報告　複合ラーメン橋剛結部の実物大寸法施工実験と温度解析

山並　真也[*1]・古内　仁[*2]・上田　多門[*3]・秋山　裕一[*4]

要旨：複合ラーメン橋の剛結部（橋台）として開発されたコンクリート充填鋼殻構造について，温度応力によるひび割れ発生の有無を確認するため，実橋橋台を切り出した実物大寸法の供試体を用いて施工実験を行った。また，施工実験前と施工実験終了後において，温度応力解析を実施した。鋼板とコンクリートの肌隙を考慮しない解析では，コンクリート収縮時において小さな値のひび割れ指数が広い範囲で分布した。肌隙を考慮した解析では，鋼殻による拘束が緩和され，全体的にひび割れ指数の値が大幅に向上した。施工実験終了後に供試体を切断して内部を観察した結果，温度ひび割れが全く生じていないことが確認された。

キーワード：複合ラーメン橋，剛結部，実物大供試体，施工実験，温度応力解析，ひび割れ指数

1. はじめに

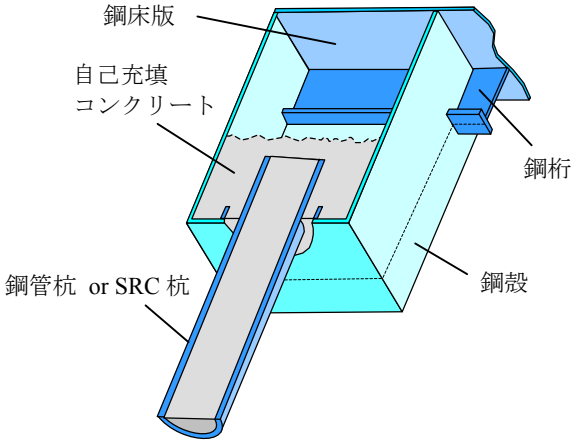
中小規模の橋梁を対象として，筆者らは構造性能および施工の合理性を追求するため，簡易な構造の複合ラーメン橋の剛結部（橋台）を考案した[1)]。本構造の概要を**図－1** に示す。この剛結部は，鋼桁が一体化された鋼殻構造に鋼管基礎杭を下部から貫入し，自己充填コンクリートを充填して一体化させた構造である。本構造の鋼殻内にはずれ止めや鉄筋は一切用いていなく（ただし，鋼殻の施工時応力を緩和するためのリブは設置している），製作上の煩雑作業および現場施工作業の簡略化がはかれることから，施工期間の短縮への要求，技能労働者の不足への対策，狭い施工空間への対応等に応えることが期待できる。

しかし，このような構造の施工事例はほとんどなく，鋼殻内に充填されるコンクリートの容積が比較的大きいことから温度応力によるひび割れの発生について確認する必要がある。

本研究では，温度応力による有害なひび割れ発生の有無に焦点を当て，建設予定である実橋橋台を切り出した実物大寸法の供試体を用いて施工実験を行うとともに，温度応力解析を実施した。ここで言う有害なひび割れとは，構造体の部材剛性や終局耐力の低下を招くような鋼殻内のコンクリートのひび割れのことである。本研究は，施工実験結果と解析結果を比較検証することによって温度応力の影響を確認し，今後の施工へ，さらには本構造の普及へ向けた技術資料とすることを目的とするものである。

2. 実験概要

本実験に用いた供試体は，**図－2** に示す実橋橋台の 1 部を原寸大でモデル化（実橋橋台の橋軸直角方向の約 1/4 を切り出した）したもである。鋼殻内部には主桁およびダイヤフラムを有し，さらには模擬鋼管杭を設置した。これらの鋼材には全て SS400 材を使用した。鋼殻内に充填するコンクリートは，**表－1** に示す配合の自己充填コ

