

SC 適用による建設工期短縮可能なタービン架台の開発

Reduction of Construction Period by Development and Applying of
Advanced Turbine Generator Foundation as Composite Structure

技術本部 関本 恒*¹ 布山 裕之*²
高砂製作所 亀田 一郎*³ 福永 有志*⁴
梅 只 功*³ 馬越 龍太郎*⁵

当社高砂製作所内に建設したガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備のタービン・発電機架台の上部梁部に工程短縮を目的に鋼板コンクリート (SC) 構造を適用した。この構造は、工場で作成した上部梁部分を鋼製型枠として工事現場に搬入・所定の位置に設置した後、その内部にコンクリートを打設して構造体を製作するものである。上記の SC 工法を実機に適用した結果、従来の鉄筋コンクリート (RC) 構造に較べて約 30 日の工事工程の短縮となり、工期を半減することができた。

Mitsubishi Heavy Industries developed a composite steel-concrete beam for constructing elevated horizontal beams for turbine-generator foundations. This system was used at the company's Verification Test Plant at the Takasago Machinery Works. Composite steel-concrete beams are made from U-shaped steel casings that acts as a temporarily formwork and are permanently used as major concrete beam reinforcement. Prefabricated U-shaped steel casings must be placed on top of vertical concrete columns. After steel casings are positioned and secured, concrete is filled. This technique cuts one month from construction time and simplifies required temporary work such as falsework and form work. This paper details the results of practical research on design and construction as they relate to required strength and vibration.

1. ま え が き

当社では、昭和 50 年代より鋼板コンクリート (以下、SC と称す) 構造の研究を実施してきており、原子力発電プラントあるいは沿岸構造物に多数適用例がある。

今回、当社高砂製作所内に建設したガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備・タービン発電機架台 (以下、T/G 架台と称す) の上部梁部に図 1 (a) に示す SC 構造を採用し、工程短縮に貢献したので、これを報告する。

2. 工法の特徴と設計の基本的考え方⁽¹⁾

2.1 SC 工法の特徴

SC 工法の特徴は、テーブルデッキ梁下の支保工が不要であるためコンクリートの打設後梁下の作業が直ちに開始できること、また、工場にて鋼製外板の型枠にタービンその他の機械固定用アンカーボルトを取付けておけるため、現場での作業時間が短縮でき

大幅な工程短縮が図れることである。

2.2 設計の基本的考え方

- (1) SC 梁の断面は図 1 (b) に示すとおり、三面を鋼板とし、上面には鉄筋を配置しリブにて補強した。梁幅が 195 cm となるため、製作性を考慮し鋼板を折曲げ高力ボルトにて接合し、この折曲げ部分がリブとなるように設計した。
- (2) 鋼板の厚さは、日本建築学会規準 (鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、以下 RC 規準と称す) に準じて算出される必要鉄筋量と同量又はそれ以上となるようにした。さらに、鋼板はコンクリート打設時に型枠としても使用するため、この鋼板型枠のたわみが許容値以下となり、かつ座屈しないように鋼板厚さを決定した。
- (3) SC 梁の柱との接合部は、図 1 (c) に示すとおり、隅角発生応力に対処できる鉄筋量を RC 規準に準じて配筋した。
- (4) 鋼板型枠とコンクリートを一体化するためスタッドボルトを鋼板内側に打付けた。このスタッドボルトは、鋼板に降伏応力

