

論 文

[1106] 場所打ちライニング工法における充填性に関する実験

正会員○山田正貴（五洋建設技術研究所）

正会員 小堀光憲（五洋建設技術研究所）

正村伸尋（五洋建設技術研究所）

1. まえがき

場所打ちライニング (Extruded Concrete Lining ; ECL) 工法とは、シールド機の一部であるテールプレートを外型枠とし、内型枠、妻型枠用リング (プレスリング) を組み立て、直にコンクリートを打設し、シールド機を推進させると同時にテールボイド (テールプレートを引き抜いた後の空隙部) 内にフレッシュコンクリートを加圧充填する工法である。本工法は、地盤沈下の防止、覆工の品質向上、および経済性に優れるなどの特長を有するため最近脚光を浴びている。

本研究は、上述のECL工法における研究・開発の基礎資料を得るために、模擬的な平面模型による実験装置を用いてフレッシュコンクリートを加圧した時の圧力伝播特性、テールボイド内のコンクリートの充填性等についてまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験で使用した材料を表-1に示す。混和剤は、加圧ブリージング試験 (加圧力5, 35 kgf/cm²)、スランプの経時変化などの試験を5種の混和剤について実施し、脱水率、スランプの小さいメラミンスルフォン酸塩系複合物の流動化剤を用いた。示方配合を表-2に示す。なお、スランプは18±2cm、空気量は4±1%となるよう各材料の単位量を決定した。

2.2 装置および実験方法

圧力伝播特性、充填性等を把握するのに使用した充填性模擬装置を図-1に示す。本装置はシールドのテール部の一部を想定したもので覆工厚280mm (打設厚250mm)、幅600mm、長さ900mmである。実験ケース一覧を表-3に示す。CaseNo.5の二段加圧方法とは、背面部より

表-1 使用材料

セメント	○社製普通 Portlandセメント (比重: 3.16)				
細骨材	鬼怒川産川砂 (比重: 2.61)				
粗骨材	八王子産砕石 5~10mm (比重: 2.64) 八王子産砕石 10~20mm (比重: 2.67)				
混和剤	N社製流動化剤<遲延形> (メラミンスルフォン酸塩系複合物)				

表-2 示方配合

G _{max} (mm) (%)	W/C (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
20	52	45.4	175	337	804	982	1.99

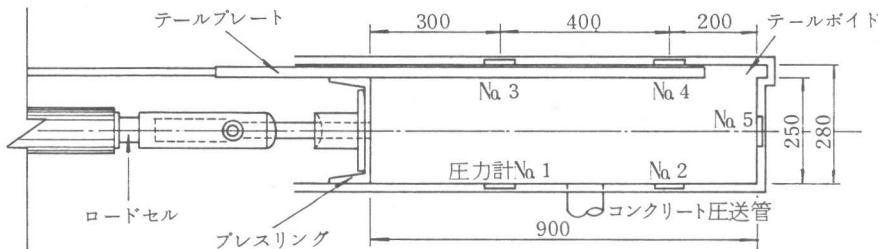


図-1 充填性模擬装置 (単位: mm)

覆工長さ半ばまでのコンクリートは、スパン中央のプレスリング（1次プレスリング）で加圧し、1次プレスリング上をテールエンドが通った時点での圧力を除荷、その後、従来のプレスリング（2次プレスリング）で加圧する方法である。実験方法としては鉄筋カゴ、プレスリングを所定位置にセットしコンクリートをポンプにより打設した後、コンクリートを30分間加圧、無筋では加圧初期よりテールプレートを2.70cm/minで引き抜いた。また、有筋では最初の5分間、テールプレート固定の状態でコンクリートを圧力保持し、その後、テールプレートを3.20cm/minで引き抜いた。コンクリートは加圧と同時に下面に設けられた脱水孔より脱水される。測定項目としては、上面、下面、背面側に設置した計5ヶの圧力計〔BE-5KR S₁₂, BE-2KM(背面側)〕によるコンクリート圧力と、充填性(加圧後、上面をはずしスケッチ、写真撮影)である。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの充填状況

