

スリップフォーム工法による貯炭サイロの施工

佐 藤 賢 次*
白 戸 伸 明**
工 藤 雄 一***

概 要 北海道電力(株)苫東厚真発電所4号機の石炭貯蔵施設として7,000t貯炭サイロを3基建設した。貯炭サイロ筒体上部の施工方法にスリップフォーム工法を採用すると共に、その上昇と同時に屋根鉄骨をリフトアップする工法を採用した。また、スリップフォームコンクリートの若材齢強度の試験方法として定量的、簡易的かつ低コストな試験方法として「コンクリート凝結時間試験」の貫入抵抗試験装置および「土壌硬度試験」の硬度計を用いてその適応性を検討した。

キーワード：スリップフォーム、リフトアップ、フライアッシュコンクリート、若材齢強度、積算養生温度

1. はじめに

北海道電力(株)苫東厚真発電所4号機(最大出力70万kW、微粉炭燃焼)増設工事は、平成11年3月に工事を開始し、平成14年6月の運転開始を目指して、現在、鋭意建設工事中である。¹⁾

石炭の貯炭方式は、屋外と屋内貯炭に大別されるが、構内の敷地面積、石炭の混合性能および環境対策を考慮して、当社初の屋内貯炭方式のサイロ方式を採用した。なお、当発電所の石炭は隣接する苫東コールセンター(株)(年間供給能力400万t)から運炭コンベアで直接貯炭サイロへ供給される。

筒体の施工方法は、筒体下部をプレキャストコンクリートを併用した在来工法、筒体上部をスリップフォーム工法で施工した。また、スリップフォームの上昇と同時に屋根鉄骨をリフトアップする工法を採用した。

2. 貯炭サイロの概要

貯炭サイロは、外径23.4m、高さ35.6m、石炭容量7,000t/基×3基で、石炭を払出す筒体下部はRC構造、石炭を貯蔵する筒体上部はPRC構造である。

基礎工法は深度23m付近の砂礫層を支持層としたセメントにフライアッシュを混合した深層混合処理²⁾を施工し、基礎スラブは、幅27.4m×長さ89.7mで、3基一体型の長方形スラブである。

石炭はサイロ頂部のコンベア1条から受入れ、サイロ下部の払出口まで自然流下させ、2条の走行式回転払出し機により強制的に払



写真-1 貯炭サイロ完成状況

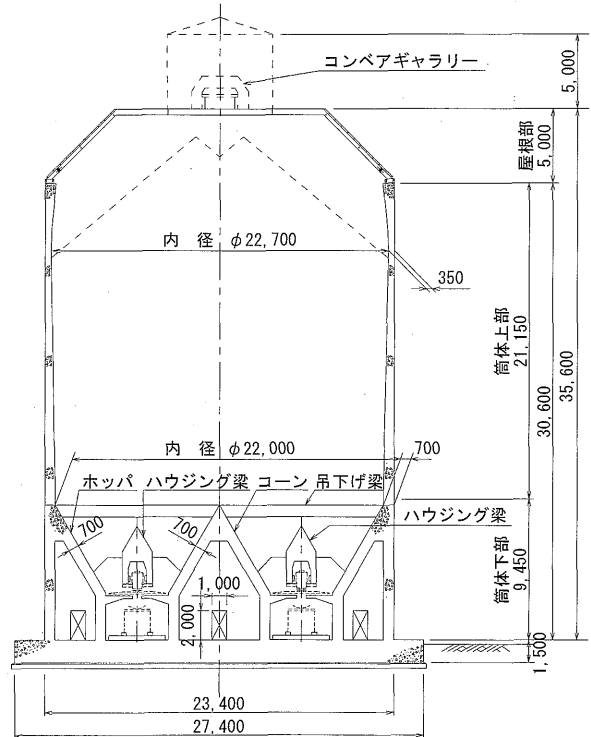
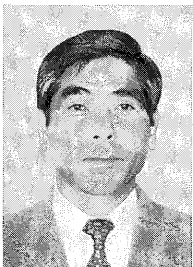
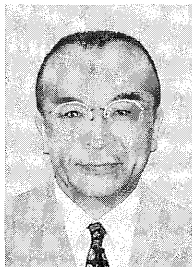


