

論文 吹付けモルタルを用いた現場製作型の埋設型枠の耐久性および側圧に抵抗する耐荷力に関する研究

小林 聖^{*1}・田口 翔也^{*2}・デヴィン グナワン^{*3}・曾我部 直樹^{*4}

要旨：吹付けモルタルにより現場製作型の埋設型枠を構造物の外殻として構築し、内部にコンクリートを打ち込むことで鉄筋コンクリート部材とする工法を検討している。本工法により、現場では型枠の組立および脱枠作業が省略されるため、生産性の向上が期待できる。本検討では、現場製作型の埋設型枠に適した吹付けモルタルの配合を選定し、当該吹付けモルタルが良好な施工性と高い耐久性を有していることが確認された。さらに、内部コンクリートを打ち込んだ際の側圧に抵抗する耐荷力についても要素実験により検証し、側圧に抵抗する十分な耐荷力を有していることを確認した。

キーワード：型枠、埋設型枠、吹付けモルタル、耐久性、側圧

1. はじめに

鉄筋、型枠の組立てやコンクリートの打込みなどの作業を主に人力で施工する鉄筋コンクリート（以下、RC）の躯体構築現場では、少子高齢化に伴う担い手不足が強く懸念されている。特に、型枠工は様々な形状の構造物に対して、現場の状況に応じて型枠を加工して組み立てる必要があり、歩掛りや出来形が型枠大工の経験や能力に影響されやすく、今後の型枠大工の減少により生産性および構造物の品質・出来形が低下することが問題視されている。

その対策としてプレキャスト埋設型枠が検討されている。現場での人力による型枠加工や取外しが不要であり、埋設型枠の設置後に内部のコンクリートを打ち込めば部材として完成するため、型枠大工の技量に依存することなく品質の確保と生産性を向上させることができる。しかし、プレキャスト埋設型枠は一般的には工場で作られる製品であることから一般的な型枠材よりも高価となる。さらに、設計、製造、運搬、保管などの多くの工程の調整が必要となることから適用が進んでいないのが現状である。

これに対して、筆者らはコストを従来の型枠による施工と同等としつつ、RC造の柱や壁部材を対象として型枠を省略できる構造・施工技術について検討を行っている¹⁾。柱部材に対する具体的なコンセプトを図-1に示す。事前に設置した芯材に対して、吹付けモルタルによる現場製作型の埋設型枠（以下、吹付け埋設型枠と記載）を構築する。その内部にコンクリートを打ち込むことでRC部材を構築するものである。

上述した工法を実現するため、吹付け埋設型枠の構築

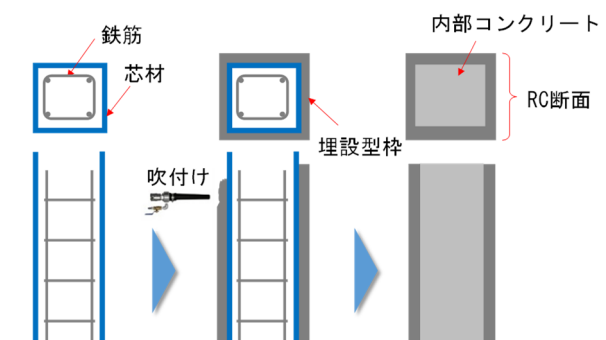


図-1 柱部材に対する本工法のコンセプト

に適した吹付けモルタルの配合検討、吹付けモルタルの耐久性評価および吹付け埋設型枠が内部コンクリート打込み時の側圧に抵抗する耐荷力の検証を行った。本稿ではその結果について報告する。

2. 吹付け埋設型枠の要求性能

本工法は柱および壁部材を適用対象としており、鉛直面にモルタルを吹き付ける必要がある。そのため、鉛直面に吹き付けてもモルタルがだれずに、所定の厚さを確保できることが求められる。また、吹付け埋設型枠は構造物のかぶりに相当するため、一般的なコンクリートと同等以上の耐久性を有している必要がある。さらに、吹付け埋設型枠を構築した後に、内部にコンクリートを打ち込むことから、吹付け埋設型枠には内部コンクリート打込み時の側圧に抵抗する耐荷力が必要となる。

