

論文 鋼管に充填した膨張モルタルの膨張圧に及ぼす諸要因に関する研究

川西 貴士*1・原 良輔*2・武田 篤史*3・酒井 大央*4

要旨：高架橋を支持するための鋼管ブラケットにケミカルプレストレスを導入するために、鋼管の内部に充填する膨張モルタルの基礎物性を確認した。また、膨張モルタルを鋼管の中に充填し、膨張圧を測定することで、膨張材の混入量、鋼管の寸法および養生温度などの諸要因が膨張圧に及ぼす影響について実験的に確認した。その結果、膨張圧は、膨張材の混入量、鋼管長、鋼管厚が大きくなるほど増加し、鋼管径が大きくなるほど低下した。また、養生温度が低下するほど、膨張圧が増加する速度が遅くなり、膨張圧は増加するなどの知見を得た。

キーワード：膨張モルタル, 鋼管, ケミカルプレストレス, 膨張材, 膨張ひずみ, 膨張圧

1. はじめに

鉄道高架橋の直下に構造物を構築するために掘削を行う場合、掘削による影響を抑制するために新たな基礎に受け替えるアンダーピニング工法が用いられる。その中でも特に、狭い空間での施工で、既存躯体への影響を最小限に抑えるために、図-1に示すように、高架橋の柱に鋼管を巻き立て、その内部に充填する膨張モルタルにより高架橋を支持する工法（鋼管ブラケットを用いたケミカルプレストレス締結方式）が提案されている¹⁾。

ケミカルプレストレスに関しては、これまでに使用材料、膨張材の混入量、拘束条件、養生等の様々な要因によって影響を受けることが報告されている。角柱の中心部に鋼材を配置し、一軸拘束条件下での膨張性試験により、膨張モルタルや膨張コンクリートの膨張ひずみが測定されている²⁾³⁾。また、導入されるケミカルプレストレスは、一軸拘束条件下で得られた膨張ひずみや拘束鋼材比から計算される仕事量でケミカルプレストレスを一義的に評価できることも報告されている⁴⁾。一方、円管の中に膨張モルタルや膨張コンクリートを充填し、三軸拘束下でのケミカルプレストレスの検討も行われており、円管の円周方向や軸方向のひずみと、円管の厚さや内径から膨張圧を算出する方法が提案されている⁵⁾⁶⁾。

膨張コンクリートには、収縮補償用コンクリートとケミカルプレストレス用コンクリートの2種類がある⁷⁾。前者は汎用的に使用されているが、後者は使用実績が少ないのが現状である。これまでにケミカルプレストレスに関する研究は多数報告されているものの、鋼管の中に膨張モルタルを充填した場合に得られる膨張圧や膨張圧に影響を及ぼす要因については、知見が少ない。

そこで、膨張モルタルの鋼管ブラケットを用いたケミカルプレストレス締結方式への適用に向けて、膨張モル

タルの基礎物性を確認するとともに、鋼管の中に膨張モルタルを充填し、鋼管の寸法や養生温度などの各種要因が膨張圧に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配（調）合

実験に使用したベースのモルタルには、狭隘な箇所への打込みと収縮量の低減を目的として、市販の高流動タイプの無収縮グラウト材を使用した。現場での施工性を考慮して、普通ポルトランドセメント、膨張材、無機粉体および細骨材等を事前に混合したプレミックス粉体である。ケミカルプレストレスを導入するために、このプレミックス粉体に、汎用的に使用されているエトリンガイト・石灰複合系の膨張材 20 型を追加で添加した。

膨張モルタルの配（調）合を表-1に示す。1m³の標準配（調）合として粉体量 1875kg に対する水量 338kg の割合をベースとし、膨張材の混入量や養生温度によって、所要の品質となるよう、水量を変化させた。膨張材の混入量は 23, 42, 52 および 122kg の 4 種類とし、プレミックス粉体に対して、内割で置換した。

