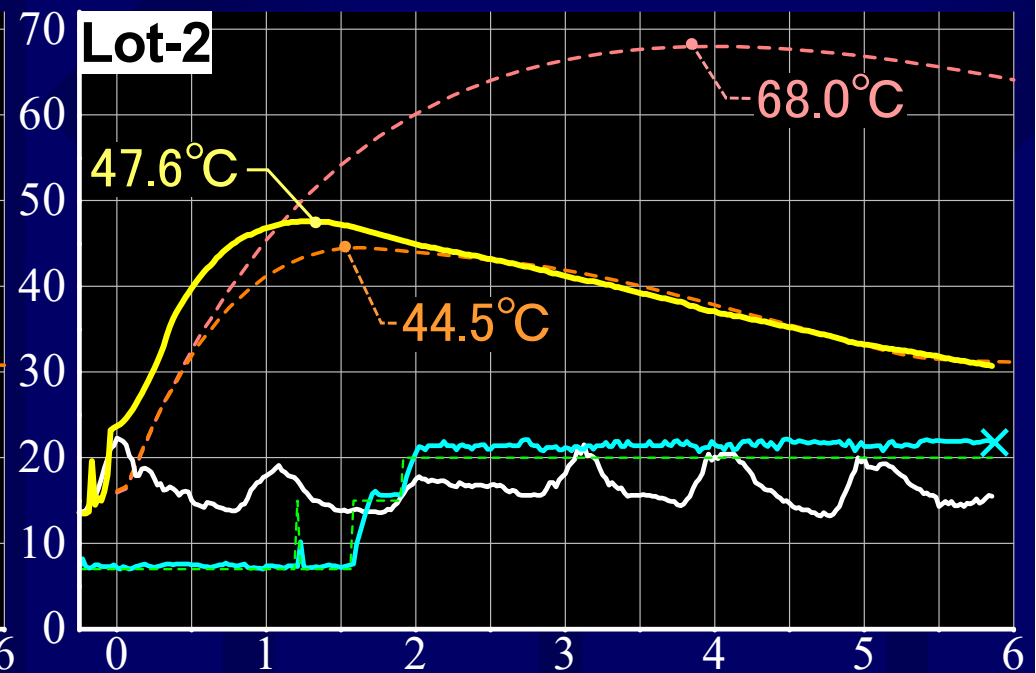
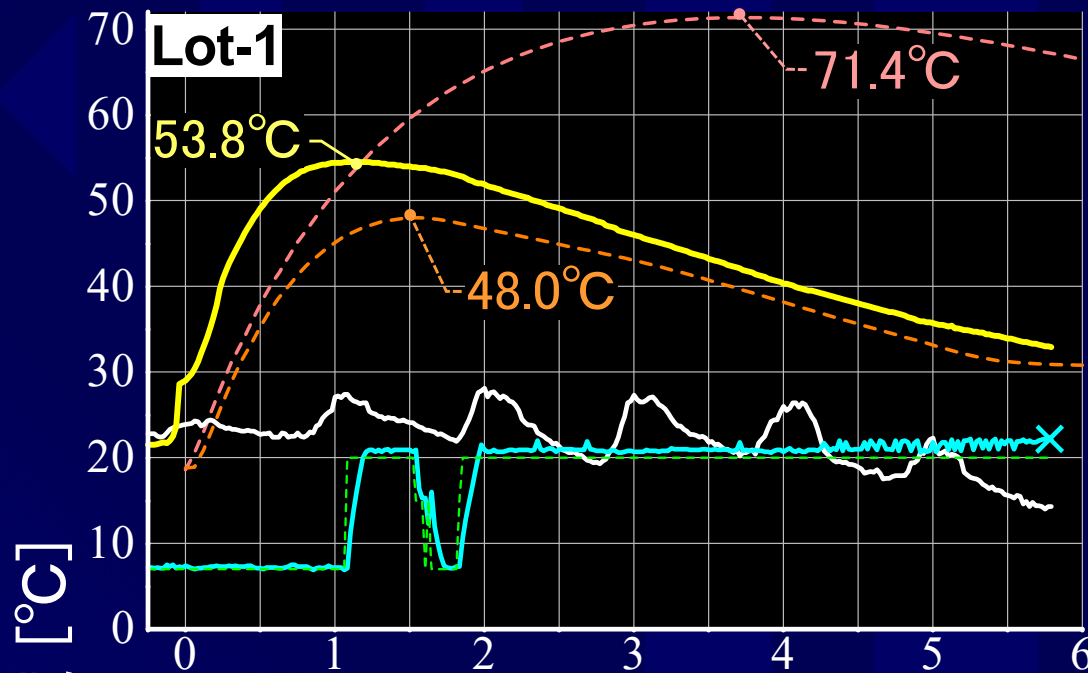
実施工での温度の計測結果 [P2]



実施工での温度の計測結果 [P3]



実施工での温度の計測結果 [P1]



P1～P3を通して、

- 1) コンクリート内部の最高温度について、事前解析による予測と、実測結果とでは-1.1～6.3°Cの差があったが、打設時のコンクリート温度の違いを差し引くと、温度上昇量はほぼ一致した。
- 2) 冷却水の温度は、若干の遅れはあるが、設定水温に良く追随した。
- 3) 以上から、コンクリートの温度を計画通りに制御できた。

まとめ

- 1) 自律水温制御パイプクーリングシステム『WIT P-Cool 3A』の概要を説明した。このシステムの目的は、過冷却を抑制しながら、パイプクーリングを確実に行うことである。
- 2) 中国地方の橋梁下部工事において、温度ひび割れ対策として、『WIT P-Cool3A』を用いたパイプクーリングを行った。
 - ・ 事前解析では、各ロットの最小ひび割れ指数を、無対策の場合の0.49～0.80から、1.04～1.07へ改善できると予測された。
 - ・ コンクリート温度を実測した結果、温度上昇量は事前解析とほぼ一致し、コンクリートの温度制御を計画通りに実施できた。
 - ・ 実構造物において、温度応力によるひび割れは発見されず、温度ひび割れを完全に防止できた。