

特集

P C 建 築

プレスジョイント耐震システムによるPC圧着フレーム構造

—横浜国際総合競技場の構造設計と施工—

坂井 吉彦*1・小林 直紀*2・田辺 恵三*3・桑折 能彦*4

1. はじめに

本競技場は、平成10年の第53回神奈川国体（かながわ・ゆめ国体）秋季大会、また2002年（平成14年）に開催されるワールドカップサッカーのメイン会場として、国際競技大会に対応した機能を持ち、収容人員7万人を有する日本最大規模のスタジアムとして建設中の建物である。本競技場の特徴は、現在地が遊水池としての機能を条件づけられていることから、競技場フィールドレベルは地盤面より約11mの高さの人工地盤上に計画せざるを得ないために、スタンド部の屋根最高高さが約52mにおよぶ巨大な建物になっていることである。

本建物の屋根は鉄骨構造で円周方向（約900m）を一体として設計している。下部構造のスタンド部もエキスパンションを無くして計画されている。通常こうした大規模な競技場のスタンド部の構造はSRC構造で、建物長さ100m位ごとにエキスパンションを設けることが多い。しかし、本競技場は全面的に高品質・高強度コンクリート（ $F_c=500\text{kgf/cm}^2$ ）を用いたプレキャスト・プレストレストコンクリート部材（PCa・PC）の圧着工法を採用することで下部スタンド部をノンエキスパンション構造とし、屋根とともに一体の建物として計画されている。

PC圧着工法では、①耐久性の向上、②耐震性の向上、

③多連続スパンにおける不静定二次応力の最小化とノンエキスパンションジョイント化^{1),2)}、④コスト削減、⑤工期短縮、⑥現場作業員の省人化、⑦運搬車両総数減による交通振動・渋滞の防止、⑧躯体用型枠ベニヤ板の不使用等の地球環境への配慮など、諸々のメリットが挙げられる。

2. 建物概要

2.1 建物概要

建物名称：横浜国際総合競技場

所在地：横浜市港北区小机町3302番地5

主要用途：陸上競技場

敷地面積：142 000m²

延床面積：166 000m²

● スタンド部

施工床面積：約164 000m²

構造：プレキャストPC造（KTB・PC圧着工法）

規模：地上7階

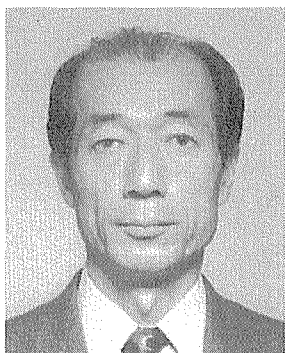
屋根：鋼管トラス構造（ステンレス制振鋼板葺き）

高さ：スタンド部最高高さ GL+38.46m

屋根最高高さ GL+51.96m

フィールド人工地盤部

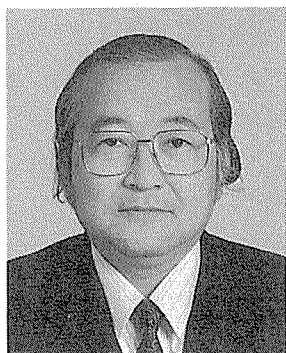
施工床面積：約21 000m²



*1 Kichihiko SAKAI
（株）松田平田
構造設計部
担当部長



*2 Naoki KOBAYASHI
（株）東畑建築設計事務所
構造部長



*3 Keizo TANABE
PC圧着建築協会
技師長（工博）



*4 Yoshihiko KOORI
PC圧着建築協会
技師

構造：プレキャストPC造 (KTB・PC圧着工法)

規模：地上1階

● スタンド外周人工地盤部

施工床面積：約41 000m²

構造：平屋部 プレキャスト・鉄筋コンクリート造

重層部 プレキャスト・PC造 (KTB・PC圧着工法)

発注者：横浜市緑政局

設計・設計監理：(株)松田平田+(株)東畑建築事務所

施工：第1工区およびフィールド人工地盤部 (竹中+奈良JV)

第2工区 (銭高+日本鋼管工事JV)

第3工区 (日本国土開発+渡辺組JV)

第4工区 (佐藤工業+三木組JV)

外周人工地盤その1工区 (三木組+渡辺組JV)

外周人工地盤その2工区 (竹中+駿河JV)

PC施工：黒沢建設(株)

図-1および写真-1に配置図、図-2に5階平面図、図-3にメインスタンド断面図を示す。

スタンドは平面形状が方円形で、観客席とフィールドとの間はピット式とし観客の視野をフィールドに近づけて臨場感をもたせる2層式の観客席をもつ断面形をしている。観客席上部は約3万m²のステンレス仕上げの鉄骨

