

第10回 温度応力解析（その2） PC 構造物への適用

講師：奥 貴規*

1. はじめに

前回の講座では、温度応力解析の基礎知識およびモデル作成にあたっての注意事項について解説をしました。今回は、PC 構造物への適用事例を紹介します。

本講座では、3 径間連続ラーメン PC 箱桁橋を対象としておりますので、張出し架設を行う PC 箱桁橋の柱頭部の温度応力解析事例を紹介します。ここでは、解析モデルの概要と、温度ひび割れ対策の事例として、コンクリートの配合変更、パイプクーリングの2例について紹介します。

2. 解析概要および解析条件

2.1 解析概要

張出し架設を行う PC 箱桁橋の柱頭部横桁は、部材寸法が大きいため、マスコンクリートとしての取扱いが必要となります。そこで、温度ひび割れの発生が懸念される箇所を特定するために、実施工を踏まえた温度応力解析を行い、有害なひび割れが発生しないように対策を行います。

2.2 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルを図 - 1 に示します。解析モデルは、対称性を考慮した 1/4 モデルとし、高さ 5 m、長さ 6 m（橋軸

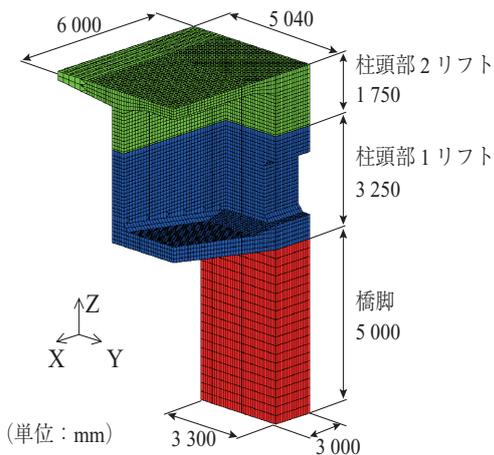


図 - 1 解析モデル

方向) とします。メッシュ間隔（橋軸方向および橋軸直角方向）は、着目する横桁部を 100 mm、張出し部を 125 mm、橋脚を 250 mm としました。

温度応力解析には、有限要素法による 3 次元温度応力解析プログラム「ASTEAMACS (株) 計算力学研究センター」を使用しました。

(2) 拘束条件

拘束条件を図 - 2 に示します。橋軸方向 (X 方向) および橋軸直角方向 (Y 方向) は対称面を拘束し、橋脚下端は鉛直方向 (Z 方向) を拘束しています。

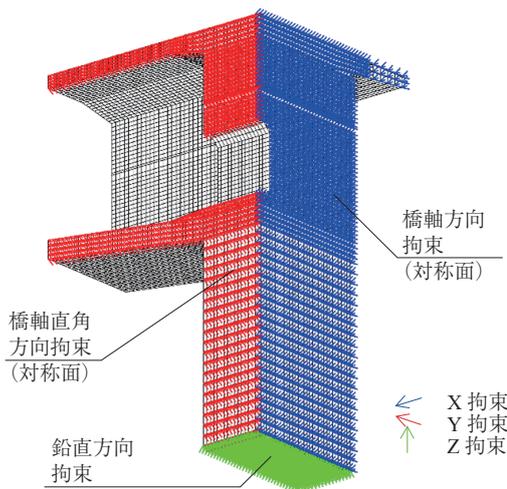


図 - 2 拘束条件

(3) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表 - 1 に示します。実際に施工で用いるコンクリートの配合を用います。

表 - 1 コンクリートの配合

	単位質量 (kg)		セメント種別	
	水 W	セメント C		
橋脚	171	359	普通	
柱頭部	1 リフト	168	437	早強
	2 リフト	168	437	早強

* Takanori OKU : (株) 富士ピー・エス

(4) コンクリートの施工工程および打込み温度

コンクリートの施工工程および打込み温度を表 - 2 に示します。施工工程は実施工の工程を反映させます。外気温は、過去3年の平均気温を用いています。コンクリートの打込み温度は、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008¹⁾」より「外気温+5℃」としています。