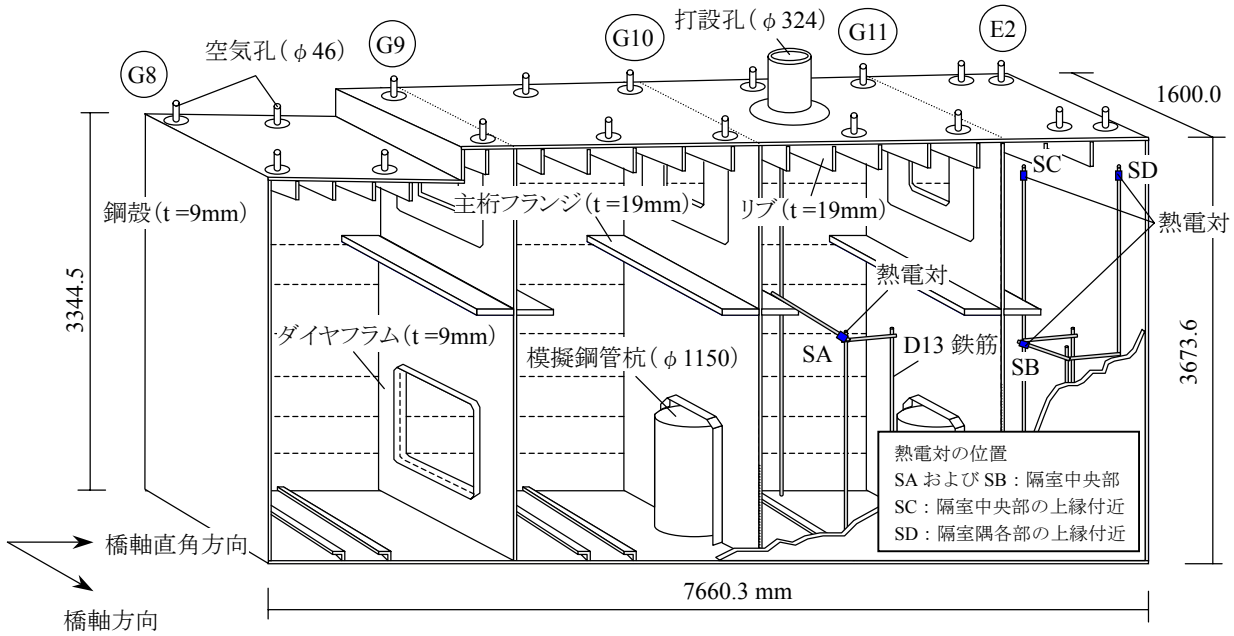


図－1　剛結部の概要

表－1　自己充填コンクリートの配合

単位量［kg/m^3］	W	170
	C	450
	S	868
	G	829
空気量［%］		4.5
スランプフロー［cm］		60
細骨材率［%］		51.5
水セメント比［%］		37.8
粗骨材の最大寸法［mm］		20
膨張材（低添加タイプ）［kg/m^3］		20

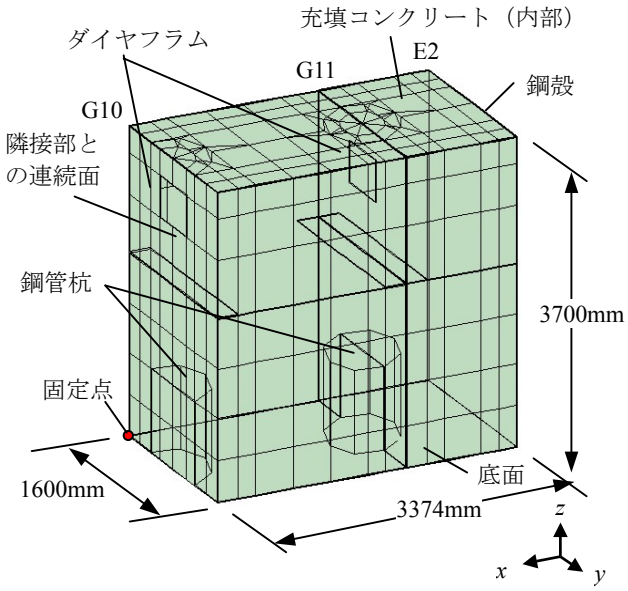
*1 パシフィックコンサルタンツ（株）　交通技術本部道路構造部（正会員）
*2 北海道大学大学院　工学研究科助教　博士（工学）（正会員）
*3 北海道大学大学院　工学研究科教授　工博（正会員）
*4 札幌市 建設局土木部街路工事二係長