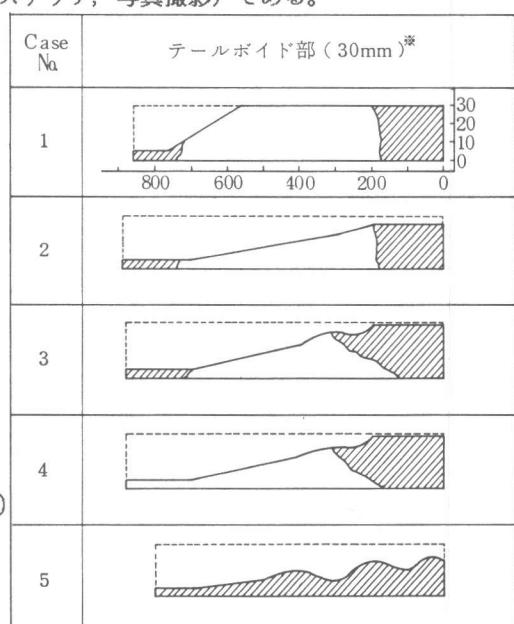
各実験ケースの加圧完了後のテールボイドへのコンクリートの充填状況を縦断面図にして図-2に示す。無筋コンクリートの場合(CaseNo.1)、十分ではないが比較的コンクリートの充填性は良好である。一方、鉄筋コンクリートの場合(CaseNo.2, 3)、テールボイドの全ての横断面図が充填されるのは背面より20cm程度である。また加圧力を2.5kgf/cm²から5.0kgf/cm²に上げた場合(CaseNo.4)でも、充填割合はほとんど変わらない。さらに、加圧方法を1段加圧から2段加圧方法に変えた場合(CaseNo.5)でも、縦断面形状に変化があるものの充填性は改善されないことがわかる。これらの理由に関しては3.2項以降の圧力の伝播特性で述べる。

3.2 無筋コンクリートの圧力伝播特性

無筋コンクリート(CaseNo.1)の各位置における圧力計より得られたコンクリート圧力の経時変化を図-3に示す。圧力がほとんど発生しなかったNo.3のものは削除している。下面部に作用する圧力(ここでは側圧と呼ぶ)、すなわち、圧力計No.1, 2の値は、加圧初期に大きく、時間の経過とともに漸次減少する傾向にある。背面部に作用する圧力(背面圧と呼ぶ)、すなわち、圧力計No.5の値は加圧初期に大きいが、一端減

表-3 実験ケース一覧

Case No	加圧方法	加圧力(kgf/cm ²)	鉄筋カゴ	鉄筋カゴ配置図
1	1段	2.5	無	
2	1段	2.5	有	
3	1段	2.5	有	
4	1段	5.0	有	
5	2段	2.5	有	



* 斜線部分は締め固まっていない部分

図-2 テールボイド部充填状況

少し再び上昇する傾向にある。上面部に作用する圧力（充填圧と呼ぶ），すなわち、圧力計No.4の値は、加圧開始後約12分頃から上昇し始めコンクリートの充填が進行するにつれて増大する傾向にある。

今、側圧の時間的な変化（減少する傾向）がフレッシュコンクリートの物性値の変化に起因しているという仮定に基づいて考察する。

フレッシュコンクリートの側圧の算定には、いくつかの実験式やグラフが提案されている。ここでは、(1)に示す土圧公式¹⁾を用いて、側圧の実測値から見掛けの側圧係数（換算土圧係数ともいう）と内部摩擦角を逆算すると表-4のようになる。ただし、型枠とコンクリートとの摩擦角は $\delta = 12^\circ$ と仮定している。

$$P = K \cdot \cos \beta \cdot p_0 + \gamma \cdot h \quad (1)$$

(Kと内部摩擦角 ϕ との関係式は省略)

ここで、P；コンクリートの側圧 (kgf/cm²)

K；見掛けの側圧係数

β ；型枠と水平面との傾斜角（ここでは $\beta = 0$ ）

p_0 ；加圧全面での圧力 (kgf/cm²)

γ ；コンクリートの単位体積重量 (0.00235kg/cm³)

h；覆工厚さ (h=25cm)

表-4より、No.2の圧力計より推定した15分以降のコンクリートの物性値に顕著な差異があることがわかる。この差異は、経過時間が15分以降になると圧力計No.2の真上の上面部付近までテールプレートが引き抜かれる結果、テールボイドにコンクリートが流动し圧力が解放されるため見掛けの側圧が小さくなったものと推察される。このことは、前述した圧力計No.4の圧力が増大することからも伺い知れる。

以上より、加圧初期のコンクリートの物性値は、側圧係数が0.30～0.45、内部摩擦角が $20^\circ \sim 30^\circ$ となり、その後、加圧開始から15分以降になると、側圧係数が約0.20、内部摩擦角が約 40° になる。

この物性値の変化は、主として加圧による脱水作用と骨材のインターロッキングによる作用に起因するためコンクリートの配合条件、加圧力の大きさ、加圧速度などにより、それぞれ異なることが予想される。しかしながら、これらの種々の条件が変わっても時間に依存する要素が強いため、加圧を受けたフレッシュコンクリートの物性値は、概ね上述の値になるものと推察できる。つぎに、背面圧（圧力計No.5）について考察する。コンクリート中の圧力の伝播はフレッシュコ

