

# 論文 大断面を有する節付き杭への高強度コンクリートの適用性に関する検討

神代 泰道\*1・田中 寛人\*2・荒川 真\*3・鈴木 貴博\*4

**要旨:** 近年、建築物の高層化や大スパン化に伴い、杭の中間に節部を設けることによって、押し込み支持力と引抜き抵抗力を増大させた節付きの場所打ちコンクリート杭の適用が進んでいる。節付き杭に高強度コンクリートを適用することで、杭の負担軸力を増大でき、杭の必要本数の低減が可能となる。ここでは節部の断面寸法が 4m を超える節付き杭へ設計基準強度 80N/mm<sup>2</sup> および 100N/mm<sup>2</sup> とした高強度コンクリートを適用する場合のコンクリートの品質について、解析および実験的に検討を行った。その結果、セメントの種類を適切に選定することで、温度ひび割れの危険性は小さく、設計基準強度も確保できることを確認した。

**キーワード:** 高強度コンクリート、場所打ちコンクリート杭、圧縮強度、温度ひび割れ、高温履歴

## 1. はじめに

近年、建築物の高層化や大スパン化に伴い、杭の支持力の増大が求められている。特に杭の先端だけでなく、中間に節を設けることによって、押し込み支持力と引抜き抵抗力を増大させた節付きの場所打ちコンクリート杭の適用が進んでいる。近年開発された工法によると、支持層に節を1段設けた場合、同じ底面積の拡底杭に対して、約3割の押し込み支持力や引抜き抵抗力の増大を期待でき、約2割のコスト削減・工期短縮を期待できる<sup>1)</sup>。さらに節付き杭に高強度コンクリートを適用することで杭の負担軸力を増大でき、杭の必要本数の低減が可能となる。高強度コンクリートの使用による建設資材由来のCO<sub>2</sub>排出量は増加するが、杭体積や掘削土量の削減によって、工事全体のCO<sub>2</sub>排出量や建設廃棄物を削減でき、カーボンニュートラルにも貢献できる。

ここでは大断面を有する節付き杭へ設計基準強度 80N/mm<sup>2</sup> および 100N/mm<sup>2</sup> とした高強度コンクリートを適用する場合のコンクリートの品質について、実験および解析的に検討した結果について報告する。

## 2. 検討の概要

図-1 に節付き杭の形状の概要を示す。想定している最大径は軸部で 3m、節部で 4.6m である。このような断面寸法の大きい部材に、セメント量の多い高強度コンクリートを打ち込んだ場合、セメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇が大きくなり、温度ひび割れの発生が懸念される。さらに、水和熱による高温履歴による強度発現の停滞が懸念される。そこで、温度ひび割れ発生については、FEM による温度応力解析によって解析的に

検討した。強度発現については、杭径 1.2m の実大杭試験体に高強度コンクリートを打ち込み、試験体から採取したコア供試体の圧縮強度を確認した。また、径 4.6m の節部の温度履歴を模した養生を行い、高温履歴を与えた供試体の強度発現を確認した。

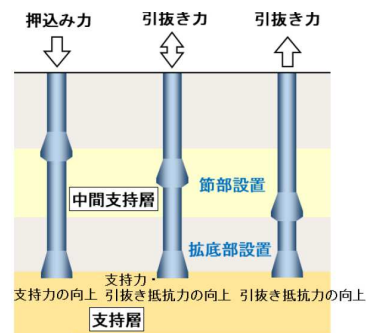


図-1 節付き杭の概要<sup>1)</sup>

## 3 温度ひび割れの検討

### 3.1 検討概要

ここでは節付き杭を対象とし、設計基準強度 80N/mm<sup>2</sup> および 100N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートを打ち込んだ場合の温度ひび割れの発生について、有限要素法 (FEM) による温度解析および応力解析を行って検討した。

解析対象は図-2 に示す軸部の直径を 3m、節部の直径を 4.6m とし、杭長を 20m とした節付き杭とし、日本建築学会「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説」<sup>2)</sup> (以下、AIJ 指針) を参考とし、温度は定常の熱伝導解析、温度応力は材齢の経過に伴うヤング係数およびクリープひずみの変化を考慮した非線形応力解析で算定した。なお、AIJ 指針におけるクリープ係

\*1 (株) 大林組 技術研究所 工博 (正会員)

\*2 (株) 大林組 技術研究所 工修 (正会員)