図－2　実験供試体の形状寸法

ンクリート（普通ポルトランドセメント使用）で，総量 45m^3 を約 1 時間半かけて連続的に打設を行った。なお，使用した膨張材は，エトリンガイト・石灰複合系の乾燥収縮低減型ある。鋼殻内部に打設されたコンクリートは，ダイヤフラムの開口部を通って移動し，供試体全体に充填される仕組みとなっている。供試体には，予め鋼殻内の 4 箇所に熱電対を設置し（**図－2** 参照），コンクリート打設直前から養生終了までの 29 日間において水和熱による温度変化を測定した。また，養生後にこの供試体を切断し内部のひび割れの発生状況や鋼板とコンクリートの肌隙状況を目視により確認を行った。

なお，実験供試体は，基礎に砕石を厚さ 30cm で敷き詰め，均しコンクリート 20cm の厚さで打設して設置した。供試体はシートで覆い，打設より 4 日間は 5℃以上，その後 2 日間は 0℃以上を保ち，さらにそれ以降では外気温にて養生を行った。



図－3　解析モデル

3. 温度応力解析の概要

3.1 解析プログラム

本研究で使用した温度応力解析ソフトは，ASTEA MACS Ver.4 である。解の振動を防ぐため，数値解法は積分パラメータを 1 とした後退オイラー法を使用し，計算打ち切り回数を 30 回とした ASE-Solver 法を用いて収束計算を行った。解析時間は，打設開始から約 1 ヶ月間の 720 時間である。

なお，解析は，実験開始前に材料特性を仮定して行った「事前解析」と，実験終了後に実測値に基づいた材料特性を用いて行った「事後解析」の 2 種類とした。

3.2 解析モデル

実験供試体形状の対称性から右側半分を対象として，**図－3** に示すように高さ 3700mm，幅 3374mm，奥行 1600mm の領域（G10～E2 間）について解析モデルを作成した。実験供試体と同様に内部には主桁，ダイヤフラム，鋼管杭の鋼要素を有する。使用した要素は，8 節点 9 ガウスポイントと 6 節点 9 ガウスポイントのアイソパラメトリック要素である。解析に使用した材料特性を**表－2** に示す。なお，打設後から養生終了までにおけるコンクリートの圧縮強度，引張強度，ヤング係数および自己収縮ひずみの変化に対しては，コンクリート標準示方書「設計編」[2)]（以下，示方書と略記）の算定式を用いた。

また，事前解析ではコンクリートの線膨張係数として一般的に使用されている値である 10×10^{-6}／℃を用いたが，事後解析においては膨張材のカタログ値である 7×

10^{-6}／℃を用いた。なお，これらの値は発熱過程から冷却過程を通して一定値のままで適用した。

鋼殻とコンクリートの肌隙を考慮する場合には，鋼板とコンクリートの間にボンドリンク要素を用いた。本解析では，肌隙を容易にするためこのボンドリンク要素の直方向バネの引張強度を 0.1N/mm^2 とし，圧縮強度は鋼板とコンクリートの要素の重なりが生じないように大きな値を仮定した。また，界面に大きな摩擦が生じないようにするためせん断バネ剛性比は 0 とした。

3.3 境界条件

解析モデルは，実験供試体の一部を切り出しており，**図－3** のモデルの左側面（G10）は隣接した殻室との連続面である。したがって，この面は供試体内部に存在し，外気による冷却効果を受けない面であるので断熱境界とした。外気の影響を受けにくい底面には実験期間中（11 月上旬～12 月上旬）における月平均気温の平均値を用いて固定温度 1.8℃を与えた。その他の面は外気に触れる面であるため，事前解析では熱伝達率を 14 W/m^2℃と仮定し，外気温を与えた。事後解析においては，コンクリート中の冷却時実測温度の挙動が一致するよう熱伝達率を 7W/m^2℃とした。

底面の拘束条件としては，均しコンクリートの剛性が比較的大きいため z 方向を拘束したが，地盤の断熱効果が生じないことと鉛直方向の変形の拘束により，供試体内部に発生する応力は実際より厳しくなると考えられる。また，断熱境界面は x 方向を拘束，底面上の一点は全方向拘束とした。