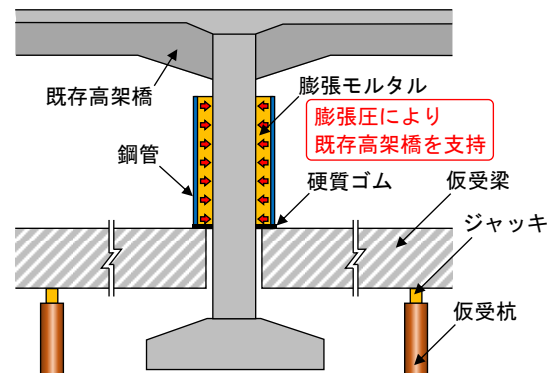


図-1 膨張圧による高架橋の支持工法の概要

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部上席研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 生産技術本部設計第四部副課長 修士(工学)

*3 (株)大林組 技術研究所構造技術研究部主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 東海旅客鉄道(株) 中央新幹線愛知工事事務所主任 (正会員)

表-1 膨張モルタルの配(調)合

配合種類	膨張材混入量(kg)	養生温度※(°C)	水粉体比(%)	水セメント比(%)	水(kg)	プレミックス粉体(kg)
A	23	20	18.0	36.0	338	1875
B	42					
C	52					
D	122					
E	52	5	19.6	39.2	368	
F		35	18.8	37.6	353	
G		外気	19.2	38.4	360	

※材料の保管、練混ぜおよび練混ぜ後の養生を各温度で実施

表-2 試験項目

確認項目	測定項目	試験規格	試験時期
フレッシュモルタルの品質	J ₁₄ 漏斗流下時間	JSCE-F 541	練上がり直後
	練上がり温度	温度計	
硬化モルタルの品質	圧縮強度	JSCE-G 505	材齢28日
	長さ変化率	JIS A 6202 附属書A	材齢1,3,7,14,21,28日

2.2 品質確認試験の概要

表-1 に示す7ケースについて、膨張モルタルの基礎物性の確認を行った。試験項目を表-2 に示す。コンシステンシーの確認のために J₁₄ 漏斗流下時間を測定した。圧縮強度試験用の供試体の採取には、膨張を拘束するために鋼製型枠を使用した。拘束状態での膨張ひずみを確認するために、角柱供試体の中心に鋼材を配置した一軸拘束条件下での膨張性試験により、長さ変化率を測定した。圧縮強度および長さ変化率測定用供試体は、表-1 に示す各養生温度一定の条件下で、翌日脱型するまで封緘養生し、脱型後は試験を行うまで水中養生を行った。

2.3 膨張圧の確認試験の概要

実際の構造物を想定した縮小サイズの鋼管を使用し、その中に膨張モルタルを充填して、膨張圧を測定した(以下、膨張圧試験と呼称)。実験ケースを表-3 に示す。表-1 に示す B~G の6 ケースについて実験を行った。検討要因は、膨張材の混入量、鋼管の寸法、鋼管との付着の有無、鋼管内部に配置される柱の有無および養生温度とした。No.1 を基本とし、各条件を変化させた。No.1~3 では、表-1 に示す3種類の膨張材の混入量で試験を行った。No.4~10 では、外径、厚さおよび長さの異なる鋼管を用いて、鋼管の寸法による影響について確認した。鋼管との付着を低減させるために、No.11 は鋼管の内面にグリスを塗布した。No.15 の供試体は、直射日光の当たらない屋外にて冬期から春期まで静置した。日間の寒暖差のある条件とし、養生温度は 0~22°C の間であった。使用材料は、事前に各養生温度にて保温した。膨張圧は、鋼管の膨張ひずみから式(1)により算出した^{5),6)}。鋼管表面に貼り付けた二軸のひずみゲージによ

表-3 実験ケース

No.	配合種類	膨張材の混入量(kg)	鋼管の寸法			鋼管との付着	模擬柱の有無	養生温度(°C)	備考			
			外径 D (mm)	厚さ t (mm)	長さ L (mm)							
1	C	52						基本(相似比率1/15)				
2	B	42	100	1.2	167			膨張材混入量小				
3	D	122						膨張材混入量大				
4	C	52	100	1.2	200	2.6	333	無処理	無し			
5					400	4.5	667					
6					200	1.2						
7						1.0	167					
8						2.6						
9							84					
10							501					
11										低減		
12											有り	
13					E						無処理	
14	F						35	夏期の想定				
15	G						外気	寒暖差を模擬				