以上より、吹付けモルタルには、鉛直面への付着性、硬化物性、耐久性、側圧に抵抗する耐荷力を要求性能として設定し、これらについて検討を行った。

*1 鹿島建設（株） 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 工修 （正会員）

*2 鹿島建設（株） 技術研究所 土木材料グループ 研究員 学士 （正会員）

*3 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ 研究員 工修 （正会員）

*4 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ グループ長 工博 （正会員）

3. 吹付けモルタルに適した配合

鉛直面にモルタルを吹き付けて付着させるためには、急結性の混和剤をノズル先端で添加して、だれを防止する手法が一般的である。これにより、鉛直面でもモルタルを付着させることができる。しかし、急結性の混和剤を用いた場合、鉛直面に付着した際には既に硬化が始まっているため、吹付け後に表面をこてなどで整形できず、出来形を確保することが困難となる。

そこで、配合の工夫によりモルタルを硬練りとするこ
とで、急結性の混和剤を使用しなくても鉛直面に付着させることを目指した。ここでは、W/C を小さくする（粉体量を増やす）、細骨材量を増やす（ペースト量を減らす）ことでモルタルを硬練りとするこ
ととした。

3.1 配合選定試験の概要

(1) 使用材料および配合

使用材料を表-1 に示す。前述のとおり W/C を小さくすることで硬練りするため、低 W/C でも練混ぜが容易となるシリカフェームセメントを用いた。細骨材は JIS 規格品の砕砂を用いた。

配合を表-2 に示す。本検討では W/C を 20%、16%、14% の 3 水準に設定した。細骨材量は、細骨材/セメント比（以下、S/C）をパラメータとして調整し、0.8～2.0 とした。高性能減水剤にはポリカルボン酸系のものを用い、その添加量を 1.0% に固定した。また、圧送性を確保するために、既往の研究を参考に、輸送管で土砂搬送する際に使用される界面活性剤系の圧送改善剤を結合材に対して 0.04% の添加率でモルタルに添加した²⁾。

(2) フレッシュ性状

フレッシュ性状の評価は JIS R 5201 に準拠してモルタルフロー試験（打撃無し、15 打）を行い、その指標としてモルタルフロー値（打撃無し）で $105 \pm 5\text{mm}$ を目標値とした。

(3) 圧送性

モルタルの圧送性を確認するために、一般的なスクイーズ式のモルタルポンプ（200V、最大吐出量 100ℓ/分、最大吐出圧 2.5MPa）を用いて圧送実験を行った。モルタルホースは内径 40mm、長さ 9m とした。

(4) 硬化性状

硬化性状として、 $\phi 50 \times h100\text{mm}$ の供試体を作製して JIS A 1108 に準じて圧縮強度を、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の供試体を作製して JIS A 1106 に準じて曲げ強度を確認した。供試体は、作製した翌日に脱型して 20℃にて封緘養生し、材齢 28 日に強度試験に供した。

3.2 配合選定試験の結果

(1) フレッシュ性状

S/C とモルタルフロー値の関係を図-2 に示す。S/C を増加させることでペースト量が減少し、W/C=20%におい

表-1 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	シリカフェームセメント、密度：3.08g/cm ³
細骨材	S	砕砂、密度：2.64g/cm ³ 、粗粒率：2.73
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物
圧送改善剤	PA	界面活性剤系

表-2 配合

W/C (%)	S/C	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)			高性能 減水剤 SP (C×%)	圧送 改善剤 PA (C×%)
			水 W	セメント C	細骨材 S		
20	1.2	2.0	204	1020	1176	1.0	0.04
20	1.3	2.0	190	950	1272	1.0	0.04
20	1.6	2.0	175	875	1376	1.0	0.04
20	2.0	2.0	155	775	1513	1.0	0.04
16	1.2	2.0	170	1063	1228	1.0	0.04
14	0.8	2.0	180	1286	1008	1.0	0.04