\*3 (株) 大林組 ロボティクス生産本部

\*4 (株) 大林組 設計本部 工修

数の算定式は、材齢 28 日における圧縮強度が  $120\text{N/mm}^2$  程度の高強度コンクリートの実験結果<sup>3)</sup>も含めて検討されたものであることから今回適用できると判断した。温度ひび割れ発生の評価は、応力強度比により行った。応力強度比は、コンクリートに生じている温度応力とその材齢における温度ひび割れ発生強度（割裂引張強度と同等とみなす）の比であり、AIJ 指針ではひび割れを制御するための応力強度比の設計値として、漏水抵抗性を確保する場合 0.8 以下、鉄筋腐食抵抗性を確保する場合 1.3 以下としている。一般的な環境下においては、ひび割れの発生は許容するが、耐久性上の許容ひび割れ幅を超えないように制御するため 1.3 以下とする場合が多い。本検討ではひび割れの発生をできるだけ制限することを目標として、応力強度比が 0.8 を超えないことを目標として検証を行った。

コンクリートは表-1 に示すように設計基準強度  $80\text{N/mm}^2$  は中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリート（以下、80N）、設計基準強度  $100\text{N/mm}^2$  はシリカフェーム混合セメントを用いたコンクリート（以下、100N）の 2 種類とした。コンクリートの断熱温度上昇特性のうち最終断熱温度上昇量  $K(^{\circ}\text{C})$  および断熱温度上昇速度を表す係数  $\alpha$  については、80N については、それぞれ AIJ 指針の中庸熱ポルトランドセメントのセメント量との関係式を用いて外挿して求めた。100N については、 $K$  はセメントメーカーの技術資料よる  $20^{\circ}\text{C}$  の値とした。 $\alpha$  については、ベースセメントが中庸熱ポルトランドセメントであることから、80N の場合と同様に AIJ 指針の同セメントに適用する式で外挿して求めた。なお、断熱

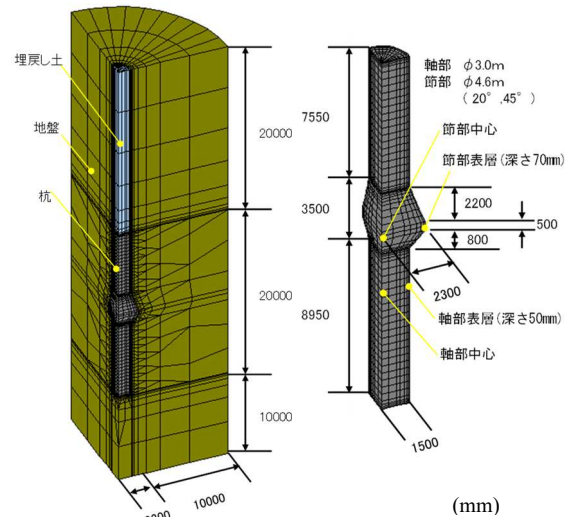


図-2 解析対象部位のモデル化 (1/4 モデル)

表-1 コンクリートの調合

調合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	SP
80N	26.0	47.5	175	673	732	807	7.07
100N	20.6	41.0	175	850	572	812	8.84

80N：中庸熱ポルトランドセメント，スラブ厚65cm，空気量 3.0%  
 100N：シリカフェーム混合セメント，スラブ厚65cm，空気量 2.0%

温度上昇特性の設定の妥当性については、4.2 において確認した。打込み時期は 4 月とし、コンクリートの温度は  $20^{\circ}\text{C}$  とし、外気温は気象庁による東京都の日別平年値を用い、地盤の最下部の温度は  $15.2^{\circ}\text{C}$  に固定した。解析期間は、打ち込み後 330 日間を目安とした。