表 - 2 コンクリートの施工工程および打込み温度

		施工日	外気温 (℃)	打込み温度 (℃)
橋脚		7月下旬	27	32
柱頭部	1リフト	9月上旬	25	30
	2リフト	10月上旬	20	25

(5) 材料物性値および熱伝達率条件

材料物性値および熱伝達率条件は、「2012年制定コンクリート標準示方書²⁾」および「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」に準拠して設定します。材料物性値は、前回の講座で標準的な材料物性値を紹介していますので、本講座では省略します。型枠設置（あるいは養生）期間における熱伝達率条件の設定例を図 - 3 に示します。

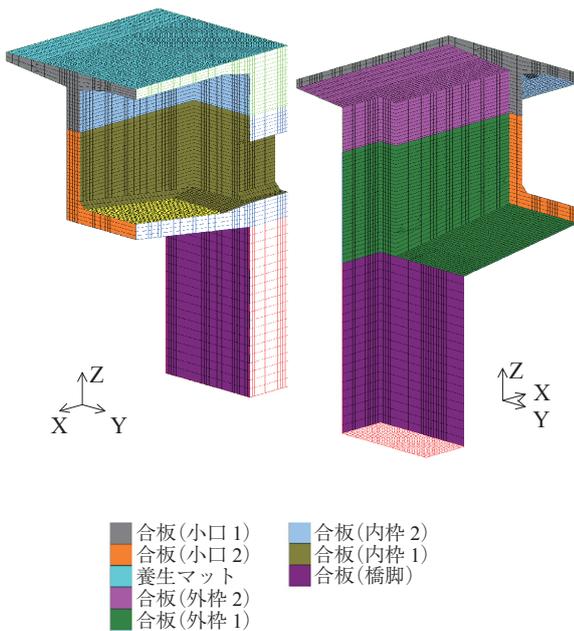


図 - 3 熱伝達率条件の設定例

3. 温度応力解析事例

柱頭部の温度応力解析事例を紹介します。本講座では、温度ひび割れ対策として、「コンクリートの配合変更」と「パイプクーリング」について紹介します。

3.1 コンクリートの配合変更

PC橋の場合、設計時のセメント種別は早強セメントとなっていることが多く、横桁内部では、コンクリート温度が高くなる傾向にあります。そこで、コンクリートの内部温度を低減するために、コンクリートの配合の変更を検討します。本講座では、早強セメントと普通セメントの比較

を行います。

(1) コンクリートの配合

表 - 3 に検討ケースを示します。本事例では、横桁内部の最高温度が100℃以上となる柱頭部1リフトを、コンクリートの配合の変更対象とします。

表 - 3 検討ケース

	柱頭部1リフト	柱頭部2リフト
	セメント種別	セメント種別
CASE 1	早強セメント	早強セメント
CASE 2	普通セメント	早強セメント

(2) 解析結果

最高温度分布を図 - 4 に示します。

柱頭部1リフト内部の最高温度を比較すると、コンクリートの配合を変更することにより、-8.2℃の低減効果が確認できます。

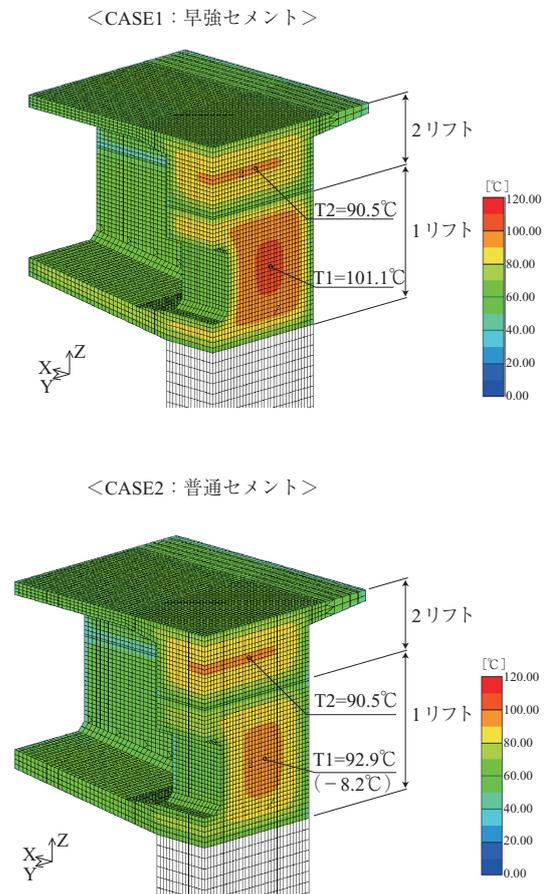


図 - 4 最高温度分布（コンクリートの配合変更）

経験最小ひび割れ指数分布を図 - 5 に示します。

ひび割れ指数を見ると、早強セメントから普通セメントへ変更することにより、ひび割れ指数が1.0未満の範囲は小さくなりましたが、ひび割れ指数の最小値は変わらない結果となっています。発生する引張応力に対して、コンクリートの初期材齢の引張強度が小さくなったことが要因の一つとして考えられます。