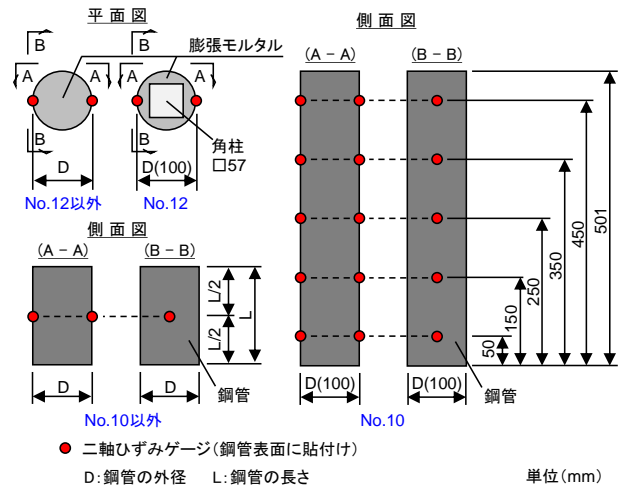


図-2 鋼管の膨張ひずみの測定概要

り円周方向と鉛直方向の2方向の膨張ひずみを計測した。温度の計測を併せて行い、ひずみは温度の補正を行った。鋼管の膨張ひずみの測定概要を図-2 に示す。ひずみゲージは鋼管の表と裏の2か所で測定し、平均値を用いた。鋼管長を長くした No.10 については、長さ方向の膨張圧の分布を測定するために、底面から 50, 150, 250, 350 および 450mm の5か所で膨張ひずみを測定した。

$$p_{\theta} = \frac{E_s \cdot t(\epsilon_{\theta} + \gamma \cdot \epsilon_z)}{r(1 - \gamma^2)} \quad (1)$$

p_{θ} : 膨張圧 (N/mm²)

ϵ_{θ} : 円周方向の鋼管のひずみ

ϵ_z : 鉛直方向の鋼管のひずみ

t : 鋼管の厚さ (mm)

r : 鋼管の内径 (mm)

E_s : 鋼管のヤング係数 (N/mm²)

γ : 鋼管のポアソン比

表-4 品質試験結果

配合種類	膨張材混入量 (kg)	養生温度 (°C)	練上がり温度 (°C)	J ₁₄ 漏斗流下時間 (秒)	圧縮強度 (N/mm ²)
A	23	20	26	8.4	84
B	42		26	7.3	82
C	52		26	7.4	81
D	122		25	7.5	66
E	52	5	11	8.0	43
F		35	41	7.2	78
G		外気	14	7.2	50