地盤および埋戻し土のヤング係数は、AIJ 指針を参考

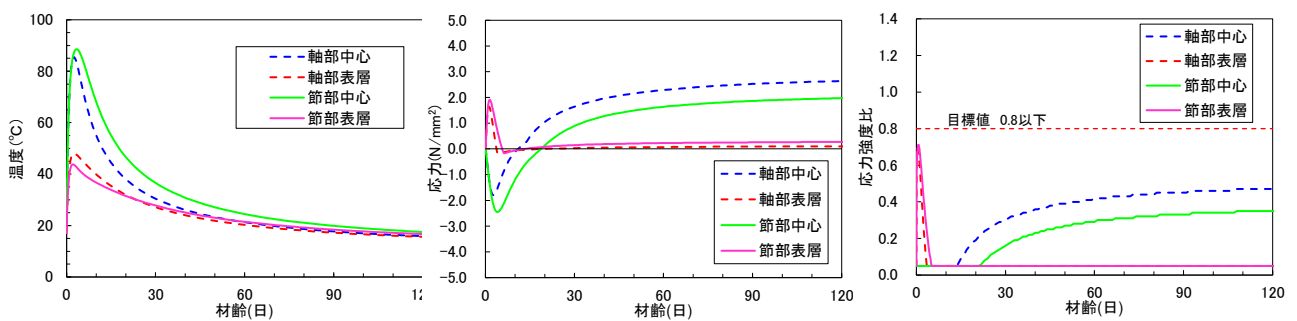


図-3 温度、応力、応力強度比の解析結果 (80N)

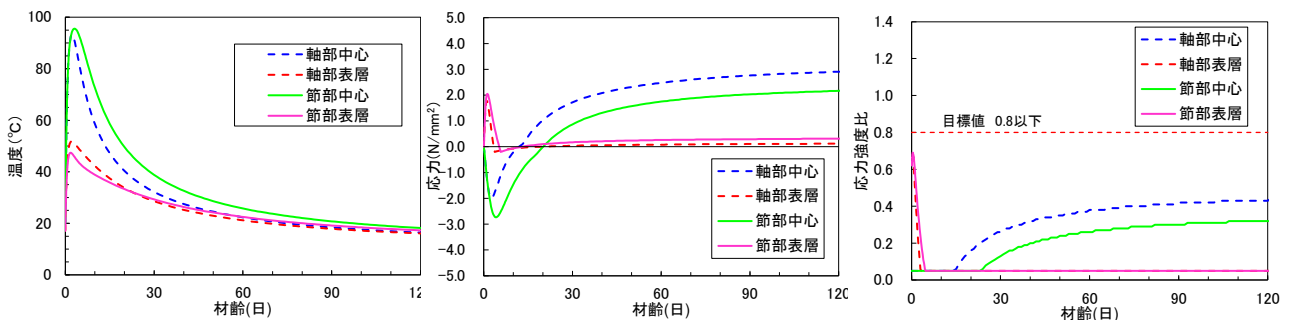


図-4 温度、応力、応力強度比の解析結果 (100N)

としてそれぞれ  $500\text{N/mm}^2$ ,  $50\text{N/mm}^2$  に設定した。なお、打込み日の翌日に埋め戻すこととした。コンクリートの自己収縮ひずみは考慮していないが、この影響については 3.3 で考察する。また、地盤の剛性（ヤング係数）の影響についても 3.3 で考察する。

### 3.2 検討結果

温度解析および応力解析の結果を図-3 および図-4 に示す。なお、抽出点は図-2 に示した。また、図-5 に応力強度比の最大値の分布を示す。80N の最高温度は、節部で  $88.6^\circ\text{C}$ 、軸部で  $85.5^\circ\text{C}$ 、100N の最高温度は、節部で  $95.6^\circ\text{C}$ 、軸部で  $93.2^\circ\text{C}$  であった。表層には温度上昇中の内外温度差による引張応力が作用し、中心部には温度上昇中は圧縮応力が蓄積され、温度降下に伴って引張応力が作用する。総じて 80N, 100N とも引張応力は表層部よりも中心部の方が大きくなる傾向であった。なお、節部の中心部の引張応力は、軸部よりも小さくなった。これは節部の方が温度上昇中に、より大きな圧縮応力が蓄積されたためと思われる。応力強度比については、中心部の応力強度比は軸部、節部とも 0.5 以下であり、表層部については、断面寸法の大きい節部において若干大きく、最大値は 80N の 0.71 であった。総じて応力強度比は中心部よりも表層部の方が大きくなった。なお、図-5 に示すように杭の天端面において応力強度比が 0.8 を超える箇所が認められた。この箇所は、翌日の埋め戻しまでは外気に露出する面であり、この間の内外温度差に起因する温度応力によるものである。なお、この部分は余盛りとして除去することから、杭の品質として問題ないと考える。以上の検討の結果から 80N, 100N のいずれも場合も軸部、節部ともに応力強度比は 0.8 以下であることを確認した。