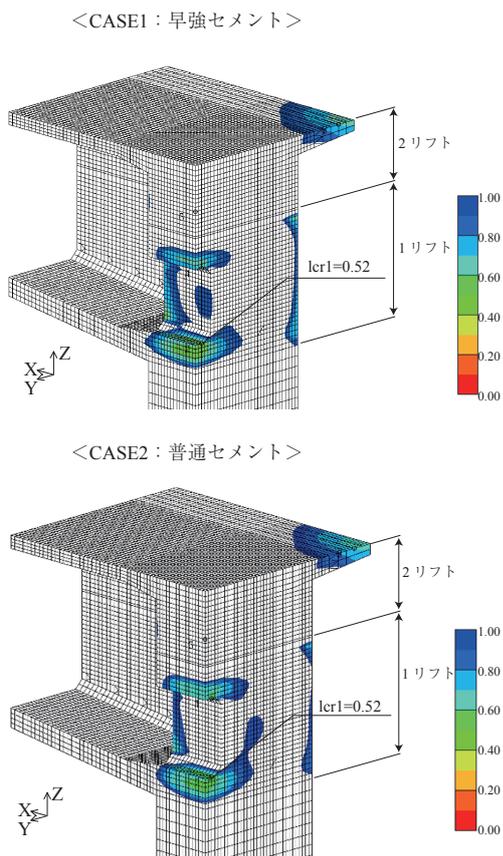


図 - 5 経験最小ひび割れ指数分布 (コンクリート配合変更)

3.2 パイプクーリング

コンクリートの水和熱による内部温度を下げる方法として、パイプクーリングがあげられます。パイプクーリングは、初期材齢における内部温度の低減を目的として実施され、温度ひび割れに対して直接的効果があるため、柱頭部横桁や橋台・橋脚などのマスコンクリート構造物に適用されています。パイプクーリングは、冷却媒体に空気を用いる「空冷式」と、水を用いる「水冷式」に分けられます。

3.2.1 パイプクーリングの解析条件

解析条件は、「2012年制定コンクリート標準示方書」および「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」に準拠して設定します。

クーリングパイプには、1インチ（外径 34.0 mm，内径 27.6 mm）の薄肉電線管や水道用亜鉛めっき鋼管（SGPW）、配管用炭素鋼管（SGP）が用いられます。空冷式の場合には、PC 鋼材用シーブスが用いられています。

(1) パイプ配置

クーリングパイプの配置間隔は、冷却効果が集中または分散しないように 50～70 cm 間隔で配置します。

(2) 通風温度および通水温度

空冷式における通風温度は、空気を使用しますので外気温と同じ温度に設定します。

水冷式における通水温度は、通水温度が低いほどクーリング効果は大きいですが、低すぎるとクーリングパイプ周

辺のコンクリートとの温度勾配が大きくなり、ひび割れの発生を助長することにもなります。「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」では、「通水温度とクーリングパイプ周辺のコンクリートとの温度差は 20℃程度以内とするのが良い」とありますので、通水温度設定時に注意が必要です。

(3) 通風時間および通水時間

部材寸法や使用するセメントの種類によって、内部温度が最高温度に到達する時期が異なるため、通風時間および通水時間は、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」および温度解析結果や実績等を参考にして設定するのが良いです。今回は、クーリング期間を、柱頭部横桁内部が最高温度に達する時間から半日程度延長した時間に設定しました。

(4) 風速および通水量

空冷式における風速は、使用する機材の能力に応じた数値を設定する必要があります。

水冷式における通水量は、使用する機材の能力にも応じますが、1インチのクーリングパイプを用いる場合には、毎分 10～20 リットルの範囲で通水している事例が多いです。