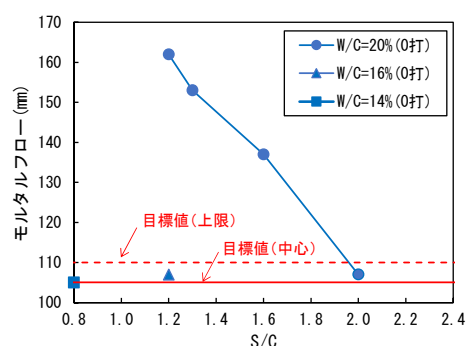


図-2 S/C とモルタルフローの関係

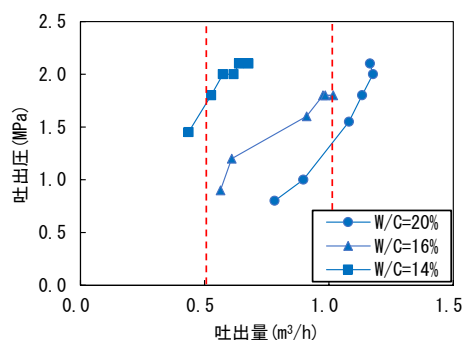


図-3 吐出量と吐出圧の関係

表-3 供試体の硬化物性

水セメント比 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
20	110	42.3	12.0
16	122	43.1	13.2
14	141	44.0	11.0

ては S/C を 2.0 にすることで目標モルタルフローとなることが確認された。さらに、W/C=16%は S/C を 1.2、W/C=14%は S/C を 0.8 とすることで目標モルタルフローとなった。なお、モルタルフロー値（15 打）を各配合で比較すると、ほぼ 150mm と同程度だった。

(2) 圧送性

吐出量と吐出圧の関係を図-3 に示す。いずれの配合

においても使用したモルタルポンプの最大吐出圧内で圧送可能であり、一般的な吹付けモルタルの目標吐出量とされる $0.5\text{m}^3/\text{h}^3$ を満足することができた。さらに、W/C が大きい方が同一吐出圧における吐出量が大きくなり、圧送性が良くなる結果となった。前述のフレッシュ性状では、各 W/C の配合のモルタルフロー値は同等であったが、圧送性に差が生じており、モルタルフローだけでは圧送性の評価が困難であることが分かった。

(3) 硬化物性

強度試験の結果を表-3 に示す。材齢 28 日において圧縮強度は $100\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、曲げ強度は $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以上となった。この硬化物性を踏まえ、内部に打ち込むコンクリートの種類や打上がり高さから想定される側圧に対して、ひび割れを生じることが無いような吹付けモルタルの厚さやセパレータ、支保の配置を決定することとした。

4. 吹付け埋設型枠の施工実験

前章で選定した配合が実際に鉛直面に対して付着可能であること、また、硬化後に所定の硬化物性を有していること、さらに、一般的なコンクリートと同等以上の耐久性を有していることを確認するために、吹付け実験を行った。

4.1 施工実験の概要

(1) 吹付けモルタルの鉛直面への付着性能

ここでは W/C =16%の配合を使用し、吹付け時の鉛直面への付着性能を確認した。縦 $500\times$ 横 $500\times$ 厚さ 100mm の平板が作製できる木製の枠に芯材(写真-1 参照)を設置し、モルタルを吹き付けた。モルタルの圧送にはスクイズ式モルタルポンプ(200V, 最大吐出量 $100\text{l}/\text{分}$, 最大吐出圧 2.5MPa)を使用し、モルタルホースは内径 40mm , 長さ 9m とした。吐出量は $0.7\text{m}^3/\text{h}$ と設定した。なお、芯材として一般的に鉛直打継部のコンクリートの流出防止に使用されているラス網(開口率 59%程度)とエアチューブ($\phi 100\text{mm}$)を設置した。芯材の設置状況を写真-1 に示す。ラス網およびエアチューブは吹付け圧により動かないように背面の桟木に固定した。なお、比較用として芯材を合板とした場合も実施した。吹付け後にこて均しを行い、各種試験に供した。