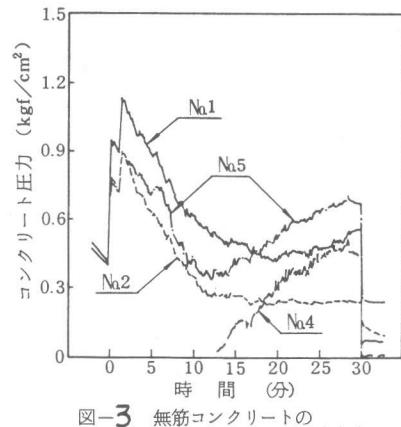


図-3 無筋コンクリートのコンクリート圧力経時変化

表-4 コンクリートの側圧係数と内部摩擦角

		圧力 (kgf/cm ²) P	側圧係数 K	内部摩擦角 ϕ
No.1 圧 力 計	初期	1.0 ~ 1.15	0.38 ~ 0.44	20° ~ 25°
	15分 以降	0.5 ~ 0.6	0.18 ~ 0.22	40°
No.2 圧 力 計	初期	0.8 ~ 0.9	0.30 ~ 0.34	25° ~ 30°
	15分 以降	0.25	0.08	50° 以上

ンクリートと型枠との摩擦により損失されるものと仮定し
図-4に示すようなモデルを考える。ここで、コンクリートの自重による影響は小さいので無視する。

プレスリング前面に加圧力 $\sigma_0 A$ (σ_0 : 加圧応力, A : 加圧断面積) が作用したとき、加圧前面より X 離れた点で $\sigma_0 A$ 微小領域 dX を取り出し圧力のつり合いを考えると方程式は(2)式となる。

$$(\sigma_x + d\sigma_x) A + \tau u dX = \sigma_x A \quad (2)$$

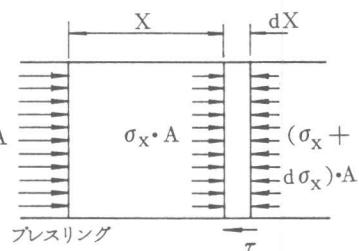


図-4 評価モデル

ここで、 τ ; 摩擦応力で σ_x の関数として表せる ($\tau = \alpha \cdot \sigma_x$)
 u ; コンクリートと接する型枠面の周長

$$(2) \text{ 式を整理すると、 } d\sigma_x A + \alpha u \sigma_x dX = 0$$

$\alpha u / A = \beta$ とおき、境界条件 $X = 0$ で $\sigma_x = \sigma_0$ を用いることにより解は(3)式となる。

$$\sigma_x = \sigma_0 e^{-\beta X} \quad (3)$$

ここで、定数 α は、前述した見掛けの側圧係数 K 、フレッシュコンクリートとスチール製型枠との摩擦係数 μ を乗じたものと考えることができる ($\alpha = K \cdot \mu$)。加圧の終了近傍におけるNo.5の圧力の実測値 $\sigma_x = 0.68 \text{ kgf/cm}^2$ 、側圧係数 $K \approx 0.2$ 、 $\sigma_0 = 2.50 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $u = (60 + 25) \times 2 = 170 \text{ cm}$ 、 $A = 1500 \text{ cm}^2$ を(3)式に代入して摩擦係数を逆算すると $\mu = 0.64$ となる。また、同様にして加圧初期の摩擦係数を逆算すると $\mu \approx 0.30$ となる。フレッシュコンクリートと型枠との摩擦係数が実際にいくらかは実験的に詳査する必要があるが、 $\mu = 0.30 \sim 0.64$ という値は、コンクリートの物理的な性状から判断してかけ離れた値ではないと推察できる。

したがって、無筋の場合の加圧を受けるフレッシュコンクリートの圧力伝播特性は、摩擦係数 μ 、側圧係数 K を用いて(3)式によって大略把握することが可能である。

3.3 鉄筋コンクリートの圧力伝播

図-5に鉄筋カゴの有無によるコンクリート圧力の経時変化を示す。鉄筋カゴを挿入することによりフレッシュコンクリートの圧力伝播の様相は、無筋の場合のそれと著しく異なる。すなわち、鉄筋とコンクリートとの摩擦や付着による抵抗および加圧方向と直角方向に配筋される主筋の受圧抵抗などにより、鉄筋カゴ内部のコンクリートが擬似的に閉塞し、杭効果を発揮して圧力集中を生じさせる結果、背面圧が無筋の場合に比べて著しく大きくなる。一方、背面への圧力集中の影響のため、有筋の場合のコンクリートの側圧は無筋の場合のものに比べて小さくなり、また、充填圧はほとんど発生しない。以下、個々の圧力計について記述する。