(5) 熱伝達率

空冷式の場合は、「2012年制定コンクリート標準示方書」に準拠して設定します。「熱伝達率に及ぼす風速の影響については、通常のコンクリートの露出面では、風速 2～3 m/s の場合、熱伝達率は 12～14 W/m²℃であり、風速の増加に伴い、熱伝達率は増加し、その増加割合の目安は風速 1 m/s あたり 2.3～4.6 W/m²℃程度である」という記述から、設定する風速に応じた熱伝達率 η を、式(1)により、算出します。

$$\eta = \beta + \Delta \beta \times (u - u_i) \dots\dots\dots(1)$$

- ここに、 η : 熱伝達率 (W/m²℃)
- β : 外気にふれる面の熱伝達率 (W/m²℃)
12～14 W/m²℃
- $\Delta \beta$: 風速による熱伝達率の増加割合 (W/m²℃)
風速 1 m/s あたり 2.3～4.6 W/m²℃
- u_i : 風速の標準値 (m/s), 2～3 m/s
- u : 風速 (m/s)

水冷式の場合は、田辺らの文献³⁾より、パイプ壁面とコンクリート面間の熱伝達率は、式(2)を用いて算出します。

$$h = 552 u + 50.0 \dots\dots\dots(2)$$

- ここに、 h : パイプ壁面とコンクリート面間の熱伝達率 (W/m²℃)
- u : 流速 (m/s)

3.2.2 解析結果

本講座では、空冷式パイプクーリングの解析事例を紹介いたします。空冷式パイプクーリングの解析条件を表 - 4 に示します。

表 - 4 空冷式パイプクーリング解析条件一覧

クーリングパイプ	鋼製シース+偏向管	柱頭部 1 リフト
	偏向管	柱頭部 2 リフト
通風温度	25℃ (外気温)	柱頭部 1 リフト
	20℃ (外気温)	柱頭部 2 リフト
通風時間	48時間	ひび割れ制御指針 2008 より
風速	10 m/s	
熱伝達率	38.875 W/m ² ℃	コンクリート標準示方書 2012 より

本事例のクーリングパイプ配置を図 - 6 に示します。クーリングパイプは、鋼製シースφ 45 mm を使用しました。また、柱頭部横筋には外ケーブルを定着するための偏向管 (SGP φ 140 mm) が配置されていることから、クーリングパイプとして使用しました。

空冷式パイプクーリング実施後の最高温度分布を図 - 7、経験最小ひび割れ指数分布を図 - 8 に示します。

コンクリート内部の最高温度は、空冷式パイプクーリングにより、柱頭部 1 リフトでは -14.1℃、柱頭部 2 リフトでは -15.1℃ の低減効果を確認することができます。

また、ひび割れ指数については、1.0 未満の分布が小さくなっていることから、パイプクーリングによる改善効果

が見られます。

なお、既設橋脚との打継目や人通孔付近の隅角部、張出し床版の先端などは、ひび割れ指数が 1.0 未満となっています。これは、既設コンクリートと新コンクリートとの収縮差、部材内部と人通孔部や張出し床版との収縮差に起因しているものと考えられます。このような箇所に対しては、補強鉄筋などのひび割れ対策を検討します。

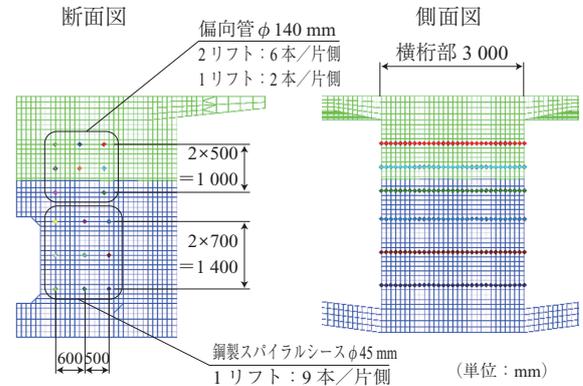
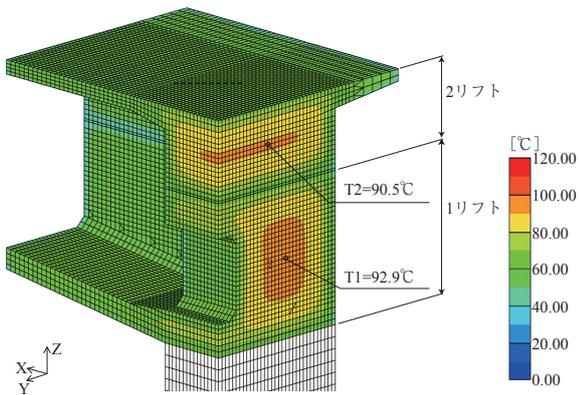