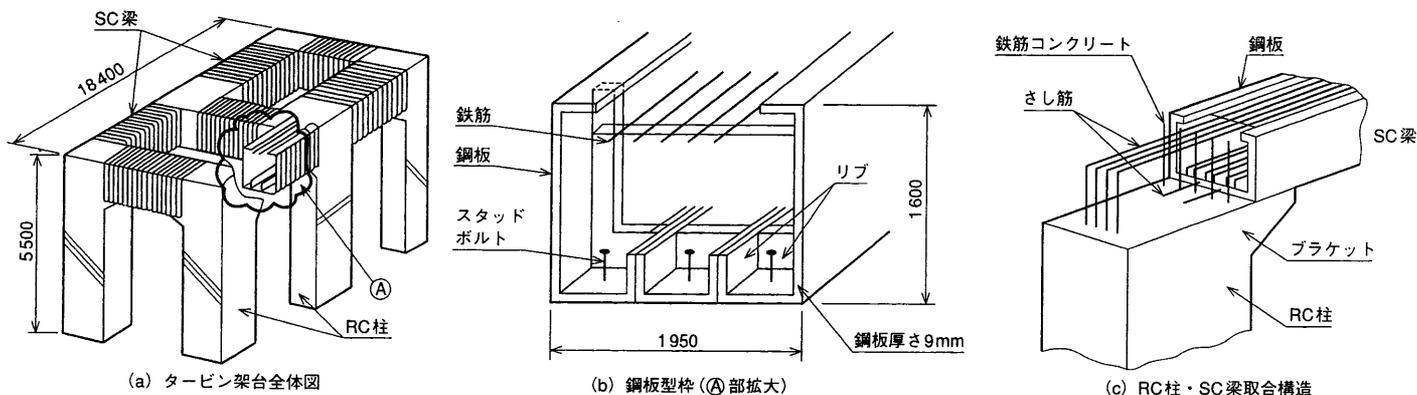


図 1 SC タービン架台 工期短縮のために TG 架台の梁部分に SC 構造を採用。
SC Turbine-Generator foundation

*1 高砂研究所構造研究室主査
*2 高砂研究所振動・騒音研究室 工博
*3 プラント建設部土木建築課

*4 プラント建設部土木建築課主務
*5 タービン技術部タービン設計課

が発生したときに生じるせん断力を負担できるように設計した。
 (5) タービン機械本体並びにタービン架台、マット基礎、杭、地盤をばねマスモデルに置換し、振動解析を行った。その結果、表1に示すようにテーブルデッキ厚さをこのクラスのタービン架台の従来寸法の2 mから今回採用寸法の1.6 mにできることを検証した。

表1 構造特性
Structural characteristics

デッキ厚 項目	2.0 m	1.6 m	判定
タービン運転時の架台のたわみ	0.2 mm	0.2 mm	許容値内 (0.25 mm)
架台固有振動数	37.2 Hz	36.9 Hz	許容値内 (60 Hz±10%超)

3. 適用性実証実験

3.1 強度特性⁽²⁾

3.1.1 基本断面計画

試験供試体は、T/G 架台の2本のRC柱及び1本のSC梁より成る縮尺1/2.5の部分モデルであり、試験体の形状を図2に示す。

なお、SC梁のコンクリート硬化後、SC梁を所定の位置で切断し、曲げ(せん断スパン比4.2)及びせん断(せん断スパン比1.9)の2体の試験体に分割し、強度試験に供した。

3.1.2 打設時特性

図3にコンクリート打設直後の鋼殻のたわみ分布を示す。図3には、コンクリート自重に対する両端単純支持の梁計算値を併記したが、実験値は計算値より若干大きくなっている。これは、打設時にコンクリートを約1 mの高所からホッパで流し込んだ衝撃による影響と考えられる。

表2にコンクリート打設時の鋼殻の側板と底版の応力値を示す。コンクリート打設による最大熱応力は7時間後に生ずるが、表2に示すとおり120時間以降は1/4以下に応力が低減することが分かった。

3.1.3 接合部強度特性

加力方法は、柱部を固定し、梁部軸直交方向に加力する片持加力方法とした。また、載荷方法は、隅角部の口閉じ・口開きを交互に行う正負交番繰返し載荷とし、最終破壊強度は、口開き側載荷により求めた。