・圧力計No.1： 加圧初期においては、無筋の場合と同様な圧力が作用するものと考えられる。すなわち、見掛けの側圧係数が0.4、圧力が約 1.00 kgf/cm^2 のものが作用するものと推察される。実測値CaseNo.2の値が約0.5と小さめになっているのは、コンクリートのポンプ圧送時に過大な圧力をかけすぎたためと考えられる。加圧開始後約20分頃から側圧が漸次減少し加圧終了間際

にはほとんど作用しなくなり、無筋の場合の圧力の経時変化と大きく異なる傾向を示している。この理由は、前述の鉄筋カゴによる背部への圧力集中の影響と考えることができる。

・圧力計No.2：加圧初期における側圧は約1.00～1.10 kgf/cm²で無筋の場合とほぼ等しいと考えることができる。また、この側圧が14～15分頃までそのまま保持されるのは、テールボイドへのコンクリートの流動がほとんどないためと考えられる。さらに、14～15分経過時に側圧が急激に低下するのはテールプレートの先端部が圧力計の真上にさしかかるのと同時にテールボイドへのコンクリートの充填がある塊で生じるため、圧力が解放されることに起因していると考えられる。

・圧力計No.5：有筋の場合の背面圧は加圧初期から上昇傾向にある。無筋の場合の最終的な背面圧約0.7kgf/cm²と比べると、有筋の場合のそれは圧力集中によって約4倍の2.8kgf/cm²になっていることが分かる。

3.4 鉄筋カゴの先端位置の違いによる圧力伝播の差異

鉄筋カゴの先端位置を背部より5cmまで近づけたCaseNo.3と背部より20cm離したCaseNo.2の結果を図-6に示す。圧力計No.1, 2の結果、すなわち、側圧に関しては、鉄筋位置の差異がほとんどないので比較することを省き図-5に併記している。図-6より、当然のことながら鉄筋カゴの先端部を背部に近づけるほど、背面圧は加圧半ば以降に圧力集中度が大きくなる傾向にあることがわかる。

3.5 加圧力の違いによるコンクリートの圧力伝播

図-7に加圧力の違いによるコンクリート圧力の経時変化を示す。図中、圧力計No.1についてはカッコ内に圧力伝達率（コンクリートの圧力／加圧力）を記している。圧力計No.1では加圧力の違いにより側圧の差異が認められるが、経時的な圧力伝達率はほぼ等しい。このことはテールボイドへのコンクリートの充填や硬化コンクリートの品質改善を主眼とする場合、ある範囲内で加圧力を大きくすることが望ましいと言える。一方、同じ側圧でも圧力計No.2においては、加圧力の大きさによって加圧初期から加圧半ばまで全く異なる様相を呈している。すなわち、加圧力5.0kgf/cm²の実験CaseNo.4の場合は加圧開始直後から側圧が指数的に減少している。この理由は次のように考えることができる。加圧力が大きくなると、コンクリート中の脱水および骨材同志のインターロッキングが比較的初期に促進される。その結果、見掛けの側圧係数の急激な減少と鉄筋カゴ内のコンクリートの擬似的な閉塞とが並行してより背部まで進行する。このため、背部へ