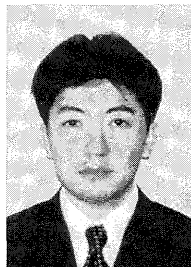
図-1 貯炭サイロ断面図



佐藤 賢次



白戸 伸明



工藤 雄一

*北海道電力(株) 土木部 土木技術グループ 主幹 (前 苫東厚真火力発電所建設所 土木課長) 会員 kenji-s@email.hepco.co.jp

**北海道電力(株) 苫東厚真火力発電所建設所 土木課 総括主任 会員 n-shirato@email.hepco.co.jp

***北電興業(株) 技術部 会員

出す方式である。貯炭サイロ断面図を図-1に示す。

3. スリップフォームの施工方法

(1) 施工概要

筒体上部のコンクリート施工方法にスリップフォーム工法を採用した。また、本施工は、筒体下部上で屋根鉄骨を組立てスリップフォームの上昇と同時に屋根鉄骨をリフトアップする工法を採用し、高所(約GL+36m)における鉄骨架設作業を省略し、コストダウンおよび安全性を向上させた。なお、同時リフトアップした鉄骨重量は79tで、国内の最大重量で高度な施工技術を要した。

スリップフォームの施工寸法は、外径23.4m、壁厚下部70cm～上部35cm、高さ21.15m(GL+9.75～30.9m)で、3基合計の施工高さは63.45mである。本施工は、型枠を3基のサイロに順次転用するので、施工期間は4月～8月の長期にわたるため気温の変動による脱型時間の変更が予想された。

筒体上部および屋根鉄骨施工方法の比較検討を表-1に示す。

(2) コンクリートの打設方法

スリップフォーム工法は、コンクリートの打設および型枠の上昇を連続的に繰り返すもので、コンクリートは数時間で脱型されるため、この時点において、コンクリートの自立する強度が必要となる。このためスリップフォーム工法に採用するコンクリートにおいては、打設数時間後の強度の発現性とその品質管理が重要である。また、コンクリート打設と併行して鉄筋の組立およびPCのシー設置等の作業を行うので、施工速度の管理は工程の確保からも重要である。

コンクリートは、地上のポンプ車により圧送し回転シュート方式により打設した。コンクリートの打設は全体工事工程および経済性を検討のうえ昼夜連続打設とせず毎日昼間打設とした。スリップフォーム工法+屋根鉄骨同時リフトアップ工法の概要図を図-2に示す。

表-1 筒体上部および屋根鉄骨施工方法の比較検討

工 法	筒体・屋根鉄骨在来工法	スリップフォーム工法 +屋根鉄骨在来工法	スリップフォーム工法 +屋根鉄骨同時リフトアップ工法
概 要	パネル化した大型型枠を組立て、鉄筋組立とコンクリート打設を順次施工し、筒体完成後、屋根鉄骨を架設し組立てる。	スリップフォーム終了後、屋根鉄骨を架設し組立てる。	屋根鉄骨をスリップフォーム開始前に組立てスリップフォームと同時にリフトアップする。
特 徴	筒体施工のため内外面に全周足場が必要となり、また、コンクリートの打設サイクルが長くなる。 屋根鉄骨の架設が高さ約36mの作業となる。	屋根鉄骨の架設が高さ約36mの作業となる。	屋根鉄骨の架設が高さ約16mの作業となる。 屋根鉄骨のリフトアップのためヨークの補強が必要となる。
仮 設 備	足場：内外面全周足場 屋根鉄骨のベント高約26m 揚重設備：最大100tクレーン	足場：昇降足場のみ 屋根鉄骨のベント高約26m 揚重設備：最大100tクレーン	足場：昇降足場のみ 屋根鉄骨のベント高約7m 揚重設備：最大50tクレーン
工 程	筒体 280日 屋根鉄骨 240日 計 520日(暦日)	筒体 210日 屋根鉄骨 240日 計 450日	筒体 210日 屋根鉄骨 150日 計 360日
経 済 性	1.00(直接工事)	0.86	0.83
評 価	×	△	○