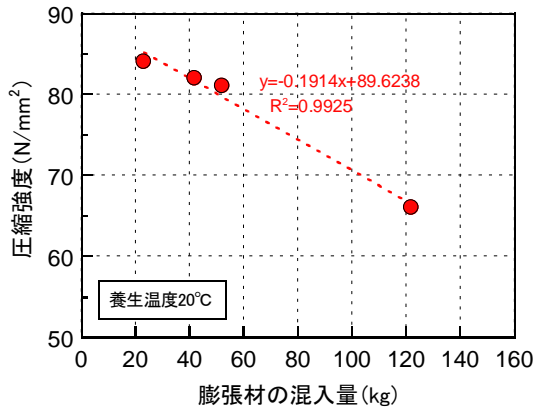


図-3 膨張材の混入量と圧縮強度の関係

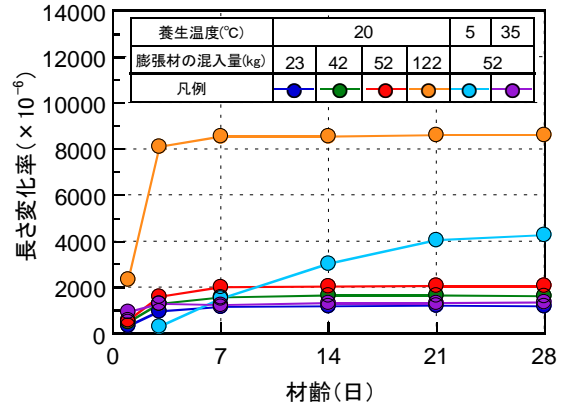


図-4 長さ変化率の測定結果

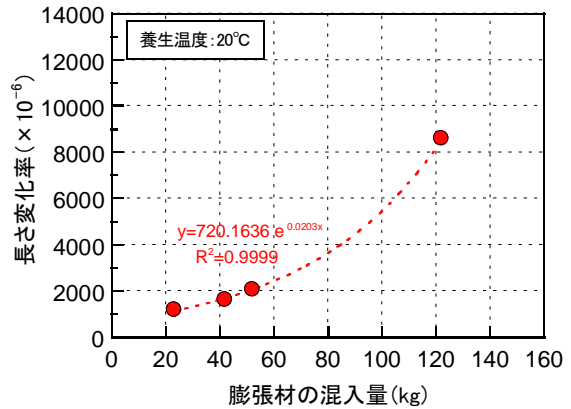


図-5 膨張材の混入量と長さ変化率の関係

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルの品質試験結果

フレッシュモルタルの品質試験および圧縮強度試験の結果を表-4に示す。練上がり温度は、材料温度より6°C程度上昇しており、これは練混ぜ時のせん断や摩擦の影響と考えられる。鋼管内部への充填性を確保するために、J₁₄漏斗流下時間の管理値は4~10秒を目安とし、所要の範囲内となるよう、表-1に示すとおり、練混ぜ水量を調整した。粉体量を一定とした場合に所要のコンシステンシーを得るために必要な練混ぜ水量は、膨張材の混入量122kgのケースについては増加した。また、膨張材の混入量52kgのケースについては、養生温度が20°Cの場合が最も練混ぜ水量が少なく、5°Cと35°Cの場合で両者とも増加した。

膨張材の混入量と圧縮強度の関係を図-3に示す。膨張材の混入量の増加に伴い、圧縮強度が低下した。養生温度5°Cの場合、圧縮強度が低い値となった。供試体は翌日脱型しており、膨張による変形が解放されたためと考えられる。鋼管に充填する場合、拘束効果が持続するため、低温下でも圧縮強度は増加すると思われる。柱に用いるコンクリートは24N/mm²程度を想定しており、柱以上の十分な圧縮強度が得られることが確認できた。

長さ変化率の測定結果を図-4に示す。また、膨張材

の混入量と材齢28日における長さ変化率の関係を図-5に示す。膨張材の混入量の増加に伴い、長さ変化率は増加することが分かった。また、養生温度が5°Cの場合、20°Cの場合と比較して材齢28日における膨張ひずみが2倍程度に増加した。逆に養生温度35°Cの場合には、ひずみが低下した。膨張反応と強度発現のバランスに影響を受けると考えられ、低温下においては、セメントマトリックスの骨格の形成される水和反応の速度が小さくなるため、強度発現が遅く、膨張ひずみが大きくなったものと思われる。逆に高温下では、初期に骨格の形成が進むため、膨張ひずみが抑制されたものと思われる。

3.2 膨張圧試験結果

(1) 膨張材の混入量の影響

膨張材の混入量を変えたNo.1~3の膨張圧の測定結果を図-6に示す。また、膨張材の混入量と膨張圧の関係を図-7に示す。膨張材の混入量の増加とともに膨張圧が増加する傾向が認められた。一軸拘束条件下での長さ変化率と同様の傾向であった。

(2) 鋼管の寸法の影響

鋼管径、鋼管厚および鋼管長の比率が同じで、鋼管の相似比率を変えたNo.1, 4, 5の膨張圧の測定結果を図-8に示す。相似比率が1/15と2/15については、大きな差異は認められないが、相似比率4/15の供試体については、