4. 解析および実験結果に対する考察

解析は，施工実験前の「事前解析」および施工実験後の「事後解析」において，ボンドリンク要素無し（肌隙を考慮しない）とボンドリンク要素有り（肌隙を考慮する）の合計 4 パターンについて行った（**表－3** 参照）。

4.1 コンクリートの断熱温度上昇特性

コンクリートの断熱温度上昇特性は，示方書によれば次式で表せられる。

$$Q(t) = Q_\infty \left\{ 1 - \exp(-\gamma t) \right\} \qquad (1)$$

ここに，$Q(t)$ ：材齢 t 日における断熱温度上昇量
Q_∞ ：終局断熱温度上昇量（℃）
t ：材齢
γ ：温度上昇速度に関する定数

図－4 は，実験供試体の殻室（G10-G11 間）コンクリート中心部における温度履歴を示したものである。図中破線は，断熱温度上昇特性として示方書の値（Q_∞=63.75,

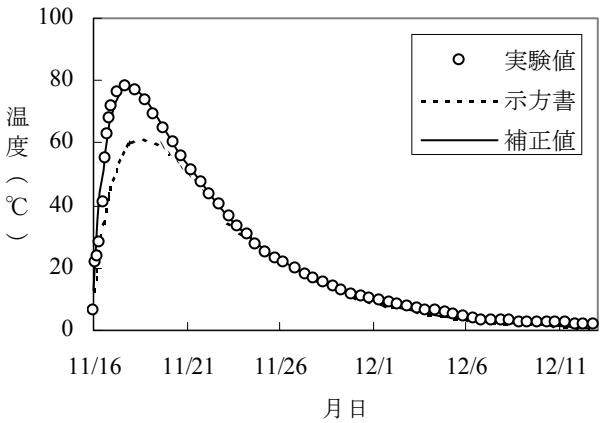
表－2　材料特性

	Concrete	Steel	Bond link Element
圧縮強度 [N/mm^2]	注）	140	100
引張強度 [N/mm^2]	注）	400	0.1
ヤング係数 [N/mm^2]	注）	2.1×10^5	1.0×10^5
熱伝導率 [W/m℃]	2.7	51.3	2.7
密　度 [kg/m^3]	2343	7850	2343
比　熱 [kJ/kg℃]	1.15	0.47	1.15
初期温度 [℃]	13	1.8	13
ポアソン比	0.18	0.3	0
線膨張係数 [μ/℃]	10 or 7	12	0

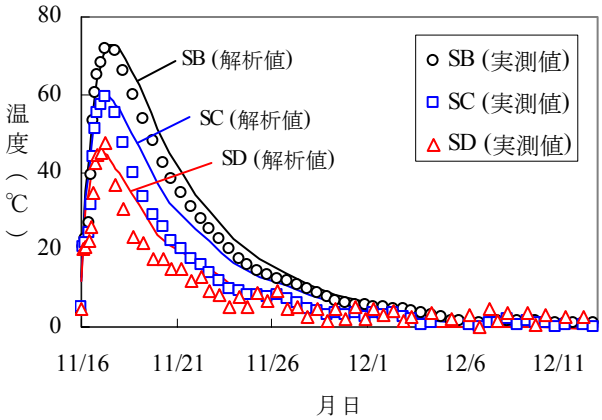
注）コンクリート標準示方書「設計編」の算定式による

表－3　解析パターン

	事前解析		事後解析	
解析名	0711-N	0711-B	0801-N	0801-B
断熱温度上昇特性	示方書式		補正値	
コンクリート線膨張係数	10μ/℃		7μ/℃	
コンクリート圧縮強度	32 N/mm^2		60 N/mm^2	
ボンドリンク要素	無し	有り	無し	有り



図－4　隔室（G10-G11 間）中心部の温度履歴



図－5　隔室（G11-E2 間）内部の温度履歴

γ=1.24）を用いて得られた解析値であるが，実測値に比べ最大温度が 25%ほど低い値となった。そこで，本報告では，図中実線に示すように，実測値に一致するよう式(1)の定数を修正（Q_∞=79.0，γ=1.4）した。