図 - 6 パイプ配置例

<CASE2: パイプクーリングなし (普通セメント)>



<CASE3: パイプクーリングあり (普通セメント)>

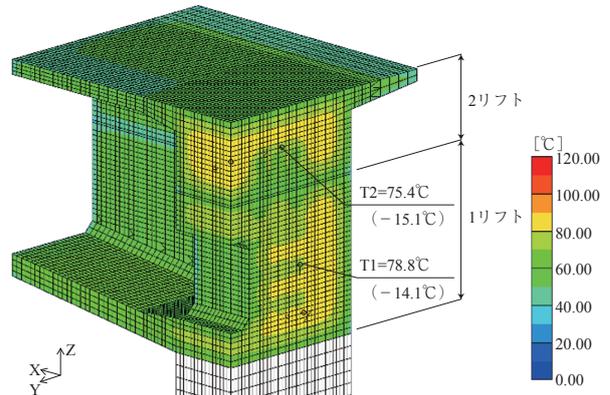
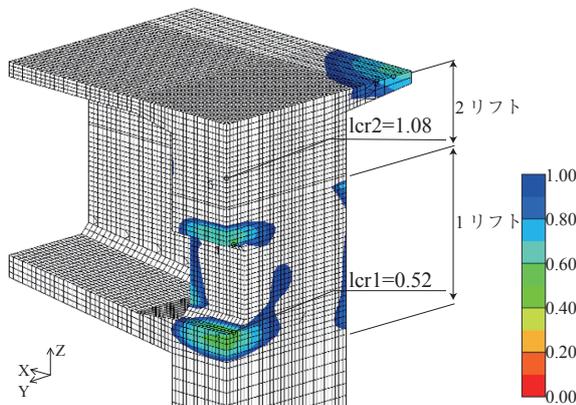


図 - 7 最高温度分布 (パイプクーリング)

<CASE2: パイプクーリングなし (普通セメント)>



<CASE3: パイプクーリングあり (普通セメント)>

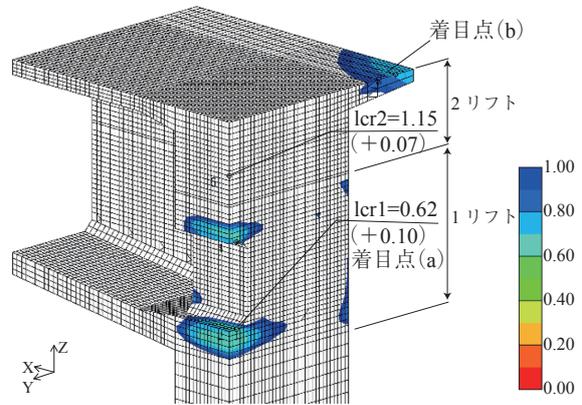


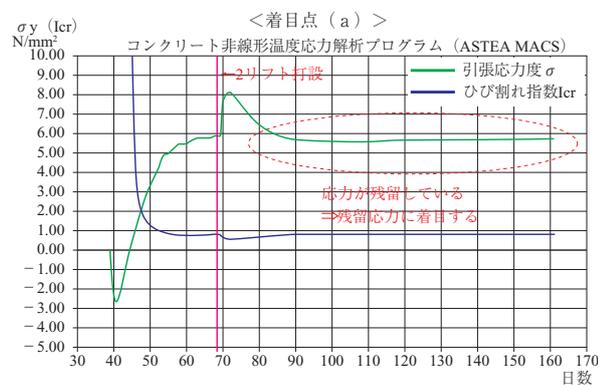
図 - 8 経験最小ひび割れ指数分布 (パイプクーリング)

3.3 補強鉄筋算出時の留意点

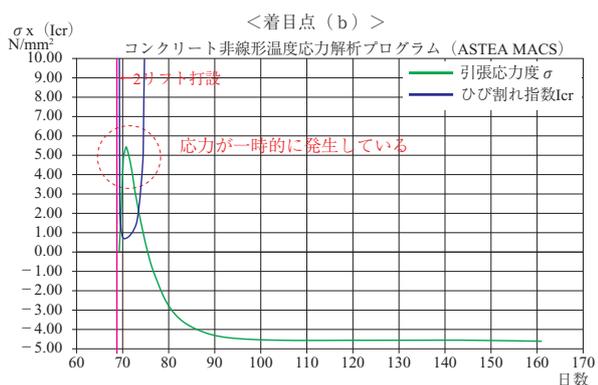
補強鉄筋の算出方法は、前回の講座を参考にしていたが、本講座では、補強鉄筋算出時の留意点を紹介します。今回は、補強鉄筋の配置検討の一例として、図 - 9 に示す引張応力度とひび割れ指数の履歴図を用いて説明します。