### 3.3 考察

#### (1) 地盤の剛性の影響

地盤の剛性の大きさが杭体の温度応力に及ぼす影響について検討するため、地盤のヤング係数を  $0.5\text{N/mm}^2$  および  $50\text{N/mm}^2$  とした場合について解析を行った。結果の一例として 80N の応力解析の結果を図-6 に示す。地盤の剛性をコンクリートと比較して無視できるほど小さくした場合においても引張応力は蓄積されている。これは、

杭体の体積としては、温度上昇中は膨張し、温度降下に伴って収縮に転じるが、体積が初期値に戻ったとしても、コンクリートのヤング係数は材齢とともに発現しているため、コンクリート内部の応力は 0 にならず、温度上昇時に蓄積された圧縮応力を上回る引張応力が温度降下時に蓄積したものと思われる。図-7 に地盤のヤング係

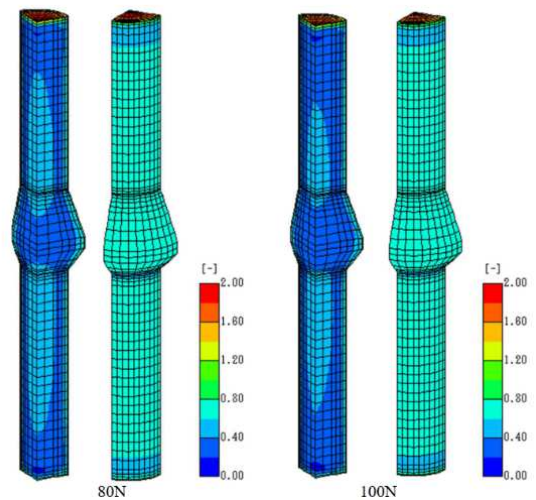


図-5 応力強度比の最大値の分布

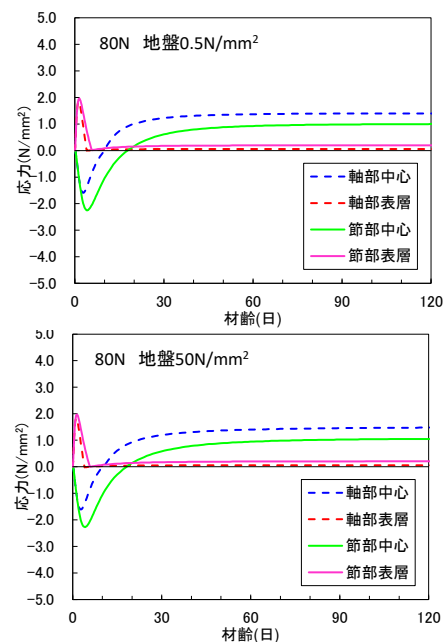


図-6 温度応力の解析結果（地盤の影響, 80N）

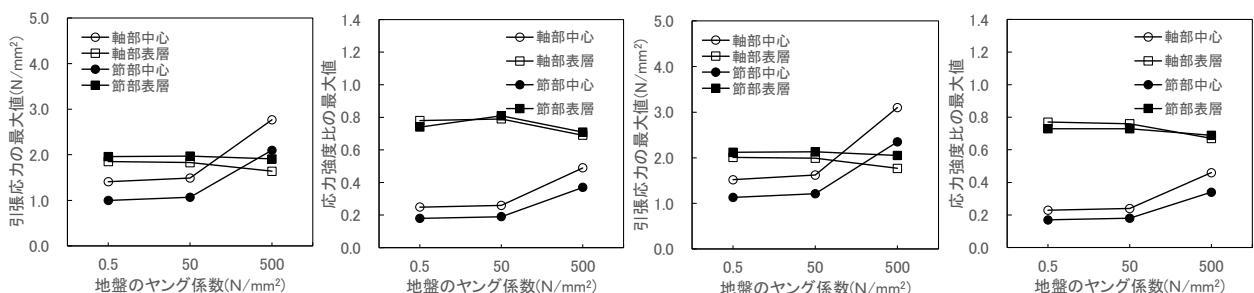


図-7 地盤の剛性の影響

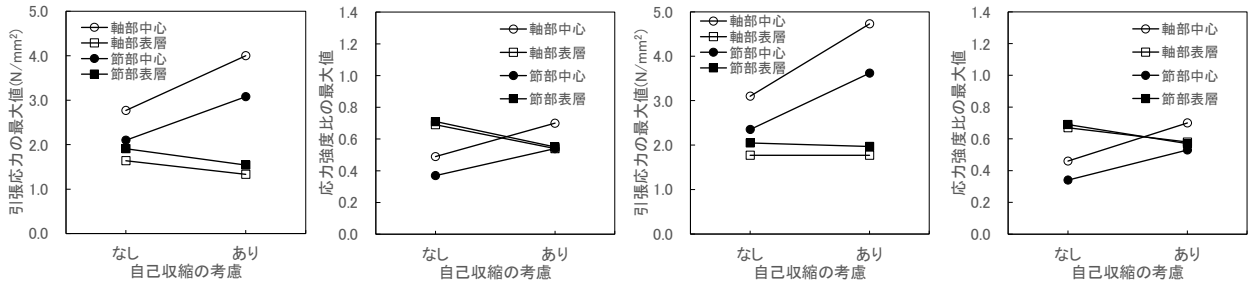


図-8 自己収縮ひずみの影響

数と引張応力と応力強度の最大値との関係を示す。地盤のヤング係数を  $0.5\text{N/mm}^2$  や  $50\text{N/mm}^2$  とした場合の中心部に作用する引張応力は、 $500\text{N/mm}^2$  とした場合の約半分程度となり、表層部に発生する引張応力よりも小さくなった。表層部の引張応力と応力強度比については、地盤のヤング係数が小さくなると若干であるが大きくなった。

### (2)自己収縮ひずみの影響

高強度コンクリートでは水結合材比が小さくなり、コンクリートの自己収縮ひずみが大きくなる。そこで、自己収縮ひずみの考慮の有無が温度応力に及ぼす影響について検討を行った。コンクリートの自己収縮ひずみは、AIJ 指針を参考とし、ひずみの終局値を  $80\text{N}$  は  $507\mu$ 、 $100\text{N}$  は  $727\mu$  として設定した。なお、地盤のヤング係数は  $500\text{N/mm}^2$  とした。