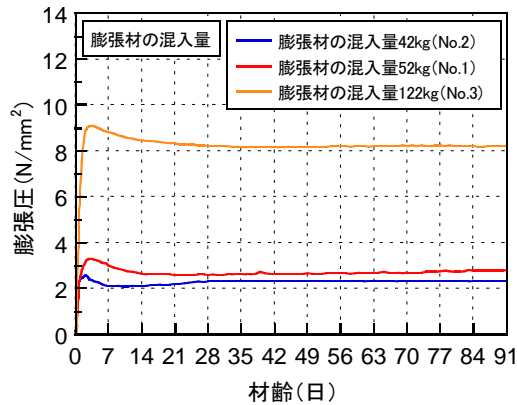


図-6 膨張材の混入量の影響

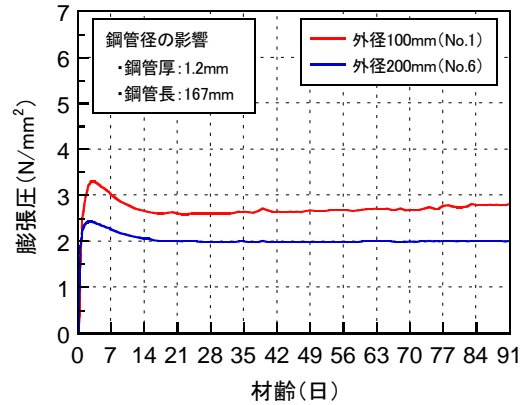


図-9 鋼管径の影響

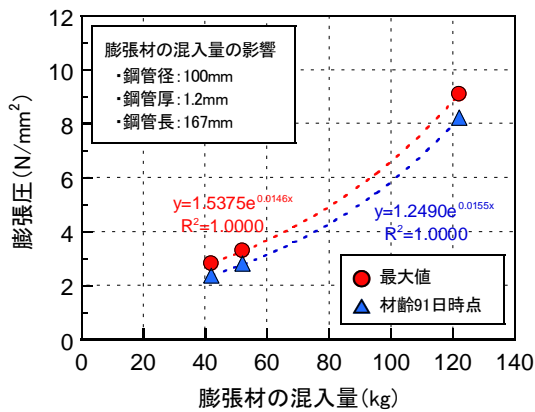


図-7 膨張材の混入量と膨張圧の関係

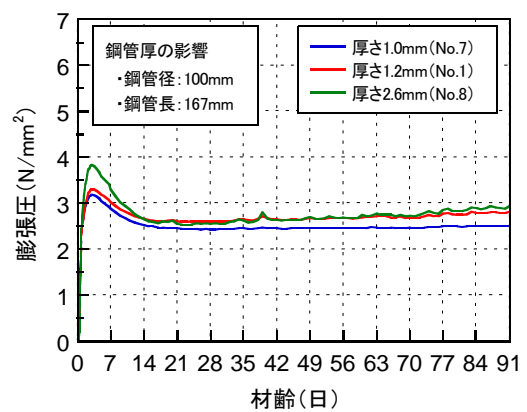


図-10 鋼管厚の影響

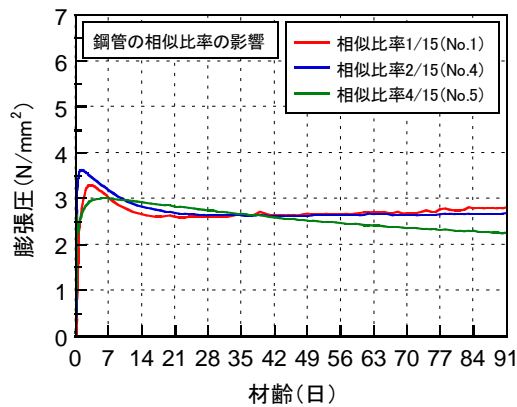


図-8 鋼管の相似比率の影響

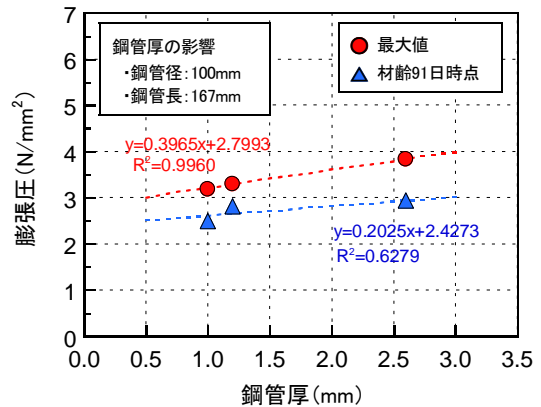


図-11 鋼管厚と膨張圧の関係

材齢 91 日時点の両者とも膨張圧が低下した。鋼管の寸法の大きい方が、膨張モルタルの容積が大きくなり、相対的に外気への放熱量の割合が小さくなり、膨張モルタルの温度が上昇する。そのため、セメントマトリックスの骨格の形成が早まり、膨張圧が低下したと考えられる。