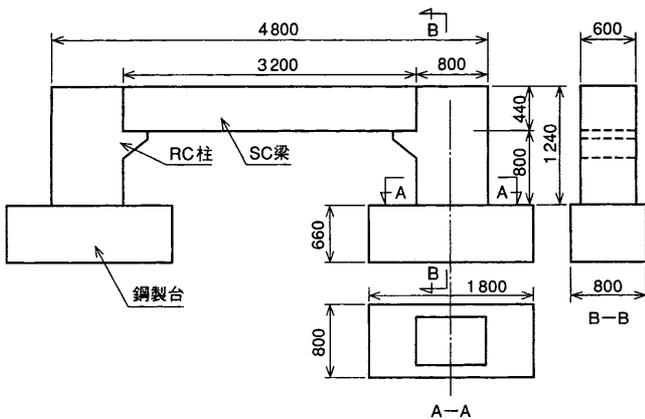


図2 試験体 2本のRC柱と1本のSC梁で試験体を構成。
Test model

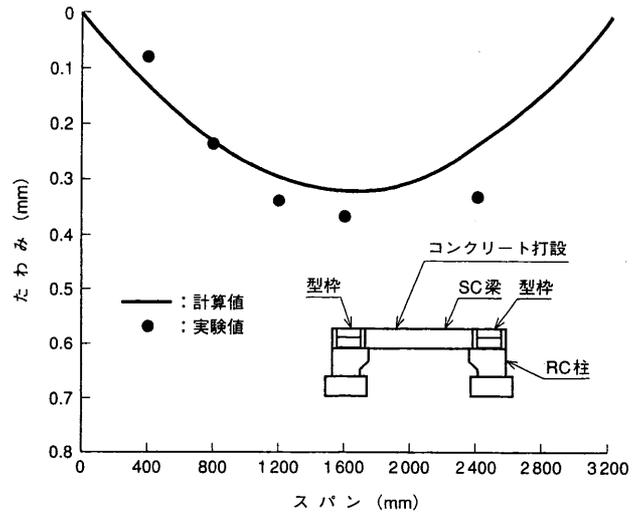


図3 コンクリート打設時のたわみ たわみは、コンクリートの落下の影響により静的予測計算値より若干大きい。
Deflection in placing concrete

表2 打設時応力
Stress in placing concrete

		単位:kgf/mm ²			
		7時間後	120時間後	7時間後/120時間後	
側板	LGM	X	3.6	0.54	6.7
		Y	3.9	0.79	4.9
	LFM	X	3.2	0.53	6.0
	LHM	X	3.8	0.55	6.9
	LGO	Y	4.0	0.66	6.1
	LGI	Y	4.0	0.77	5.2
底版	PG5	X	5.1	1.3	3.9
		Y	5.0	1.4	3.6
	PH5	X	4.7	0.89	5.3

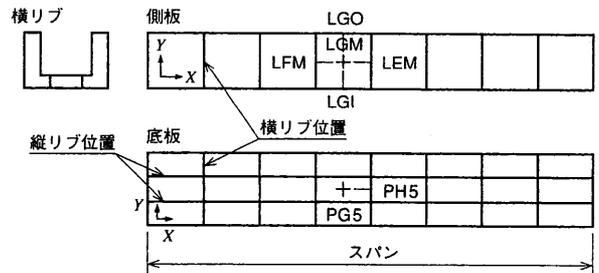


図4に、載荷点における荷重と変位の関係を示す。

試験経過は、両試験体共、低荷重域において梁部と柱ブラケット部との間及び梁部と隅角部との間において、鋼板とコンクリートとの離反が認められた。また、梁・柱接合部の上面にクラックが発生した。続いて、荷重の増大に伴い、上記傾向が顕著になり、最終的に口開き載荷にて隅角部に斜めクラックが発生し試験を終了した。