図-8 に自己収縮ひずみの考慮の有無による引張応力と応力強度比の最大値を比較して示す。自己収縮ひずみを考慮した場合、引張応力は中心部では大きくなり、表層部では小さくなった。 $80\text{N}$  については、自己収縮ひずみを考慮しない場合よりも、中心部の引張応力は最大で  $1.2\text{N/mm}^2$ 、応力強度比は最大で  $0.21$  大きくなった。また、 $100\text{N}$  については、中心部の引張応力は最大で  $1.6\text{N/mm}^2$ 、応力強度比は最大で  $0.24$  大きくなった。自己収縮ひずみの影響を考慮しても  $80\text{N}$ 、 $100\text{N}$  いずれの場合も軸部、節部ともに応力強度比は  $0.8$  以下であることを確認した。

## 4. 実験的検討

### 4.1 実験概要

ここでは  $80\text{N}$  と  $100\text{N}$  をそれぞれ市中のレディーミクストコンクリート工場で製造し、マスブロックと実大杭試験体に打ち込んだ。さらに径  $4.6\text{m}$  の節部の中心部の温度履歴を再現した養生水槽を用いて供試体を養生し、圧縮強度を確認した。コンクリートの調合は表-1 に示したものであり、指定強度を  $80\text{N}$  は  $84\text{N/mm}^2$ 、 $100\text{N}$  は  $108\text{N/mm}^2$  とした大臣認定を取得した高強度コンクリートを用いた。目標スランブフローは、過去の実験結果<sup>4)</sup>を参考としていずれも  $65\text{cm}$  とした。コンクリートの試験項目を表-2 に示す。マスブロックは、 $1\text{m}$  の立方体の型枠にコンクリートを流し込み、内部振動機を用いて軽

表-2 試験方法

試験項目	試験方法	
コンクリート	スランブフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	単位容積質量	JIS A 1116
	圧縮強度	JIS A 1108 標準養生
	圧縮強度	JASS 5 T-607 温度履歴追従養生
マスブロック	コア強度	JASS 5 T-605 材齢 28, 56, 91 日 中心部・外周部 各1本
	温度測定	約2週間 熱電対
実大杭試験体	コア強度	JIS A 1107 材齢 91 日