(2) 吹付け埋設型枠の硬化物性

吹付け後の平板から供試体を切り出して硬化物性確認した。吹付け後は 20°C の室内で封緘養生し、平板から圧縮試験用の $\phi 50\times h100\text{mm}$ の供試体と曲げ試験用の $40\times 40\times 160\text{mm}$ の供試体を切り出し、材齢 28 日で試験を

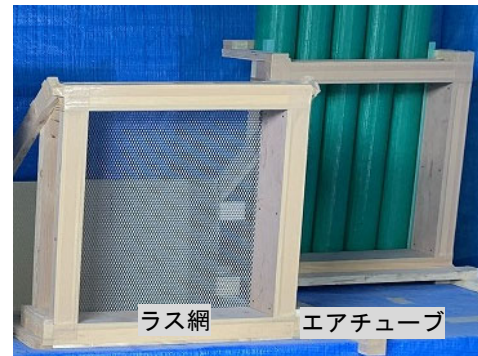


写真-1 芯材の設置状況

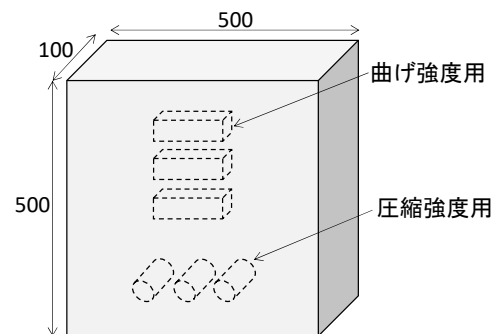


図-4 供試体の切出し位置

表-4 試験項目

試験項目	試験方法	供試体寸法	材齢
細孔径分布	水銀圧入法	$\phi 50\times h100\text{mm}$	28, 91日
塩分浸透	JSCE-G 572	$100\times L400\text{mm}$	浸漬後3カ月
凍結融解	JIS A 1148 (A法)	$100\times L400\text{mm}$	100, 300, 500, 1000サイクル
化学的侵食	JSTM C 7401 (硫酸ナトリウム, 硫酸マグネシウム)	$\phi 50\times h100\text{mm}$	浸漬後1, 2, 4, 8, 13, 26週

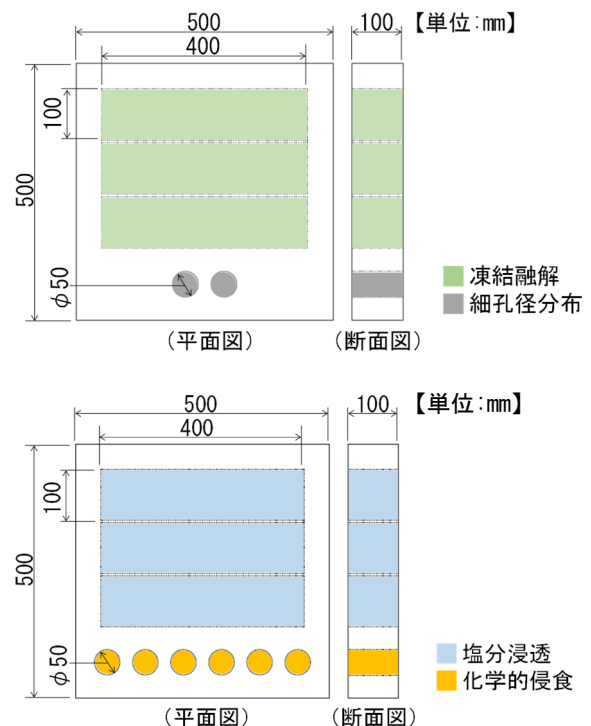


図-5 供試体の切出し方法

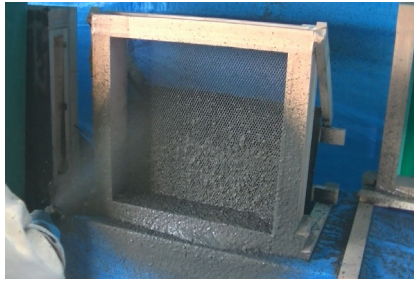


写真-2 吹付け状況

表-5 切り出した供試体の硬化物性

吹付け面	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
合板	126	42.4	12.3
ラス網	121	43.1	12.8
エアチューブ	133	43.2	12.8