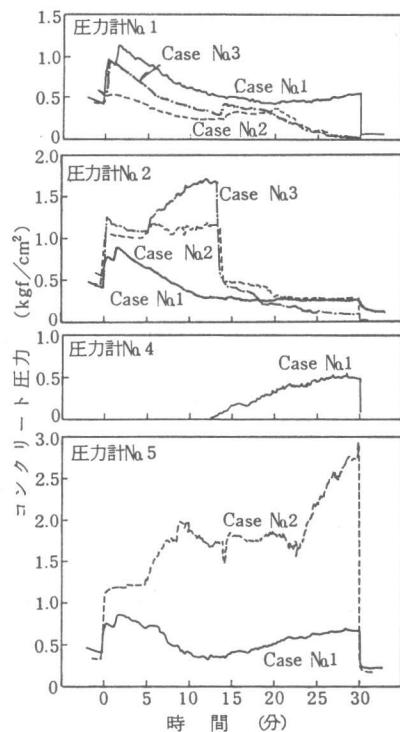


図-5 鉄筋カゴの有無によるコンクリート圧力経時変化

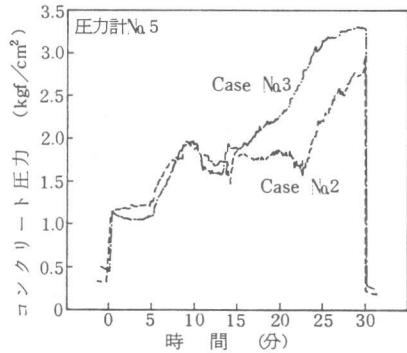


図-6 鉄筋カゴの先端位置の違いによるコンクリート圧力経時変化

の圧力集中が加圧初期から起こり、テールボイドへのコンクリートの充填が連続的に起こりやすくなる。

3.6 加圧方法の違いによる圧力伝播特性

1段加圧方法 (Case No. 3) と 2段加圧方法 (Case No. 5) の圧力の経時変化を図-8に示す。

圧力計No. 1, 2の側圧は、当然段階的に加圧しているため1段加圧方法による場合と異なる。しかし、一次加圧および二次加圧時とも加圧初期における見掛けの側圧係数は一段加圧方法の場合とほぼ等しい。圧力計No. 5の背面圧は、2段加圧方法による場合圧力集中が緩和される傾向にある。この加圧方法は加圧方法自体にまだ種々の問題があるが1段加圧方法に比べてコンクリートが変形しやすくテールボイドへの充填性を高めるためには有効な1つの方法であると考えられる。

4.まとめ

ECL工法に模擬的な実験装置を用いてコンクリートの充填性ならびに圧力伝播などに関する実験を行った結果つきのようなことが明らかとなった。

- 1) フレッシュコンクリートの物理的性状は、加圧を受けると脱水と骨材のインターロッキング作用などによって急変し、特に圧力伝播特性に重要な側圧係数は、加圧初期における値約0.4に対して加圧終盤におけるそれは約0.2となる。
- 2) また、鉄筋カゴが挿入されると、鉄筋カゴの杭効果によって背面への圧力集中が生じて側圧は小さくなる。
- 3) この結果、2.5~5.0 kgf/cm²の加圧力の範囲では、テールボイドへのコンクリートの充填に必要な充填圧は十分に発揮されにくい。
- 4) 二段加圧方法によると、背面への圧力集中度が少なくなり一段加圧に比べてコンクリートの変形がしやすくなる。
- 5) 充填率を高めるためには、加圧力を大きくするとか、見掛けの側圧係数を大きくするような材料、施工的な工夫が必要である。

5.あとがき

本報告は本工法のテールボイドへの充填性に着目したもので、テールボイドへの十分な充填が確保されなくとも、所定の高品質の覆工は可能である。加圧を受けたフレッシュコンクリートの硬化後の諸特性については別の機会に発表したい。

参考文献

- 1) 大内、秋元、小原; コンクリート工事ポケットブック、山海堂, pp.198~199

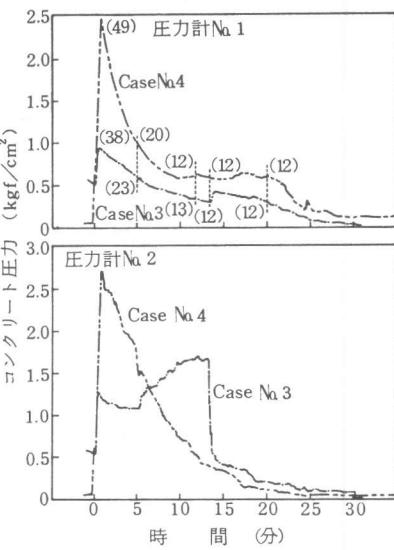


図-7 加圧方法の違いによるコンクリート圧力経時変化

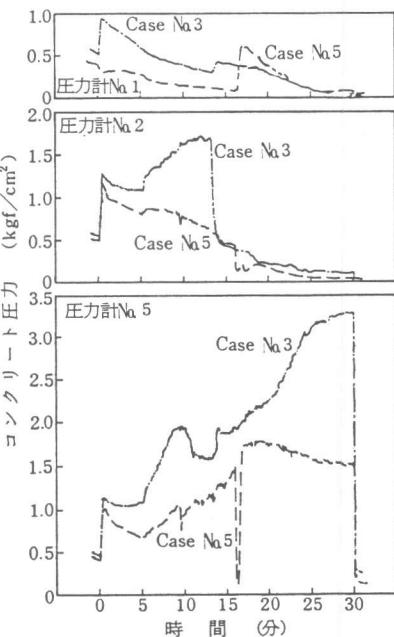


図-8 加圧方法の違いによるコンクリート圧力経時変化