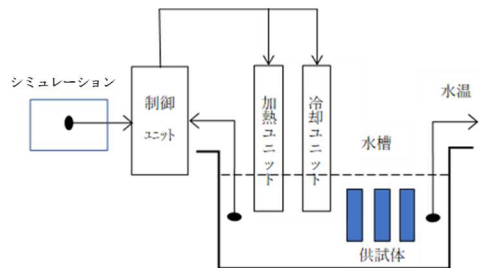


図-9 温度履歴追従養生水槽

微な締固めを行った。側面のせき板は材齢 7 日で脱型した。試験体内部と表層の温度を測定し、材齢 28, 56, 91 日でコア強度を確認した。実大杭試験体は、場所打ち杭の評価方針<sup>5)</sup>に従い、杭径  $1.2\text{m}$ 、掘削深度  $16.0\text{m}$  とした。掘削後、鉄筋籠を建て込んでからコンクリートを打ち込んだ。コア供試体 (直径  $100\text{mm}$ ) を採取し材齢 91 日において圧縮強度試験を行った。

温度履歴追従養生は、図-9 に示す装置を用いて行った。事前に径  $4.6\text{m}$  の節部を対象とした FEM 温度解析を行い、この結果に基づく温度履歴データを養生水槽の制御ユニットに入力して供試体に温度履歴を与えた。供試体を採取後、 $20^\circ\text{C}$  の養生室に保管し、打込み日の翌日から養生水槽にて養生を開始した。養生水槽内で 2 週間温度履歴を与え、封かん状態のまま  $20^\circ\text{C}$  の室内に 1 日間静置し、その後、屋外に移して所定の材齢まで養生を行った。

## 4.2 実験結果

### (1) コンクリートの試験結果

コンクリートの試験結果を表-3に示す。80N、100Nともに全車についてスランブフロー、空気量ともに所要のフレッシュ性状が得られた。また、材料分離もなかった。50cmフロー到達時間は、過去の実験結果<sup>4)</sup>の範囲内であり、コンクリートの粘性としてトレミー管による打込みに対して問題ない範囲であることを確認した。材齢28日の圧縮強度(標準養生)は、すべての運搬車について指定強度(80N:84N/mm<sup>2</sup>, 100N:108N/mm<sup>2</sup>)以上であることを確認した。

### (2) マスブロック

マスブロックから採取したコア供試体の材齢91日の圧縮強度は、80Nで101N/mm<sup>2</sup>, 100Nで131N/mm<sup>2</sup>であり、それぞれ設計基準強度を満足することを確認した。また、コア供試体の単位容積質量はそれぞれ2,445kg/m<sup>3</sup>, 2,448kg/m<sup>3</sup>であった。マスブロックの温度測定結果を図-10に示す。ここでは温度解析に用いたコンクリートの断熱温度上昇特性の妥当性を確認するため、マスブロック試験体を対象としてFEM温度解析を行った結果も示した。コンクリートの断熱温度上昇特性は3.1で検討した値を用い、外気温は実測値を用いた。打込み温度に対する補正はAIJ指針に準じた。最高温度について測定値と解析値を比較すると、80Nは63.2℃に対して61.3℃, 100Nは61.9℃に対して63.1℃であり、概ね±2℃の範囲であった。なお、最高温度の到達材齢は80Nで約2時間、100Nで約7時間、解析値の方が早かった。3.1で検討した温度解析結果については、最高温度に関しては概ね妥当であったと思われる。

### (3) 実大杭試験体

実大杭試験体から採取したコア供試体の材齢91日における圧縮強度および単位容積質量の試験結果を図-11に示す。80Nの平均値は106N/mm<sup>2</sup>であり、標準偏差は

3.4N/mm<sup>2</sup>であった。100Nの平均値は125N/mm<sup>2</sup>であり、標準偏差は8.1N/mm<sup>2</sup>であった。いずれも最小値を含めてコア強度は設計基準強度以上であることを確認した。単位容積質量は、深い方が大きくなる傾向であり、80Nでは深さ8mより以深、100Nでは深さ2mより以深では、締めを行ったマスブロックの単位容積質量より大きくなった。これについては、過去の実験結果<sup>4)</sup>と同様に、

表-3 コンクリートの試験結果

調査	台数 (台目)	スランブ フロー (cm)	50cm 到 達時間 (秒)	空気 量 (%)	コンクリート 温度 (℃)	圧縮強度 (28日標水) (N/mm <sup>2</sup> )
80N	1	58.0	7.8	2.1	18.0	99.4
	2	64.0	6.1	1.9	19.0	105
	3	64.0	6.4	1.9	19.0	104
	4	60.5	7.8	2.6	20.0	99.4
	5	56.0	8.8	2.8	20.0	102
100N	1	65.5	6.2	1.4	15.0	130
	2	70.0	7.3	1.1	15.0	139
	3	68.5	5.5	1.0	16.0	140
	4	67.5	6.6	1.5	16.0	138
	5	69.5	5.4	1.7	16.0	141
	6	69.5	6.1	1.4	16.0	136