なお、せん断試験体では口閉じ荷重にて柱外縁にクラックが発生した。

図4には、RCの断面算定より求まる鉄筋降伏開始荷重計算値及びRCの終局耐力式より求まる梁としての終局耐力計算値を併記した。

鉄筋降伏の実験値は計算値の1.09~1.49倍となり、梁の終局耐力の実験値は計算値の1.20~1.42倍となった。いずれも柱ブラケ

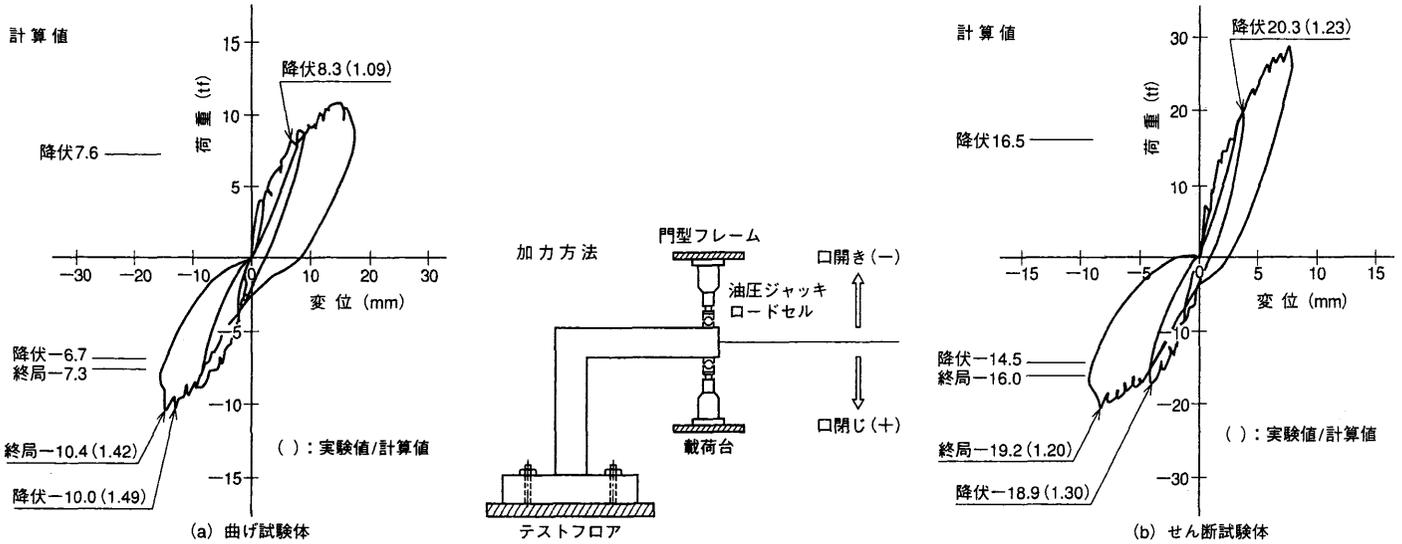


図4 荷重と変位の関係 実験の鉄筋降伏荷重及び耐力はブラケットの効果により計算値より大きい。
Load-displacement relationship

ットの効果により実験値が高くなっている。

3.2 振動特性⁽³⁾

3.2.1 振動計測の概要

実機の発電機側の軸方向梁に加振容量2 tfの油圧式慣性型加振機を設置し、主要な梁及び柱に加速度計を設置した。

加振機を正弦波掃引加振し、各加振周波数での加速度計設置箇所での応答加速度を計測し、振動モード並びに各振動モードの減衰を求めた。

3.2.2 振動計測結果並びに解析結果

図5に加振試験及び固有値解析により得られた振動モードを示す。

まず、加振試験ではタービン架台全体が軸直角水平方向に振動するモードの固有振動数は、8.51 Hz、全体が鉛直方向に動くモードの固有振動数は、46.1 Hzであり、定格運転時の機器による加振力の振動数60 Hz（タービン定格回転3600 rpm）より大きく離れている。