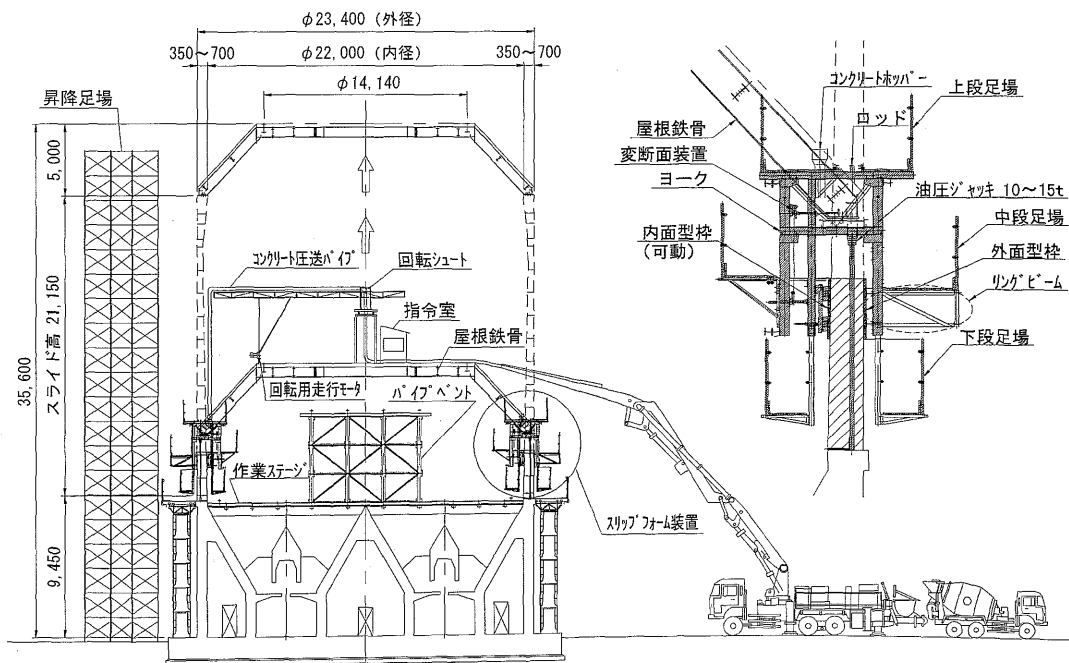


図-2 スリップフォーム工法+屋根鉄骨同時リフトアップ工法の概要図

打設工程は、1層目のコンクリート打設終了後1層厚分の型枠をスライド(5cm/回×5ストロークのジャッキアップ)し、以降層の打設および型枠スライドを1時間25cm/層の速度で繰返すと、1層目打設終了後4時間後に当日打設したコンクリートが脱型され(型枠高は1.2m)露出する。

コンクリートの打設終了後、以降23時まで(5時間)10分間隔の自動運転で上昇下降(3cm)を繰返し縁切りのスライドを行う。また、型枠スライド毎に変断面調整装置を手動操作し壁厚を変更する。なお、打設速度は、当日の平均養生温度から脱型時間を推定し決定するものである。コンクリートの打設工程を図-3に示す。

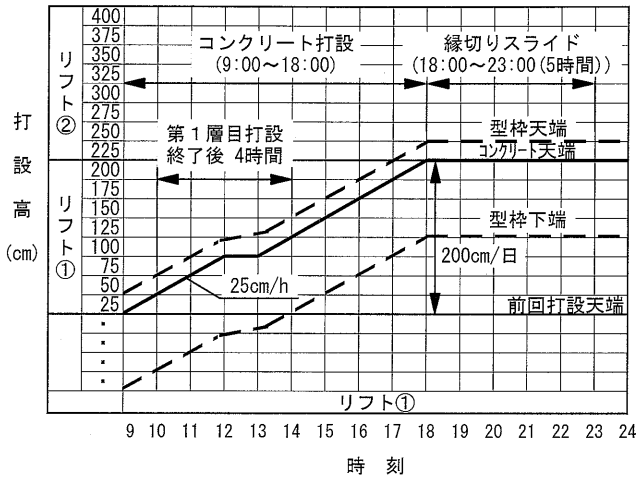


図-3 標準打設工程

(3) 屋根鉄骨リフトアップ

筒体下部コンクリートの終了後、吊下げ梁上に作業ステージおよび地組みベントを設置し、屋根鉄骨を組立て、鉄骨の主桁を筒体壁を跨いで設置する門型のフレーム(ヨーク)に連結させ、スリップフォームの上昇と共に同時リフトアップした。重量鉄骨の同時リフトアップのため、ヨークの筒体外側をリングビームで補強し、また、主桁部分には15tジャッキを配置した。