図－5 は，橋台端部付近（G11-E2 間）の計測点において，温度の実測値と解析値（係数補正後）の比較を示したものであるが，各点とも概ね実測値と解析値は一致している。事前解析では断熱温度上昇特性モデルの係数として示方書の値を，事後解析では修正された係数を用いた。なお，事後解析におけるコンクリートの初期温度は，受入時の実測値とした。

4.2 ひび割れ指数

示方書によれば，ひび割れ指数は，コンクリートに発生する引張応力に対する引張強度の比と定義されており，その値が大きいほどひび割れが発生しにくく，小さいほどひび割れが発生しやすいとされている。一般には，指数が小さいほど発生するひび割れの数も多く，その幅も大きくなる傾向にあるようである。発生した応力が一様な分布に近い場合には，部材断面を貫通するひび割れに成長する場合が多いが，体積変化に伴う応力が部材断面で大きく勾配を有する場合には，表面部に発生したひび割れが即時に貫通することは少ないとされている。

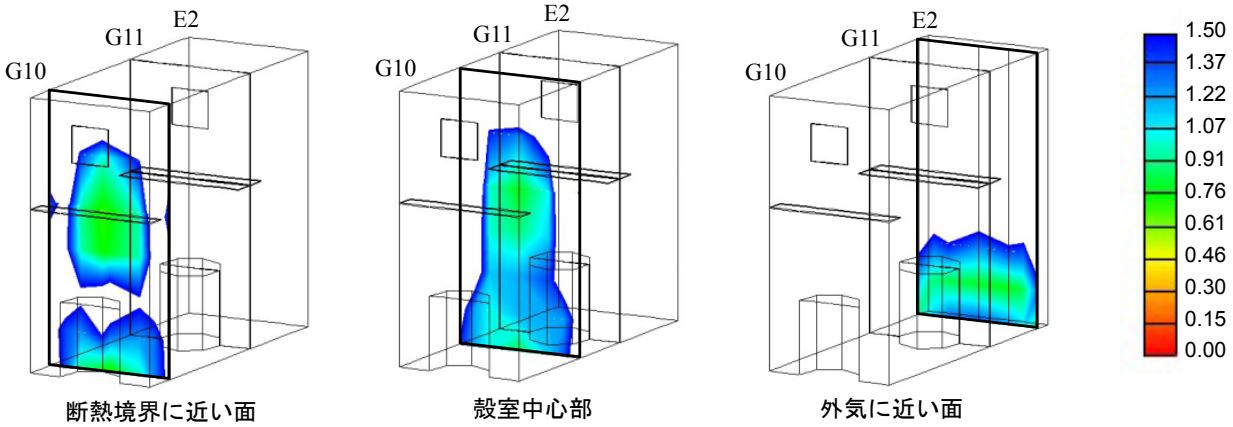
本報告では，ひび割れ指数とその分布を用いて，ひび割れ発生確率に基づく検討を行うこととした。なお，ひび割れ指数は，引張強度／主応力として抽出した。

(1) 施工実験前の解析

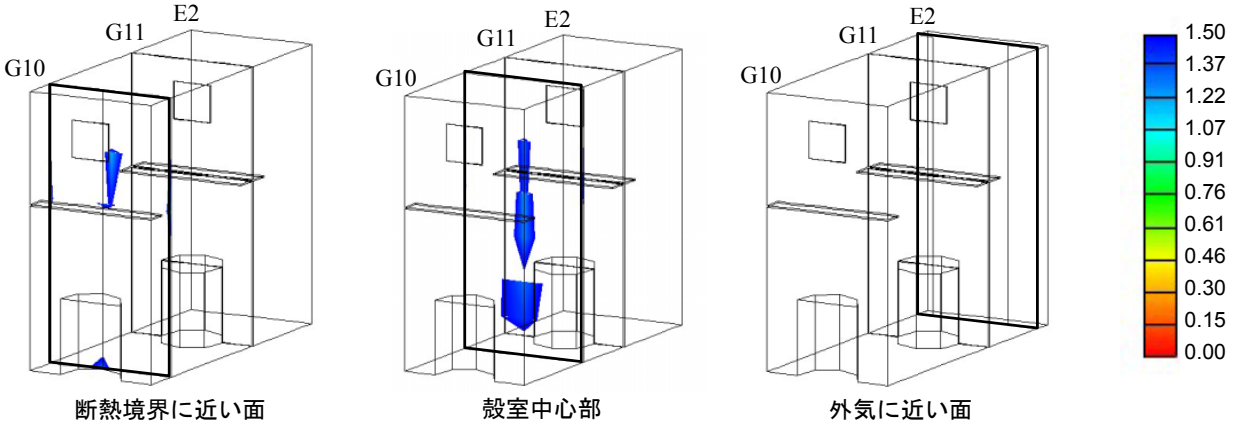
図－6 および**図－7** に，解析 0711-N および 0711-B におけるひび割れ指数の経験値図（打設終了から養生終了までにおいて，個々のガウスポイントが全解析期間内に記録した最小のひび割れ指数を抽出し，その分布を示した図）を示す。