図 - 9 (a) には、既設橋脚部との打継目付近 (図 - 8 右の着目点 (a)) の履歴図を示します。この図のように、発生する引張応力が残留する場合は、その引張応力に対して、算出した必要鉄筋量を配置しますが、その際、設計計算により決定している鉄筋を考慮せず、補強鉄筋を追加で配置します。

つづいて、図 - 9 (b) には、張出床版の先端 (図 - 8 右の着目点 (b)) の履歴図を示します。この図のように、引張応力が一時的に発生する場合は、設計計算により決定している鉄筋量を含め、配置される全鉄筋量を考慮し、既設鉄筋量に対して不足する鉄筋量を補強鉄筋として配置します。



(a) 発生する引張応力が残留する場合



(b) 引張応力が一時的に発生する場合

図 - 9 引張応力とひび割れ指数の履歴図

4. おわりに

本講座では、張出し架設を行う PC 箱桁橋における柱頭部温度応力解析の事例を紹介しました。

コンクリートの配合については、本講座では早強セメントと普通セメントの比較を行いました。その他、低熱セ

メントや中庸熱セメントなど、より発熱量の小さいセメントの使用も考えられます。PC 橋は、プレストレス導入時期を考慮する必要があるため、これらのセメントを使用する場合は、コンクリートの強度発現の期間を長く確保するなど、工程に直接影響してきます。コンクリートの配合は、温度ひび割れ抑制のほか、さまざまな施工条件を考慮して決定するのが良いでしょう。

パイプクーリングについては、熱伝達率の設定が解析結果に大きく影響します。本講座で紹介した空冷式の場合、与える風速によって熱伝達率が変化しますので、実施工で使用する機材の能力に応じた熱伝達率を設定することが必要です。また、水冷式の場合、通水量によって熱伝達率が変化し、かつ水温の影響も受けますので、使用する機材に応じた条件を設定することが重要です。

補強鉄筋については、発生する引張応力が、残留する応力なのか、一時的に発生する応力なのかを判断し、適切な補強鉄筋の配置計画を行うことが必要です。

最後に、本講座が温度応力解析の事例として、参考となれば幸いです。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
- 2) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]
- 3) 田辺 他: パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定並びに冷却効果の解析, 土木学会論文報告集, 第 343 号, 1984.

5. むすびに

57 巻 1 号から連載をはじめました「PC 技術者のための構造解析入門」は、今回の第 10 回の講座をもって最終回となりました。以下に連載講座の掲載一覧を記し、むすびといたします。次回からは「知っておきたい PC 材料 (仮)」と題して、最新事情を踏まえた PC に用いる材料を紹介することにより、コンクリートの設計・施工・維持管理の最前線で活躍されている方々にとっての実務の一助となることを目的とした連載講座を開始します。次号からの講座にご期待ください。

「PC 技術者のための構造解析入門 (全 10 回)」

- 57 巻 1 号 第 1 回 構造解析の役割・変遷・今後
- 57 巻 2 号 第 2 回 骨組解析 (その 1) 基礎知識・モデルの作成
- 57 巻 3 号 第 3 回 骨組解析 (その 2) PC 構造物への適用
- 57 巻 4 号 第 4 回 耐震解析 (その 1) 耐震解析の基礎知識
- 57 巻 5 号 第 5 回 耐震解析 (その 2) 耐震解析の基礎技術
- 57 巻 6 号 第 6 回 耐震解析 (その 3) PC 構造物への適用
- 58 巻 1 号 第 7 回 FEM 解析 (その 1) 基礎知識・モデルの作成
- 58 巻 2 号 第 8 回 FEM 解析 (その 2) PC 構造物への適用
- 58 巻 3 号 第 9 回 温度応力解析 (その 1) 基礎知識・モデルの作成・評価と対策
- 58 巻 4 号 第 10 回 温度応力解析 (その 2) PC 構造物への適用

[2016 年 6 月 1 日受付]