鉄骨盛替えの施工手順は、①筒体上部コンクリートをH=19.25mまで打設後、鉄骨の1次アンカーボルトを設置し、②H=19.95mまでコンクリートを打設し受材の設置、③仮設受材の撤去、④鉄骨の受替え、⑤本設アンカーボルトの取付け、⑥最終コンクリートの打設(H=21.15mまで)となる。

4. コンクリートの配合

コンクリートは、苫厚真発電所2号機(海外炭専焼)産のJIS A 6201 II種相当のフライアッシュを生コン工場へ搬送し製造したフライアッシュコンクリート [F/(C+F)=20%] である。

打設数時間後のコンクリート強度が重要であるスリップフォーム工法においては、初期強度の発現が劣るフライアッシュコンクリートは本来不向きであるが、その適用性を検討した結果、ポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤を添加することにより初期強度の改善に効果があることがわかった。

配合は施工時の打設工程の確保を最重要視し、養生温度20℃の条件において打設4時間後で型枠脱型時に必要なコンクリート強度0.06N/mm²を満足できることを条件に決定した。

なお、型枠脱型時の所要強度は、コンクリートの自立強度でコンクリートの自重および型枠高さより算出した。コンクリートの示方配合を表-2に示す。

表-2 コンクリートの示方配合

設計基準強度	air	Gmax	slump	W/(C+F)	s/a	
N/mm ²	%	mm	cm	%	%	
24	4.5±1.5	25	18±2.5	47.3	46	
単位量 (kg/m ³)					混和剤 (g/m ³)	
W	C	F	S	G	高性能AE減水剤	AE剤
147	280	70	851	1024	3325	4.55

施工時期を想定し、養生温度10、15、20℃の3ケースにおいて若材齢のコンクリート圧縮強度試験を実施した。養生温度の違いによる経過時間と圧縮強度の関係を図-4に示す。養生温度が5℃低下すると脱型可能時間は約1時間増加すると予想された。コンクリートの練上がり温度は養生温度と同一になるように調整した。

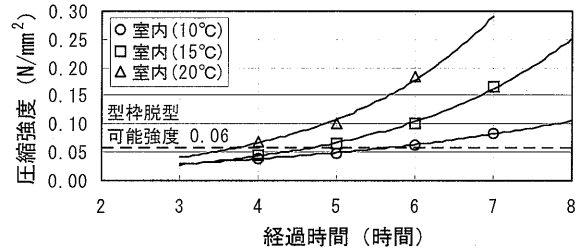


図-4 経過時間と圧縮強度の関係

5. スリップフォームの施工実績

(1) 打設実績

スリップフォームは、平成12年4月17日にAサイロ(1基目)のコンクリート打設を開始し、平成12年8月31日にCサイロ(3基目)のコンクリート打設を終了した。

スリップフォームの施工期間が4月中旬～8月下旬の4.5ヶ月にわたり、施工期間の外気温が4～29℃で気温差が25℃に及び、気温の上昇に伴い若材齢強度が増加し日上昇高も増加した。

1基あたりの施工日数は、暦日でAサイロが33日、Bサイロが25日、Cサイロが25日であった。スリップフォーム装置の移動に暦日で平均28日の計56日を要し、3基合計で137日にわたり順次施工した。なお、各サイロスリップフォーム期間には5日/基の屋根鉄骨のアンカー設置および受替え期間が含まれている。スリップフォームコンクリートの総打設量は約2,610m³、日最大打設量は140m³、日最大上昇高は3.00mであった。また、総鉄筋量は248t、日最大鉄筋組立量は約13tであった。施工実績を表-3に示す。

Aサイロの施工にあたっては、低温対策としてコンクリート練混ぜ水の温水使用、型枠背面に硬質発泡ウレタン(20mm)の吹付け、防寒シートの設置および気温10℃以下の場合にはヒーターによる給熱保温養生を実施した。

表-3 施工実績

基	期間	気温(養生)(℃)	暦日(稼働)(日)	打設日数(日)	日最大上昇高(m)	日平均上昇高(m)
A	H12.4.17 ～5.19	4～18 (6～18)	33 (25)	16	1.95	1.32
B	H12.6.19 ～7.11	14～26	23 (20)	12	2.55	1.76
C	H12.8.7 ～8.31	21～29	25 (17)	11	3.00	1.92
計	H12.4.17 ～8.31	4～29	81 (62)	39	3.00	1.63