行った。供試体の切出し位置を図-4に示す。

(3) 吹付け埋設型枠の耐久性

上記で製作した平板のうち、芯材を合板としたものから供試体を切り出して各種耐久性試験を実施した。試験項目を表-4に、供試体の切出し方法を図-5に示す。平板試験体は20℃の室内で封緘養生し、切出しを行った後、材齢28日から各種耐久性試験に供した。各種試験の規格については表-4に示し、塩分浸漬後の塩化物イオン濃度の測定には、電子線プローブ・マイクロアナライザー(EPMA)を用いた。また、塩分浸漬時の解放面は吹付け側とした。細孔径分布については水銀圧入法により3nm～60μmの空隙量を計測した。

4.2 施工実験の結果

(1) 吹付けモルタルの鉛直面への付着性能

吹付け状況を写真-2に示す。モルタルフロー値(打撃無し)で107mm、モルタルフロー値(15打)で160mmであったが、合板や芯材(ラス網、エアチューブ)に対して吹き付けた結果、いずれもだれることなく鉛直面に付着することが確認された。

(2) 吹付け埋設型枠の硬化物性

切り出した供試体の硬化物性を表-5に示す。吹付け面が合板の場合、圧縮強度は126N/mm²、曲げ強度は12.3N/mm²であった。これは室内で採取した供試体と同等の値(表-2の水セメント比16%の結果)となり、吹付けが硬化物性に与える影響はほとんど無いことが確認された。また、芯材にラス網やエアチューブを使用した場合の圧縮強度および曲げ強度は合板の場合とほぼ同等の値であり、本実験条件においては芯材が強度に及ぼす影響もほとんど無いことが分かった。

(3) 吹付け埋設型枠の耐久性

材齢28日および91日における細孔径分布の測定結果を図-6に示す。全空隙率は材齢28日で5.5%、材齢91日で4.5%であり、材齢経過に伴い空隙率が低下した。超高