基本の No.1 と鋼管径を 2 倍にした No.6 の膨張圧の測定結果を図-9 に示す。外径を 2 倍にした場合、膨張圧が 3 割程度低下した。外径の増加により、鋼管長に対する外径の割合が増加する。そのため、鉛直方向の拘束効果が小さくなり、膨張圧が低下したと思われる。

鋼管厚を変えた No.1, 7, 8 について、膨張圧の比較を図-10 に示す。また、鋼管厚と膨張圧の関係を図-11 に示す。鋼管厚が厚くなるほど、膨張圧も増加する傾向が認められた。鋼管厚が厚いほど、膨張圧の拘束効果が増大したためと考えられる。

鋼管長を変えた No.1, 9, 10 の膨張圧の測定結果を図-12 に示す。また、鋼管長と膨張圧の関係を図-13 に示す。No.10 については、鋼管の中央部に位置する底面からの長さ 250mm の位置での膨張圧と比較した。鋼管長が長くなるほど、膨張圧が増加する結果であった。

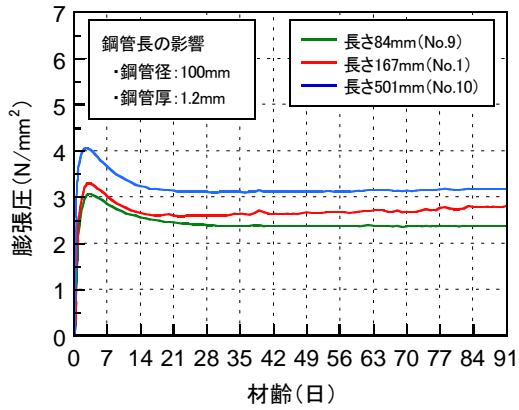


図-12 鋼管長の影響

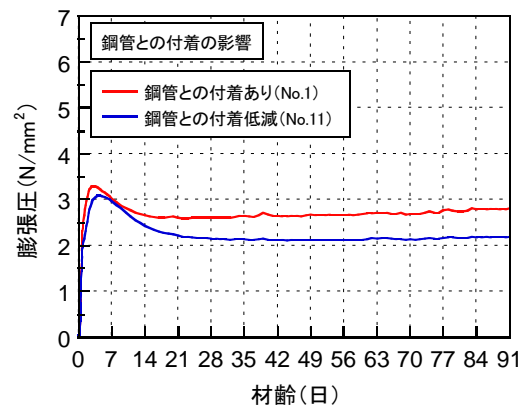


図-15 鋼管との付着の影響

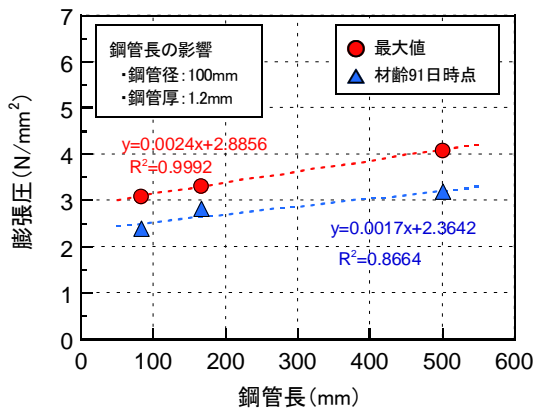


図-13 鋼管長と膨張圧の関係

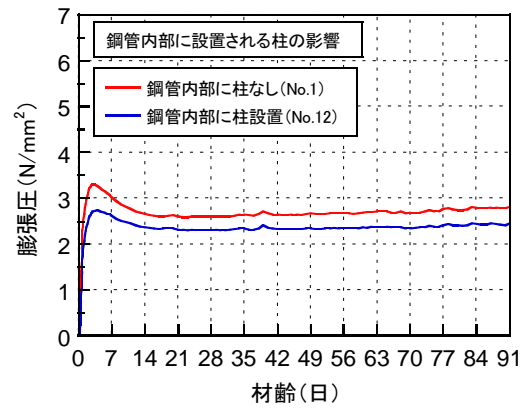


図-16 鋼管内部に配置される柱の影響

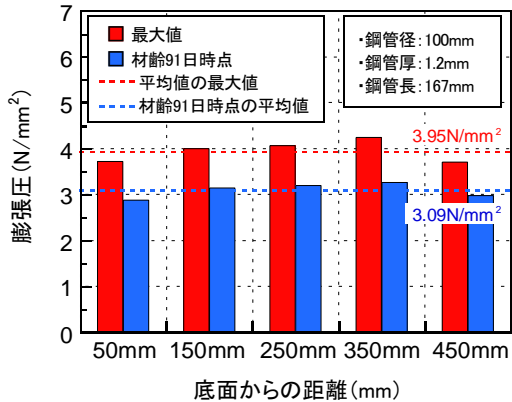


図-14 鋼管の長さ方向における膨張圧の分布

鋼管の長さ方向における膨張圧の分布を図-14に示す。最大値と材齢91日時点の両者とも、鋼管端部では膨張圧が6%程度低下した。外径を2倍にしたNo.6と同様に、鋼管端部は鉛直方向に変形が解放されやすい。そのため、拘束効果が小さくなり、膨張圧が低下したと思われる。