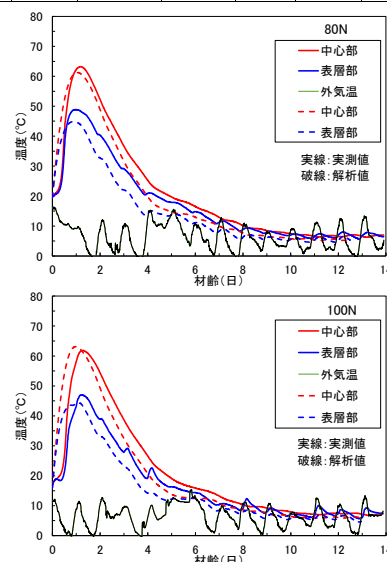


図-10 マスブロックの温度測定および解析結果

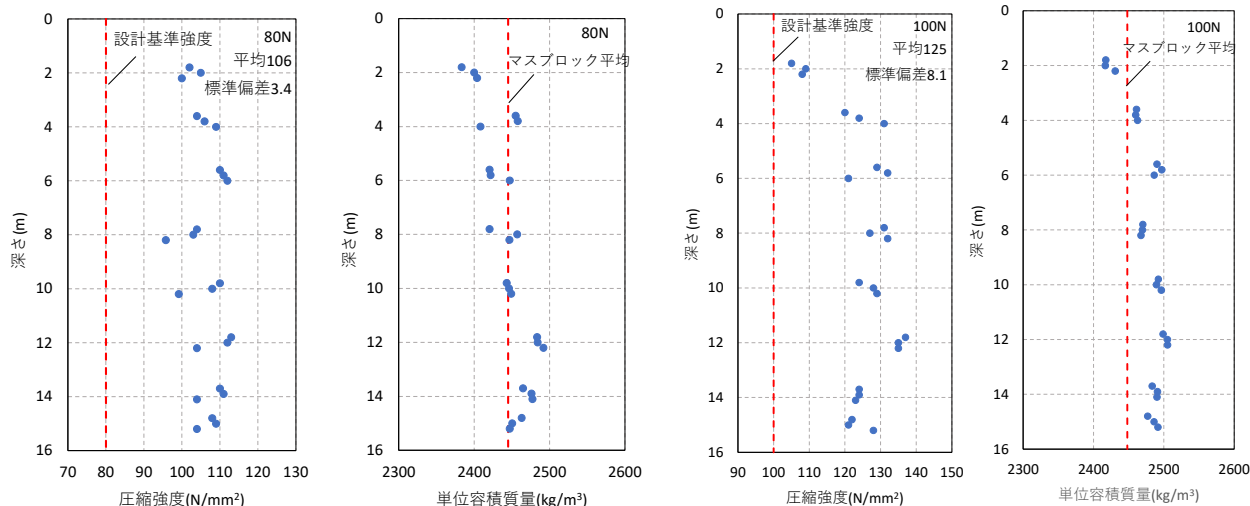


図-11 コア強度および単位容積質量と深度の関係

コンクリートの自重による圧密と思われた。

#### (4)温度履歴追従養生

温度履歴追従養生を行ったコンクリート供試体の圧縮強度試験結果を図-12に示す。材齢28日以降の強度発現は停滞するものの、材齢28日の標準養生供試体の圧縮強度を下回ることにはなかった。高温履歴により初期材齢から水和反応が活性化し、その後は緩慢になったためと思われる。