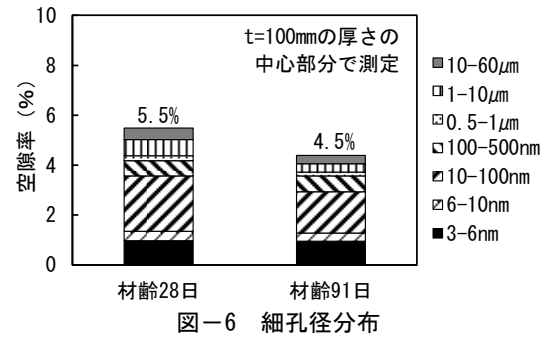


図-6 細孔径分布

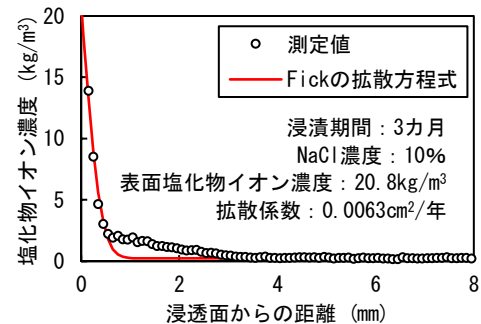


図-7 表面からの塩化物イオン濃度分布

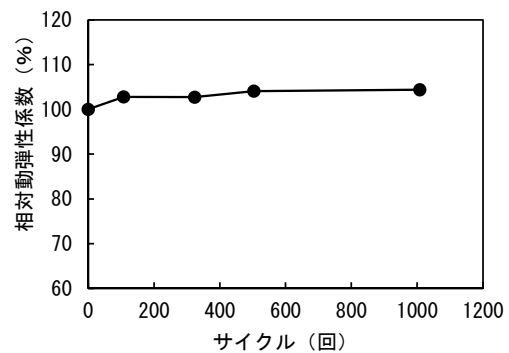


図-8 凍結融解抵抗性

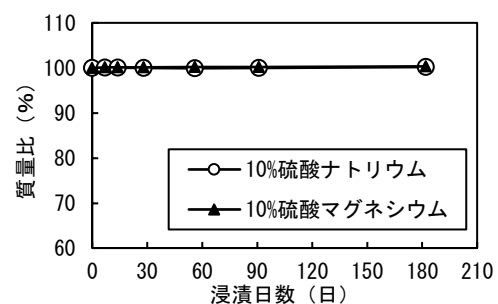


図-9 化学的浸食に対する抵抗性

強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)の空隙率が4.2%程度⁴⁾であることから、本モルタルが非常に緻密な硬化体であることが分かった。

塩分浸漬試験後の試験体を切断し、EPMAにて塩化物イオン濃度の測定を行った。吹付け表面からの塩化物イオン濃度分布を図-7に示す。塩分の浸透はごく表層のみに認められる程度であった。このグラフをFickの拡散方程式により回帰分析し、現時点での拡散係数を算出し

た結果、拡散係数は $0.0063\text{cm}^2/\text{年}$ と算出された。UFC の浸漬期間 6 カ月における拡散係数が $0.0059\text{cm}^2/\text{年}$ ⁴⁾であることから、本モルタルが非常に高い塩分浸透抵抗性を有していることが分かった。

凍結融解試験の結果を図-8 に示す。1000 サイクルにおいても相対動弾性係数の低下は確認されておらず、高い凍結融解抵抗性を有していることが分かった。前述のとおり、緻密な硬化体であるため外部からの水分供給が著しく少ないためと考えられる。

化学的侵食に対する抵抗性を評価するために、硫酸ナトリウム溶液と硫酸マグネシウム溶液に浸漬した結果を図-9 に示す。浸漬期間 26 週においても質量の変化はなく、モルタル表面に溶脱などの変状もないことから、硫酸塩に対して優れた抵抗性を有していることが分かった。

5. 側圧に抵抗する耐荷力に関する検討

本工法は、吹付け埋設型枠の内部にコンクリートを打ち込むことで構造物として成立させる。そのため、吹付け埋設型枠はコンクリートの側圧に抵抗する必要がある。吹付け埋設型枠の曲げ強度に加えて、セパレータや支保の設置が重要となる。一方で、柱や壁のようにコンクリートの打込み高さが大きい場合には、打込み時の側圧も大きくなり、多くのセパレータや支保の配置が必要となり、生産性にも影響する。そこで、部材に配筋されるせん断補強筋をセパレータとして活用する方法を考案した⁹⁾。図-10 に示すように、せん断補強筋の両端の定着部を吹付け埋設型枠内に埋め込むことで、コンクリート打込み時の側圧に対してせん断補強筋がセパレータとして抵抗する。本設材であるせん断補強筋を活用することで、仮設材のセパレータや支保の追加が不要となるため、現場作業を増やすことなく吹付け埋設型枠の補強を行うことができる。

5.1 せん断補強筋の定着性能確認実験

吹付け埋設型枠内に定着させたせん断補強筋がコンクリートの打込み時にセパレータとして機能するためには、側圧によって作用する引張力に対して十分な定着性能を有している必要がある。そこで、定着部を模擬した引抜き実験を行い、定着性能を確認した。試験体の概要を図-11 に示す。試験体は、長さ 600mm、幅 450mm の平板とし、厚さを 40、60、100mm の 3 水準とした。ラス網（開口率 59%程度）を芯材として設置し、定着力の向上とひび割れ発生後における吹付け埋設型枠の曲げじん性を高めるためのメッシュ筋(D6@100)を重ねて配置した。平板の中央に機械式定着を有するせん断補強筋の定着部を配置し、定着部は表面からのかぶりが 10mm となるように設置した。なお、一般的なコンクリート構造物のかぶりを満足できていないが、耐久性については前述した