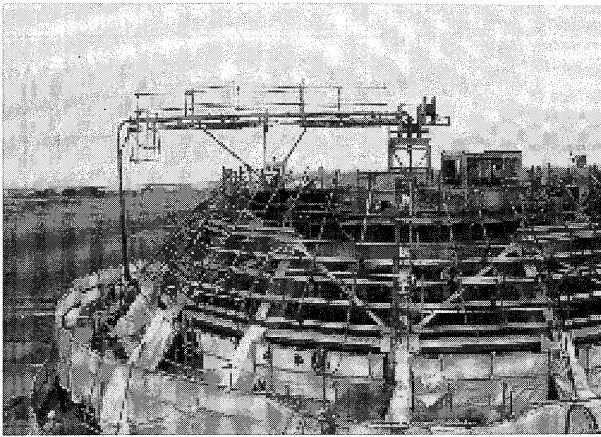


写真-2 スリップフォーム施工状況

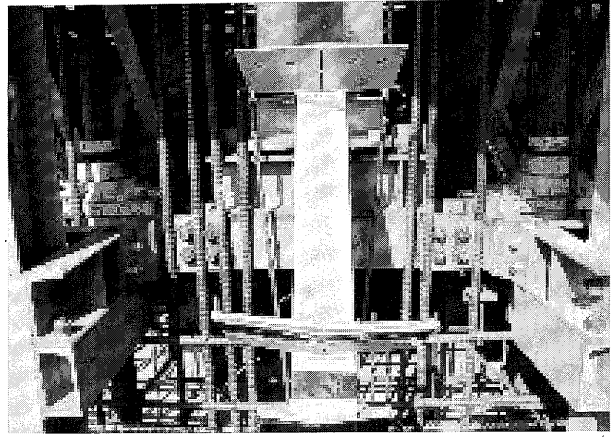


写真-3 ジャッキ・ロッド設置状況

(2) 施工精度

筒体の計測システムを図-5、筒体精度の実績を表-4に示す。筒体の偏心は、鉛直レーザーとCCDカメラにより計測し、座標位置をスリップフォーム装置の指令室のパソコンに表示するシステムとした。

筒体位置のリアルタイムのモニタリング、ロッドの勾配および水準器の調整等による修正により筒体完成後の偏心量は20mm以内で、貯炭サイロの機能上の精度を満足するものであった。

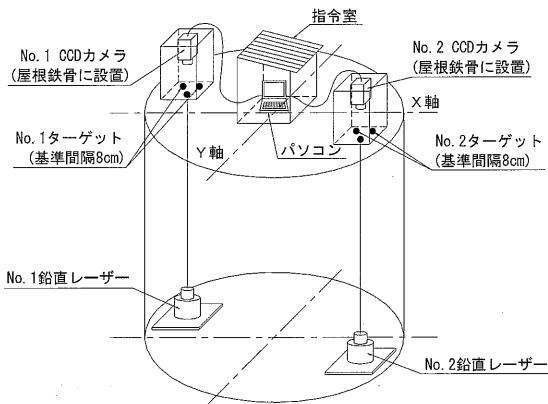


図-5 筒体の計測システム

表-4 筒体精度の実績

基	偏心X方向	偏心Y方向	回転(度)
A	-1.0mm	0.6mm	4'38"
B	-11.1mm	11.2mm	5'23"
C	1.2mm	17.2mm	0'09"
管理値	20mm	20mm	-

X:コンベア軸方向, Y:コンベア軸直角方向

6. 品質管理

(1) 管理方法

スリップフォーム工法の型枠上昇時の若材齢のコンクリート強度試験としては、通常、圧縮強度試験および鉄筋棒貫入試験が用いられているが、圧縮強度試験は強度を直接的に評価できるがコストが高く、一方、鉄筋棒貫入試験はコストは低いが主観的要素のある試験という特長がある。

この鉄筋棒貫入試験は、打設したコンクリートの上端から直径16mmの丸鋼鉄筋を人力で貫入し、鉄筋の先端が止まる高さを測定する試験で、この鉄筋の止まる高さと同圧縮強度の相関からコンクリートの自立強度を判断するものである。

本施工においては、定量的、簡易かつ低コストな若材齢コンクリート強度試験方法として、JIS A 6204附属書1「コンクリートの凝結時間試験方法」(以下、貫入抵抗試験と呼ぶ)およびJIS A 601「土壌硬度試験方法」(以下、硬度試験と呼ぶ)の2種類の試験法に準拠してその適用性を検討した。