#### (5)圧縮強度の考察

標準養生、マスブロック、実大杭試験体および温度履歴追従養生の各種供試体から得られた圧縮強度を図-12にまとめて示した。標準養生は、温度履歴追従養生とマスブロックに打ち込んだ運搬車から採取した供試体の結果の平均値を示した。実大杭は平均値のみを示した。材齢28日以降の圧縮強度の発現は、マスブロック、温度履歴追従養生とともに比較的緩慢となった。これは初期の温度履歴により水和反応が活性化し、その後停滞したためと思われる。材齢91日の圧縮強度は、断面寸法がほぼ同じマスブロックと実大杭試験体はほぼ同程度であり、高い温度履歴を受けた温度履歴追従養生はこれらよりも高くなった。これらの結果から、節部において高い温度履歴を受けても80Nについては中庸熟ポルトランドセメント、100Nについてはシリカフェーム混合セメントを用いるなど、セメント種類を適切に選定することで最大径4.6mの大断面を有する節付き杭に高強度コンクリートを適用しても圧縮強度の発現は問題ないと思われる。なお、夏期においては打ち込み時のコンクリート温度が高くなり、その結果、中庸熟ポルトランドセメントを用いた場合でも100℃を超える高温履歴を受けることが想定されるが、筆者らは水分の逸散がない状態においては、圧縮強度の低下がないことを確認している<sup>6)</sup>。

### 6. まとめ

節部の断面寸法が4mを超える節付き杭へ設計基準強度80N/mm<sup>2</sup>および100N/mm<sup>2</sup>とした高強度コンクリートを適用する場合のコンクリートの品質について、解析および実験的に検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1)温度解析の結果、20℃の打込み温度に対し、80 N/mm<sup>2</sup>の最高温度は、径4.6mの節部で88.6℃、3mの軸部で85.5℃、100 N/mm<sup>2</sup>の最高温度は、節部で95.6℃、軸部で93.2℃であった。
- (2)応力強度比は、80 N/mm<sup>2</sup>、100 N/mm<sup>2</sup>ともに目標とした0.8以下を確保でき、80 N/mm<sup>2</sup>については、中庸熟ポルトランドセメント、100 N/mm<sup>2</sup>については、シリカフェーム混合セメントの使用により、温度上昇による温度ひび割れの発生を制御できることが確認できた。

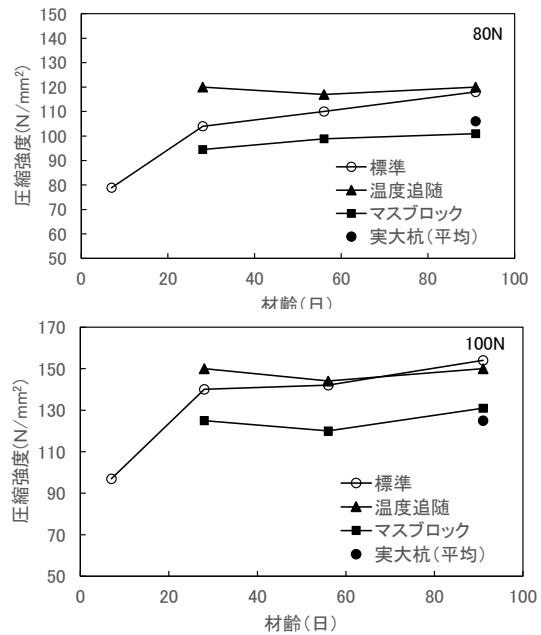


図-12 各種供試体の圧縮強度の発現性状

- (3)自己収縮ひずみを考慮した場合も目標とした0.8以下を確保できた。
- (4)径1.2m、長さ16mの実大杭試験体にコンクリートを打ち込み、材齢91日におけるコア強度が80 N/mm<sup>2</sup>、100 N/mm<sup>2</sup>ともに設計基準強度以上であることを確認した。
- (5)径4.6mの節部の中心部の温度履歴を与えた供試体の材齢91日の圧縮強度についても設計基準強度以上であり、圧縮強度の発現は問題ないことを確認した。

#### 参考文献

- 1)佐原 守, 神代泰道, 三好夏恵, 幸山大己: ナックル・パイルおよびナックル・ウォールの技術認証の現状, 基礎工, Vol.51, No.3, pp.44-47, 2023
- 2)日本建築学会「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説」, 2019
- 3)Hidetoshi Ito, Ippei Maruyama, Makoto Tanimura and Ryoichi Sato, Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 2, No. 2, pp.155-174, 2004
- 4)三浦律彦, 青木茂, 神代泰道, 河村秀紀, 相原功: 低発熱・超高強度地下連続壁コンクリートに関する研究, 大林組技術研究所報, No.54, pp.21-28, 1997
- 5)日本建築センター基礎評定委員会: 場所打ちコンクリート掘底ぐい評定方針, 2018
- 6)田中寛人, 神代泰道, 酒井正樹: 初期高温履歴を受けた高強度コンクリートの品質に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.13, pp.844-849, 2022