図では，左端から断熱境界面に最も近い面，最高温度を記録した面，最も外気に近い面の３断面を示した。両モデルともひび割れ指数が小さな箇所は，殻室中心部と杭間の領域である。中心部のひび割れ指数は比較的時間が経過してから（約 200 時間以降）下がり始めるため，ボンドリンク要素無しのモデルでは，コンクリートが収縮の際に鋼板との付着によって変形を拘束するため，中心部に引張応力が生ずることによって指数が低下すると考えられる。

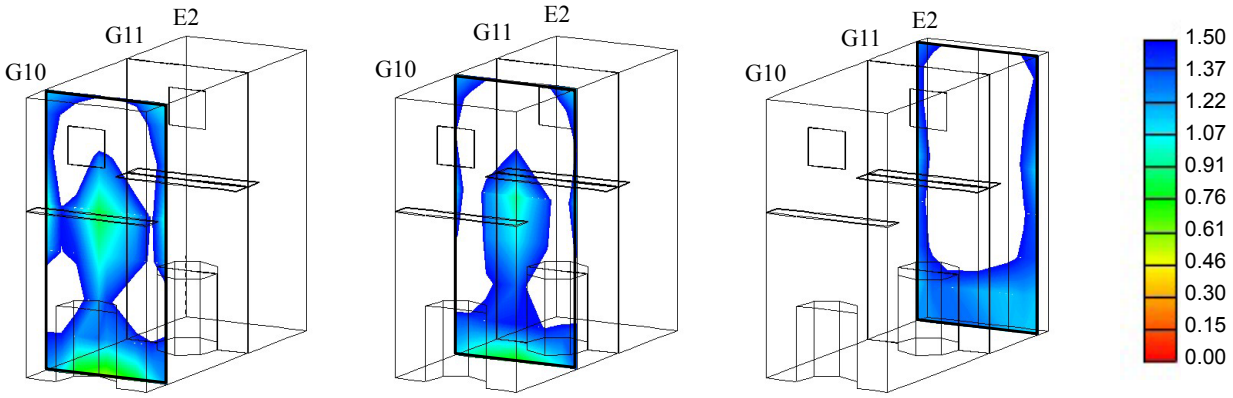
底面付近においてひび割れ指数が小さくなるのは比較的初期の発熱過程（約 40 時間まで）においてである。これは，発熱に伴いコンクリートが膨張するが，鋼管杭がコンクリートの水平方向の変形を拘束するため，その垂直方向に引張応力が作用すると考えられる。一方，天井部付近でひび割れ指数が下がらないのは，養生温度が底