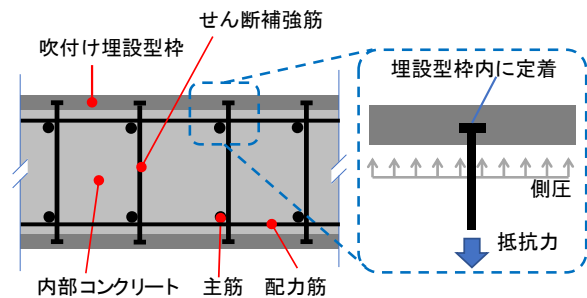


図-10 せん断補強筋を活用する方法

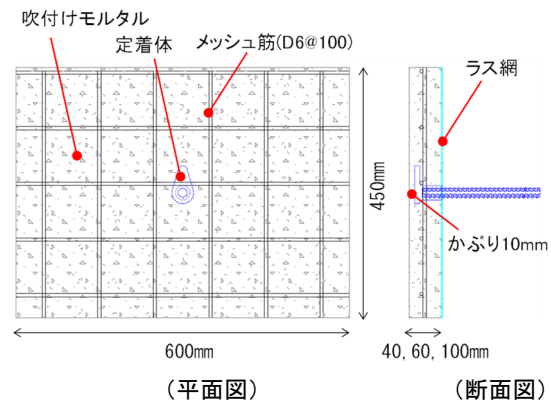


図-11 試験体の概要

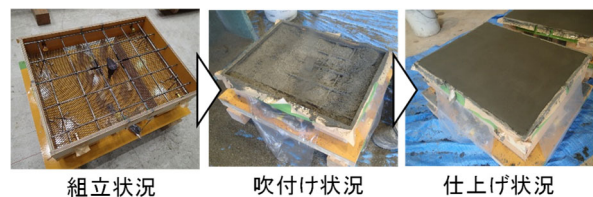


図-12 試験体の製作状況

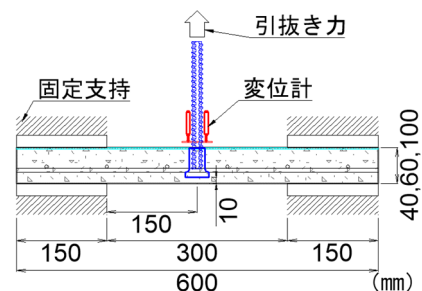


図-13 引抜き実験の概要

高い遮塩性により担保することを検討している。試験体の製作状況を図-12 に示す。吹付けモルタルは試験体の上方から鉛直方向に吹き付け、いずれの厚さも一層で仕上げた。

引抜き実験の概要を図-13 に示す。本実験では、450mm 間隔でせん断補強筋を配置した吹付け埋設型枠にコンクリートの側圧が作用することを想定し、その際にせん断補強筋に作用する引抜き力とそれによって平板に生じる断面力が同じ大きさとなるように、平板のスパンを 300mm として両端を固定支持とした状態で鉄筋に引抜き力を作用させた。荷重と変位の関係を図-14 に示

す。同図には、普通コンクリートおよび高流動コンクリートを、打込み高さ 5m、セパレータとして機能させるせん断補強筋を 450mm ピッチとした場合にせん断補強筋に作用する最大引張力について、示方書に準拠して算出した結果を併せて示す。吹付け埋設型枠の厚さ（定着深さ）の増加に伴って最大荷重が大きくなり、厚さ 40mm および 60mm の試験体は引抜き破壊し、厚さ 100mm の試験体は鉄筋が降伏するまで引抜き破壊することはなかった。いずれの試験体も、最大荷重まで拔出し変位が急増するようなことはなく、定着部付近におけるひび割れも確認されなかった。最大荷重は、全ての試験体において普通コンクリートを想定した側圧に相当する荷重を超えている。また、厚さ 60mm 以上の試験体では、高流動コンクリートを想定した側圧（液圧）に相当する荷重に対しても十分な定着力を示した。このことから、コンクリートの側圧に対して、せん断補強筋の配置間隔および埋設型枠の厚さを調整することで、必要となる定着性能を確保できることが確認できた。