(3) 鋼管の付着の影響

基本のNo.1と鋼管内面にグリースを塗布したNo.11の膨張圧の比較を図-15に示す。無処理のNo.1と比べて、膨張圧が最大値で6%、材齢91日時点で22%低下した。ピーク以降の収縮時に膨張圧の低下量が増加した。鋼管との付着が低減されると、鉛直方向に変形が解放されるため、膨張圧が低下したものと考えられる。

(4) 柱の影響

基本のNo.1と鋼管内部に柱を模擬した角柱を配置したNo.12の膨張圧の比較を図-16に示す。膨張圧が、最大値で17%、材齢91日時点で13%低下した。角柱の設置により、膨張モルタルの容積が減少し、膨張量が低下したこと、角柱の変形により応力が緩和されたことにより、膨張圧が低下したと思われる。しかし、十分な膨張圧が得られており、柱による膨張圧の損失を見込むことで、アンダーピニング工法への適用は可能と考える。

(5) 養生温度の影響

養生温度を変化させた場合の膨張圧の比較を図-17に示す。また、養生温度の履歴を図-18に示す。5℃の場合は、膨張圧が増加する速度は小さいが、膨張圧は増加する結果となった。35℃の場合は逆の結果となった。屋外の気温で養生を行ったNo.15は、5℃のNo.13と比べて膨張圧が高い結果であった。冬期に試験体を作製しており、最大値となる材齢14日までの外気温が低かったため、膨張圧が増大したものと考えられる。20℃のNo.1と比較して、5℃の場合は、膨張圧が最大値で25%、材齢91日時点で11%増加した。35℃の場合は、膨張圧が最大値で49%、材齢91日時点で46%低下した。養生温度と膨張圧の関係を図-19に示す。養生温度と膨張圧の間には相関関係が認められた。戸川らの実験によると、10~20℃の場合膨張ひずみが大きくなるが、5℃以下あるいは