図－6　ひび割れ指数の経験値分布（解析 0711-N，事前解析，ボンドリンク要素無し）

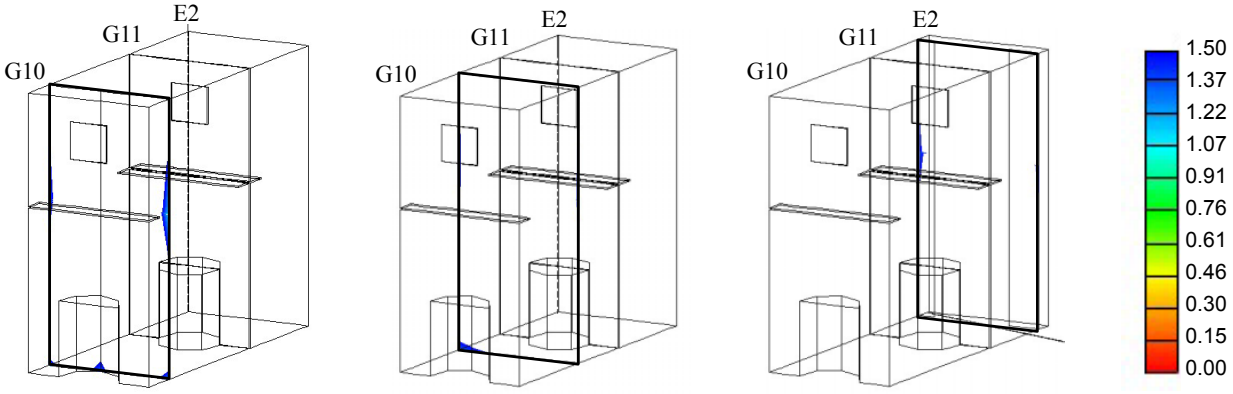


図－7　ひび割れ指数の経験値分布（解析 0711-B，事前解析，ボンドリンク要素有り）



断熱境界に近い面　　殻室中心部　　外気に近い面

図－8　ひび割れ指数の経験値分布（解析 0801-N，事後解析，ボンドリンク要素無し）



断熱境界に近い面　　殻室中心部　　外気に近い面

図－9　ひび割れ指数の経験値分布（解析 0801-B，事後解析，ボンドリンク要素有り）

面付近の温度より高く，発生する温度応力が小さいと考えられること，鋼管がないため拘束力が弱いことが理由として挙げられる。

コンクリートと鋼板の界面にボンドリンク要素を導入したモデルでは，付着面の肌隙を考慮することができるためコンクリート収縮時に引張応力が緩和され，全体的にひび割れ指数が上昇している。

以上の「事前解析」の結果から施工前の予想として，肌隙が生じないと仮定した場合には，殻室中央部で部材断面を貫通するひび割れが発生する可能性があることが示された。肌隙が生じると仮定した場合には，ひび割れは発生するとしても貫通するまでには至らないと推定できる。

(2) 施工実験後の解析

事後解析では，供試体切断後のコア抜き供試体により実測されたコンクリート圧縮強度として近似値 60 N/mm^2 を用いた。コンクリートの引張強度は，圧縮強度の平方根に比例すると仮定しているので事前解析に比べて，引張強度は 1.37 倍の値を用いることになる。

事後解析におけるひび割れ指数の経験値分布を**図－8** および**図－9** に示す。事前解析に比べると，ひび割れ指数は全般的に上昇した。また，この解析結果では，外周縁付近でひび割れ指数が小さくなる傾向も現れた。これは，事前解析に比べて内部コンクリートの最高温度が高いため，外縁部から冷却が始まった際に内部拘束によって引張応力が大きくなったためと考えられる。ボンドリンク要素を導入していないモデルでは，最小のひび割れ指数（殻室中央部）が 0.8 程度まで上昇することになったが，ひび割れ発生確率としては 95%と高いままである。ボンドリンク要素を導入したモデルでは，ほとんどの箇所でひび割れ指数が 1.5 以上となり，ひび割れ発生確率は 20%以下となる結果が示された。

以上の「事後解析」の結果から，肌隙が生じないと仮定した場合（0801-N）には，事前解析と同様に殻室中央部でひび割れ発生確率が高いが，肌隙が生じると仮定した場合（0801-B）には，ひび割れが発生する可能性がほとんどないことが示された。

4.3 供試体切断による温度ひび割れおよび肌隙の確認

写真－1 に供試体養生終了後に切断したコンクリート内面の様子の一例を示す。他の切断面でも同様であるが，目視観察によれば温度応力によるひび割れは一切確認することができなかった。したがって，温度応力解析においては，事後解析のボンドリンク要素有りのモデルの結果（解析 0801-B）が実験結果に整合すると言える。