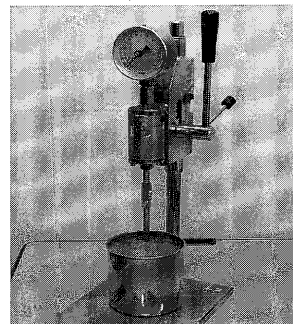


写真-4 貫入抵抗試験装置

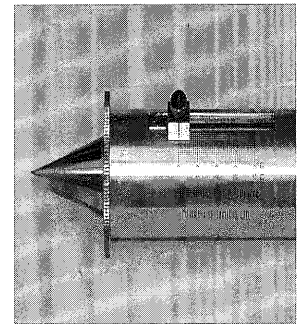


写真-5 硬度試験器

貫入抵抗試験は、断面積12.5~100mm²の貫入針を25mm貫入させた時の貫入に要する力、貫入抵抗値(N/mm²)を測定するもので、硬度試験は山中式土壌硬度計を鉛直に貫入して貫入時の抵抗による硬度指数(mm)を測定するものである。

なお、試料は5mmふるいでウェットスクリーニングしたもので、試験値は3回の平均値、試験容器はいずれもコンクリート凝結時間試験で規定されているものを使用した。

コンクリートのフレッシュ性状および若材齢強度の品質管理試験項目を表-5に示す。若材齢の強度試験として圧縮強度、貫入抵抗、硬度および硬化高さ試験を実施し、各試験値の相関性を検討した。^{3),4)}

なお、若材齢の供試体は、1層目で最も遅く打込むコンクリートより採取し、現場と極力同一条件になるように養生した。

表-5 品質管理項目

試験項目	試験方法	試験頻度
スランプ	JIS A 1101	打設日毎
空気量	JIS A 1128	打設日毎
練上がり温度	棒状温度計	打設日毎
筒体温度	熱電対	打設日毎
圧縮強度	JIS A 1216に準拠	各筒体3日
貫入抵抗	JIS A 6204附属書1に準拠	打設日毎
硬度	JIS A 601に準拠	打設日毎
硬化高さ	鉄筋棒貫入	打設日毎

(2) 管理結果

平均養生温度と型枠脱型時間の関係および圧縮強度と貫入抵抗値・硬度の関係を示し、若材齢のコンクリート強度を定量的に評価し型枠のスライド上昇を実施した。その結果、脱型されたコンクリートは剥落することなく、表面状態も良好であった。

積算養生温度と圧縮強度の関係を図-6に示す。打設数時間後のコンクリートの若材齢強度においても積算養生温度との相関性があり、積算養生温度から強度、すなわち養生温度と時間から脱型強度を推定できることがわかる。近似式による脱型強度0.06N/mm²に必要な積算養生温度は107℃・時であった。

積算養生温度の算出は「コンクリート標準示方書【平成8年度】施工編」(土木学会)に準拠し、次式を採用した。

$$M = (\theta + A) \Delta t$$

M: 積算温度(℃・日または℃・時)

θ : Δt 時間中のコンクリート温度(℃)

A: 定数で10℃を採用, Δt : 時間(日または時)

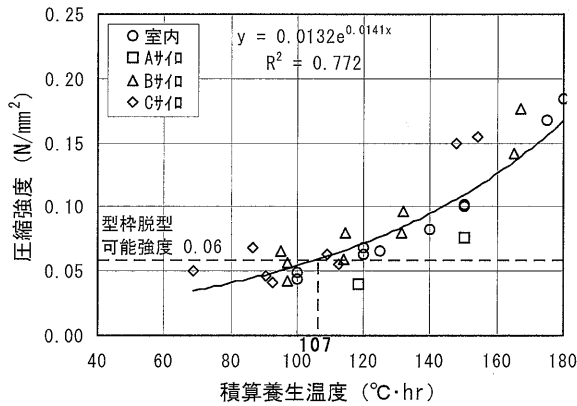


図-6 積算養生温度と圧縮強度の関係

コンクリートの平均養生温度と型枠脱型時間の関係を図-7に示す。図中の計算式は、図-6の脱型強度0.06N/mm²に必要な積算養生温度107℃・時から求められる平均養生温度と型枠脱型時間の関係式で、実績データは、当日の平均養生温度を算出し脱型強度に到達した時間をプロットしたものであるが、計算式と実績データの相関性が高いことがわかる。すなわちコンクリートの温度を計測することにより型枠脱型時間を推定できる。