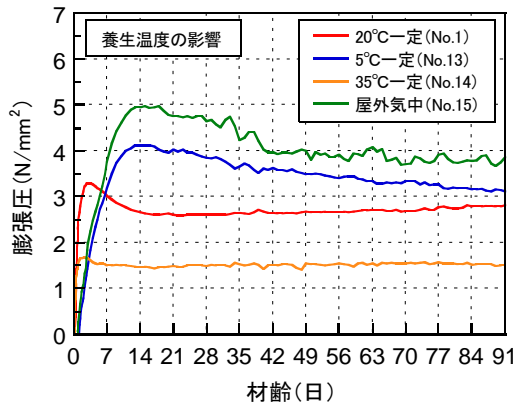


図-17 養生温度の影響

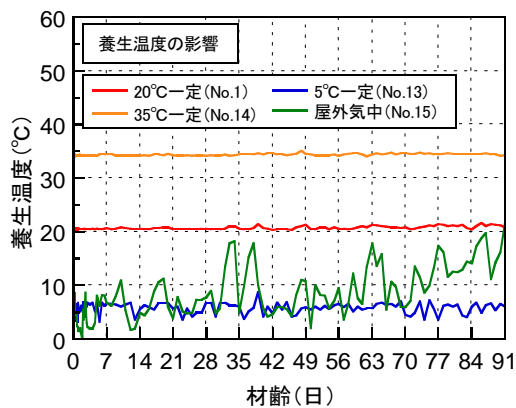


図-18 養生温度の履歴

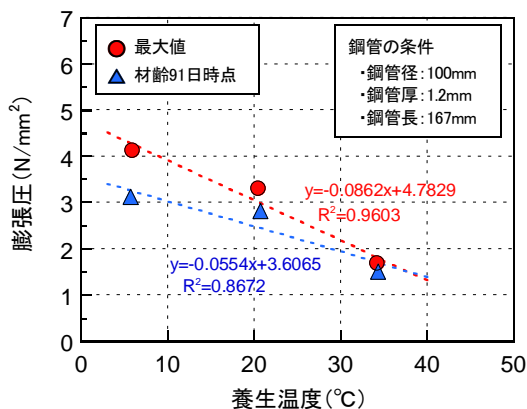


図-19 養生温度と膨張圧の関係

35°C以上となると膨張ひずみが小さくなるとしている²⁾。今回使用した材料はグラウト材であり、5°Cの場合ヤング係数が小さく、変形しやすかったことが原因として考えられる。

4. まとめ

ケミカルプレストレスを導入するために、市販の無収縮グラウト材に膨張材を加えた膨張モルタルの基礎物性を確認した。また、その膨張モルタルを鋼管の中に充填し、各種条件下で膨張圧を測定した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 膨張材の混入量や養生温度が膨張ひずみに及ぼす影響は、一軸拘束条件下の膨張性試験と鋼管に膨張モ

ルタルを充填した膨張圧試験で同様の傾向を示した。

- (2) 粉体量を一定とした場合に所要のコンシステンシーを得るために必要な練混ぜ水量は、膨張材の混入量が増加するほど増加する。また、養生温度が20°Cの場合が最も練混ぜ水量が少なく、5°Cの場合と35°Cの場合で両者とも増加する。
- (3) 追加の膨張材混入量が23~122kgで養生温度が5~35°Cの範囲において、膨張モルタルの圧縮強度は43N/mm²以上であり、十分な強度を確保できる。
- (4) 無収縮グラウト材に追加する膨張材の混入量が多いほど、膨張圧が増加する。
- (5) 鋼管径が小さいほど、鋼管長が長いほどおよび鋼管厚が厚いほど、鋼管の拘束効果が増加し、膨張圧が増加する。
- (6) 鋼管の内面にグリースを塗布し、膨張モルタルとの付着を低減した場合、無塗布の場合と比較して膨張圧が低下する。
- (7) 鋼管の中に、柱を模擬した角柱を設置することで、膨張圧が低下する。
- (8) 養生温度が低いほど膨張圧が増加する速度が遅くなり、膨張圧は増加する。逆に養生温度が高い場合は逆の傾向となる。

謝辞

本研究の実施にあたり、デンカ株式会社の皆様には多大なご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所：アンダー・ピニング設計・施工の手引き，1987.9
- 2) 戸川一夫，中本純次：膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響，土木学会論文報告集，Vol.321，pp.177-187，1982.5
- 3) 戸川一夫，中本純次：膨張コンクリートの拘束膨張，収縮特性に及ぼす使用材料の影響，土木学会論文報告集，Vol.326，pp.129-140，1982.10
- 4) 辻幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究：土木学会論文報告集，Vol.235，pp.111-124，1975.3
- 5) 小林一輔，伊藤利治：膨張セメントの膨張圧に影響を及ぼす諸要因，土木学会論文報告集，Vol.226，pp.67-72，1974.6
- 6) 錦織達郎：膨張コンクリートの内張鉄管への利用に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，Vol.262，pp.129-142，1977.6
- 7) 土木学会：2023年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2023.9