したがって、機器の加振によりタービン架台全体が大きく振動することはない。

RCの設計用の減衰比は、一般に耐震設計で5%が使われているが、本加振実験では低加振レベルにもかかわらず軸直角水平方向並進モードにおいて8%以上の大きな減衰比が得られた。これは、タービン・発電機が据付けられた後に加振しているため、機器と架台の接合部での摩擦力の影響であると考えられる。

図5に示す振動試験と固有値解析により求めた振動モードを比較すると、解析より得られた振動モードは計測より得られたものに良く対応していることが分かる。なお、解析モデルには鋼板及び鉄筋の剛性を考慮した。その結果、柱・梁の固有振動数（剛性）は表1に示したコンクリートのみの場合より20%程度大きな値になった。

鋼板及び鉄筋の剛性を考慮した解析モデルを使用し、タービン架台の機器加振点の動剛性を求め、また、機器の許容不釣合い力に対する応答変位を求めた。タービン架台の動剛性は定格運転領域では、 $1 \times 10^6 \text{kgf/cm}$ 以上あり、機器運転に支障のない剛性を有していることが分かった。また、定格運転領域の応答変位は6.03 μm と非常に小さく人が不快に感じるレベル以下であることが分かった。

	軸直角水平方向並進 振動モード	鉛直方向並進 振動モード
加振試験	 固有振動数：8.51Hz 減衰比：8.17%	 固有振動数：46.1Hz 減衰比：3.35%
固有値解析	 固有振動数：8.70Hz	 固有振動数：46.7Hz

図5 振動モード モード及び固有振動数共に実験値は計算値と良く一致している。
Vibration mode

4. 施工法概要と実機施工工程⁽¹⁾

4.1 施工法概要

当社高砂製作所内に建設したT/G架台の施工手順を図6に示す。

- (1) まず、テーブルデッキ下面の高さまで柱を従来どおり施工し、一方、工場にて並行して鋼板型枠を製作した。
- (2) 鋼板型枠にタービン機械設置用のアンカーボルトを工場にて取付け、工事現場では心出し微調整を行うことで現場作業の合理化・工場取付けによる製品の品質向上を図った。
- (3) SC梁は鋼板が表面に露出するため、外面には塗装仕上げを行った。
- (4) SC梁の柱部分への設置は、柱部分に仮固定用ボルトを埋込んだブラケットを施工し、パッカとグラウトにより設置を行った。