5.2 せん断補強筋の定着力の算出

土木学会コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)⁹⁾に記載される式を参考として、図-15に示すように、せん断補強筋の定着部から 45 度のコーン状破壊が生じた際の荷重を算出した。使用材料の特性、および定着力の実験値と計算値を表-3 に示す。コーン状破壊における抵抗面積は、定着部頭部の形状を考慮して設定し、計算式における安全係数は 1.0 とした。表-3 に示すように、引抜き破壊を示した厚さ 40, 60mm の試験体を対象とした定着力の計算値は、実験値の 0.71~0.88 であった。よって、指針に準じた定着力の算出結果は、安全側の評価となることが分かった。

6. おわりに

今回の検討により得られた結果は以下のとおりである。

- (1) W/C および S/C の調整により硬練りのモルタル配合を選定した。
- (2) 鉛直面に対して、急結剤を使用せずにだれることなく吹付けモルタルを付着させることができた。
- (3) 吹付けモルタルにより製作された埋設型枠は高強度かつ緻密であり、塩分浸透、凍結融解および化学的侵食に対する高い耐久性を有していた。
- (4) 内部コンクリート打込み時の側圧に対して、せん断補強筋の端部を吹付け埋設型枠内に定着させることでセパレータとして機能させる方法を検討し、十分な定着性能を有することを確認できた。

本工法では、芯材の設置や吹付け後の左官仕上げが新たな作業として追加されるため、今後はそれらの作業の合理化を検討する予定である。

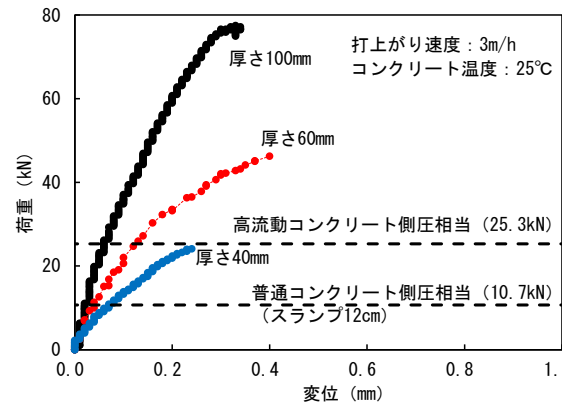


図-14 荷重と変位の関係

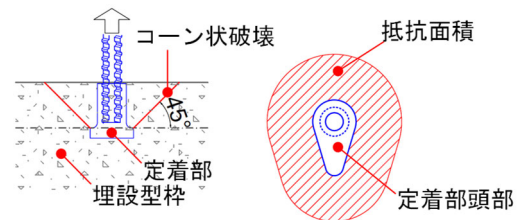


図-15 せん断補強筋の定着力算出概要

表-3 使用材料の特性と定着力の比較

項目		厚さ	40 mm	60 mm	100 mm
吹付けモルタル	圧縮強度	N/mm ²	139.4	123.7	139.4
	曲げ強度	N/mm ²	8.3	7.7	8.3
	弾性係数	kN/mm ²	42.7	41.0	42.7
せん断補強筋	降伏強度	N/mm ²	391.0		
	弾性係数	kN/mm ²	200.0		
メッシュ筋	降伏強度	N/mm ²	456.8		
	弾性係数	kN/mm ²	200.0		
定着力	実験値	kN	24.1	46.2	(77.5)
	計算値	kN	17.1	40.6	-
	計算値／実験値		0.71	0.88	-

※ () は鉄筋降伏時の荷重を示す。

参考文献

- 1) 横田祐起ほか：吹付け可能な鋼繊維補強コンクリートによる外殻を有する RC 梁部材の曲げ実験，土木学会第 74 回年次学術講演会，V-388，2019.9
- 2) 吉田祐麻ほか：構造物の外殻形成を目的とした吹付け用繊維補強モルタルの検討，土木学会第 76 回年次学術講演会，V-127，2021.9
- 3) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案），2005.4
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004.9
- 5) Devin Gunawan ほか：せん断補強筋を活用した吹付けによる外殻構造の補強方法に関する検討，土木学会第 76 回年次学術講演会，V-479，2021.9
- 6) 土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針（案），2014.3