鋼殻とコンクリートの肌隙については，切断面における鋼殻の切り口の縁がつぶれていたため，目視観察によって確認することが困難であったが，微視的には生じていると思われる。

以上のことから，ずれ止めを用いないという特徴をもつ本構造は，肌隙が生じることでひび割れの発生が抑えられるということを示しており，温度ひび割れの制御という視点からも有利な構造であると言える。

4.4 温度履歴を受けたコンクリート圧縮強度の検証

施工時に作製した圧縮強度試験用テストピースによる材齢 28 日のコンクリート圧縮強度は 64.6N/mm^2 であった。一方，供試体本体内部のコンクリート強度をコア採取によって調査した結果は**表－4** のとおりである。表にはコア採取位置近傍における計測値および解析値（0801-B）による最高温度もあわせて示した。この結果，採取した供試体内部のコンクリート圧縮強度の平均値は 62.6N/mm^2 であり，テストピースの圧縮強度に比べてわずか 3%ほどの違いであった。

A. M. Neville[3] によれば，養生中のコンクリートの温度が高いほど強度の増加は著しいとしているが，極端に高い温度履歴（例えば 85℃程度）を受けると長期強度は低下するという実験結果を示している。本供試体の場合，最も高い温度が 80℃付近にまで達したが，大幅な強度低下はなく若干の低下にとどまった。個々の強度のばらつきは，平均値に対して±5%の範囲内であるので，今回の実験においては水和熱による温度上昇が強度に対して影響を与えることはほとんどなかったと考えられる。

写真－1　実験供試体の切断状況

表－4　コンクリート圧縮強度（コア採取）

	圧縮強度 (N/mm^2)	最高温度[℃] (実験値)	最高温度[℃] (解析値)
No.1	61.6	78.4	77.7
No.2	59.6	74.2	73.2
No.3	63.2	55.7	56.7
No.4	66.1	47.4	48.5
平均値	62.6	——	——

5. まとめ

1）温度応力解析において，鋼殻とコンクリートの界面の肌隙を考慮しない場合(鋼要素とコンクリート要素を剛結)，コンクリートが収縮の際に鋼板との付着によって変形が拘束されるため，殻室中心部のコンクリートに引張応力が生じ，広い範囲でひび割れ指数の低下が見られた。また，底面付近においてもひび割れ指数が小さくなる領域が見られたが，これは発熱に伴いコンクリートが膨張した際に鋼管杭がコンクリートの水平方向の変形を拘束することにより，垂直方向に引張応力が作用するためだと考えられる。

2）温度応力解析において，鋼殻とコンクリートの界面の肌隙を考慮した場合(鋼要素とコンクリート要素間にボンドリンク要素を挿入)，コンクリート収縮時に引張応力が緩和され，全体的にひび割れ指数が上昇する結果が得られた。コンクリートの材料特性を実測値に基づいた値を用いた解析では，ほとんどの箇所でひび割れ指数が 1.5 以上となり，ひび割れ発生確率は 20%以下となる結果が示された。

3）実験終了後の供試体を切断して，内部コンクリートの状況を目視で観察したところ，ひび割れが生じていないことが確認された。したがって，実験結果は，実測値のコンクリート圧縮強度の近似値を適用し鋼板とコンクリートの肌隙を考慮した温度応力解析の結果に整合した。

4）解析および実験結果から，ずれ止めを用いない本構造は，肌隙が生じることでひび割れの発生が抑えられ，温度ひび割れの制御という視点からも有利である。

5）鋼殻内部のコンクリートにおいて，最高温度が高くなった部位で圧縮強度は平均値より若干低下する傾向を示したが，その割合は軽微であることから水和熱が強度に与える影響はほとんどないと考えられる。

謝辞　本研究を行うにあたり，実験計画に対してご助言をいただきました和光技研（株）勝俣征也氏，宮川隆雄氏および半浦 剛氏に，温度応力解析にあたりご指導をいただきました（株）計算力学研究センター 吉川信二郎氏に謝意を表します。

参考文献

1) 江本賢治，古内　仁，上田多門：複合ラーメン橋の剛結部に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1339-1344，2006
2) 土木学会：コンクリート標準示方書［設計編］，2007
3) A. M. Neville（三浦 尚 訳）：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，2004