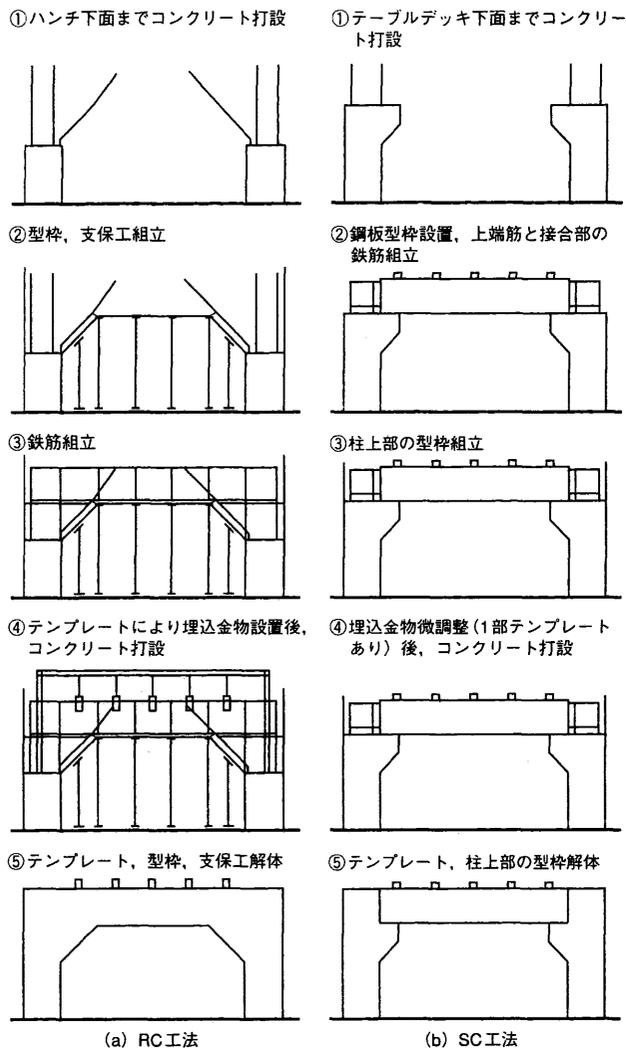


図6 施工手順 SCはRCに比べ、型枠及び支保工の省略、テンプレートの簡素化が可能である。
Construction procedure

4.2 実機施工工程

図7にSC工法による工事工程と従来のRC工法による工事工程の比較を示す。

図7に示すとおり、T/G架台の梁部にSC構造を用いることにより、架台に取付けられる機械設置用アンカーボルトなどの設置作業をあらかじめ工場にて行い、工事現場での作業を簡素化でき、また、鋼板型枠にコンクリートを打設する際に支保工が不要となることにより、従来の鉄筋コンクリート構造に比べて工事工程を約30日短縮できた。

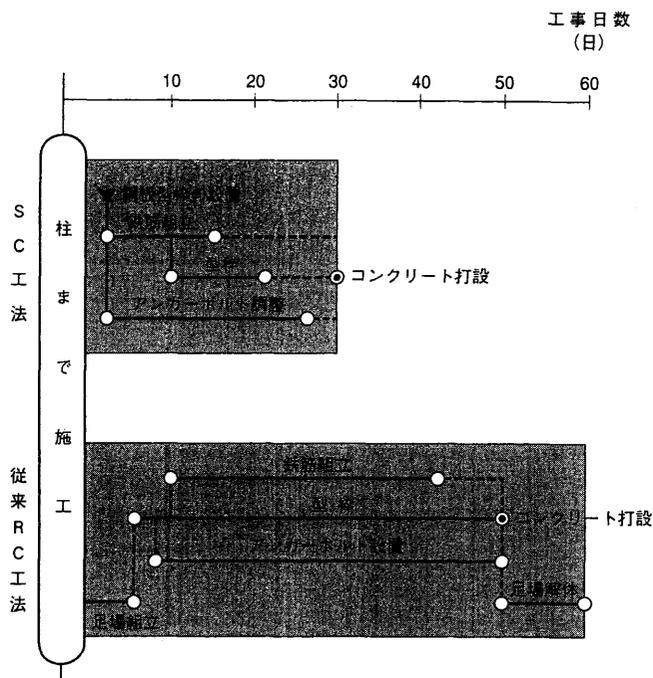


図7 建設工程 SCはRCに比べ、工程を半減可能である。
Construction period

5.まとめ

タービン・発電機架台の上部梁部に工期短縮を目的としてSC構造を適用し、以下の成果が得られた。

- (1) SC構造の工期短縮メリットを生かせる構造を案出し、その設計法の体系化を図ることにより、今後のプラントへの適用法を明確にした。
- (2) 設計法は、①コンクリート打設時の変位及び応力に関するモデル実験、②柱・梁接合部に関するモデル実験、③実機振動試験の各データ、に基づいて体系化を図った。
- (3) 上記の設計法を踏まえて、実機にSC工法を適用した結果、従来のRC構造に比べて約30日の工事工程を短縮することができた。

参考文献

- (1) 亀田ほか、タービン・発電機架台の鋼板コンクリート化 (2)、日本建築学会関東支部研究報告集 (1997-3) p.109
- (2) 関本ほか、タービン・発電機架台の鋼板コンクリート化 (1)、日本建築学会関東支部研究報告集 (1997-3) p.105
- (3) 布山ほか、鋼板コンクリートを適用したタービン・発電機架台の振動試験、日本建築学会大会学術講演梗概集 (1997-9) p.1091