概ね、平均養生温度20℃で脱型時間は4時間となり、室内配合試験時のデータとほぼ同様であった。

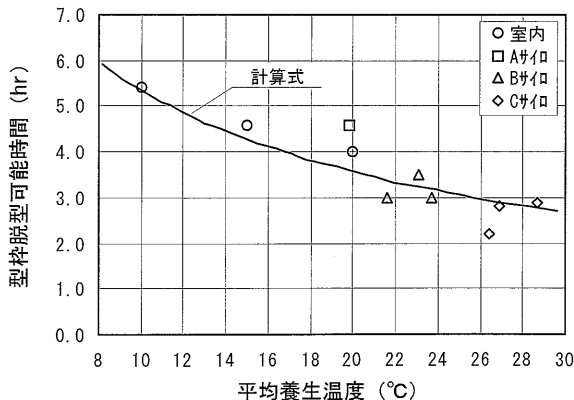


図-7 平均養生温度と型枠脱型可能時間の関係

貫入抵抗値および硬度指数と圧縮強度の関係を図-8および図-9に示す。それぞれ両者の相関性(貫入抵抗値R²=0.860, 硬度指数R²=0.905)が高く、これらの測定値から若材齢の圧縮強度が推定でき、型枠脱型時間の判定が可能であると判断された。

よって、図-7の関係をを用いて平均養生温度から型枠脱型時間を推定し、図-8・図-9の関係を基に若材齢強度の施工管理として貫入抵抗値および硬度指数を確認し、型枠脱型の可否を決定した。

なお、脱型強度に必要なコンクリート圧縮強度0.06N/mm²に相当する貫入抵抗値は1.0N/mm², 硬度指数は14mmであった。

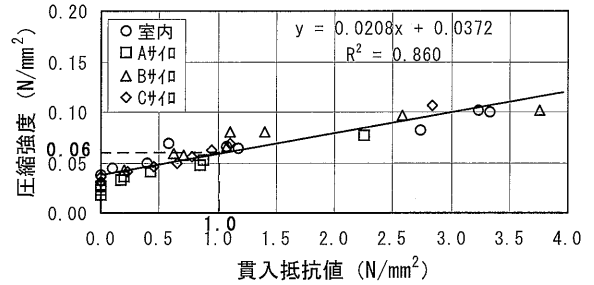


図-8 貫入抵抗値と圧縮強度の関係

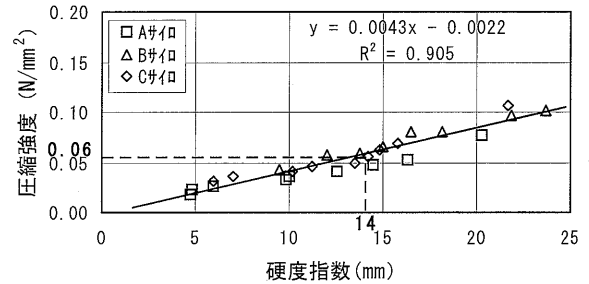


図-9 硬度指数と圧縮強度の関係

7. おわりに

スリップフォーム工法+屋根鉄骨同時リフトアップ工法を採用したが、十分な施工精度を確保し施工を完了した。

また、定量的、簡易かつ低コストな若材齢のコンクリート強度試験として、貫入抵抗試験および硬度試験を採用したが、圧縮強度との相関性が高く、十分に適用が可能なが確認された。

最後に、本施工にあたって、ご指導、ご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を申し上げます次第である。

参考文献

- 1) 松下啓郎; 佐藤賢次; 白戸伸明. 苫東厚真発電所4号機増設工事に伴う土木工事の計画概要. 電力土木. no.283, 1999, p.45-47.
- 2) 白戸伸明; 松浦正典; 工藤雄一. 深層混合処理工法による貯炭サイロ基礎の設計と施工について. 電力土木. no.291, 2000, p.51-55.
- 3) 白戸伸明; 寺田卓雄; 渡部 貢; 工藤雄一. スリップフォームコンクリートの養生温度と若材齢強度について. 土木学会第56回年次学術講演集. (投稿中).
- 4) 白戸伸明; 寺田卓雄; 渡部 貢; 齋藤敏樹. スリップフォームコンクリートの若材齢の強度試験方法について. 土木学会第56回年次学術講演集. (投稿中).