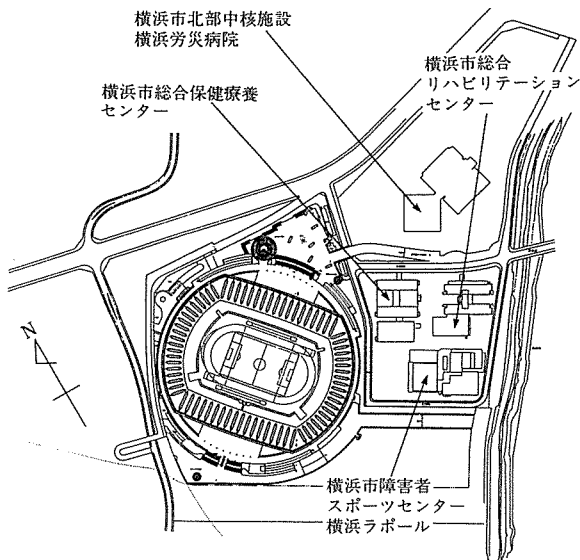


図-1 配置図

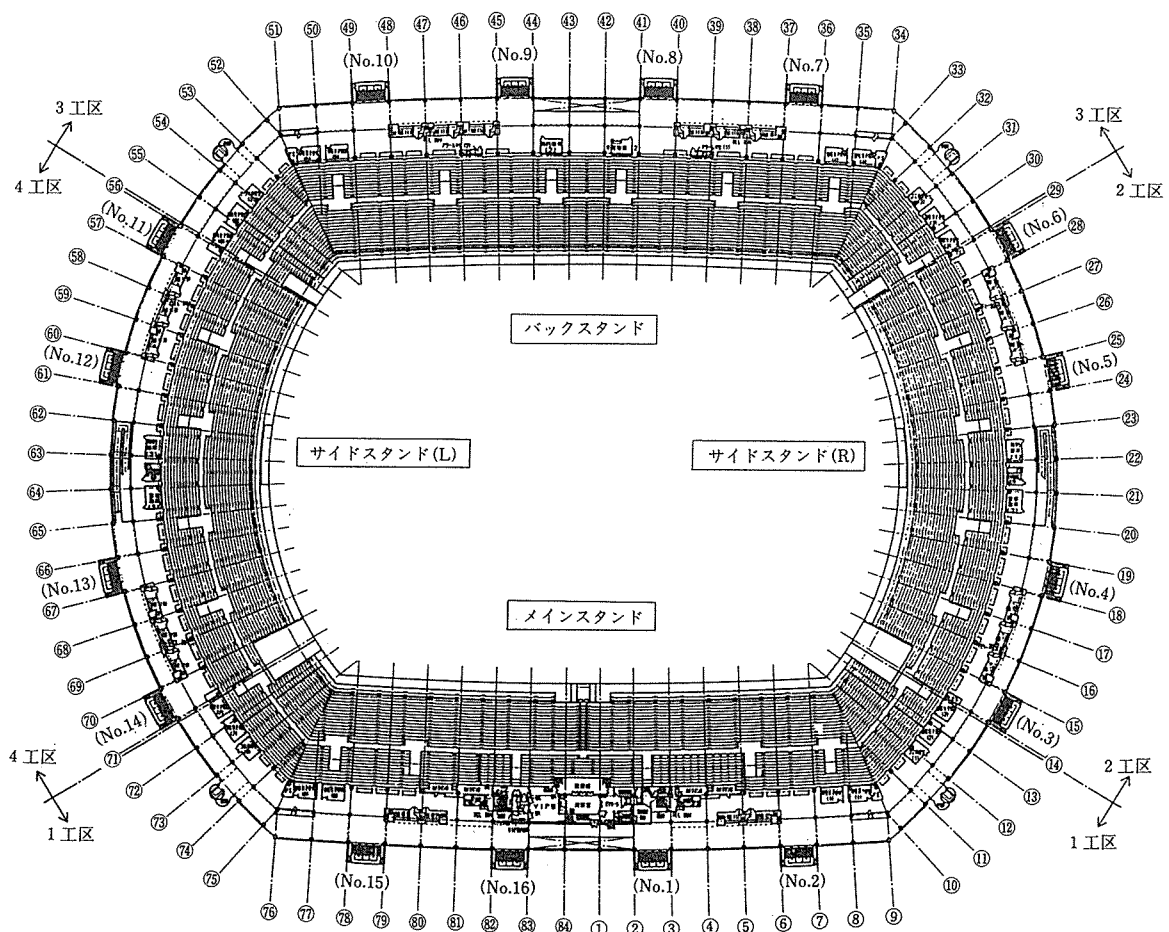


図-2 5階平面図



写真-1 建物全景

造大屋根を設けている。1.で述べたようにスタンドと大屋根はノンエキスパンションの一体の建物である。

フィールド部人工地盤は、階高約11mの1層のプレキャストPCブレースを組み込んだPC架構である。

スタンド外周人工地盤は、敷地境界部が平屋建、スタンド周辺が3階建（1部4階建）である。スタンドへのアプローチはVIP・大会関係者・選手・報道関係者は2階から、観客は4階からとなっている。

2.2 構造概要

(1) 地盤・基礎構造の概要

当敷地の地層は設計地盤面（G.L = T.P + 4.0）から2.0mまで盛土，以下25.0m程度までN値 = 0に近い粘土質シルト，それ以深はN値=50以上の固結シルトである。

本競技場の基礎は杭基礎であり，この固結シルト層を支持地盤とする拡底アースドリル工法による場所打ちコンクリート杭を採用している。

(2) 躯体の概要

スタンド本体の躯体構造は「プレキャストPC造」であり，プレキャスト造にすることで，天候に左右されずに高品質で均一な部材が得られ，工期の安定化と短縮化が計られた。床スラブもハーフPC板を架設した上にコンクリートを打設する合成スラブを採用している。

平面形は長辺280m，短辺220mの方円形で，外周約900m，階高は1階が8.1m，標準階が4.2mである。標準スパンは梁間方向約8m，桁行方向約10mのグリッドで（図-4），最上階の外周柱は梁間方向にY字型に広がっている（写真-2）。

3. 構造設計

3.1 設計方針

(1) 全体の設計方針

全体の構造設計方針は，1次設計，2次設計の2段階の

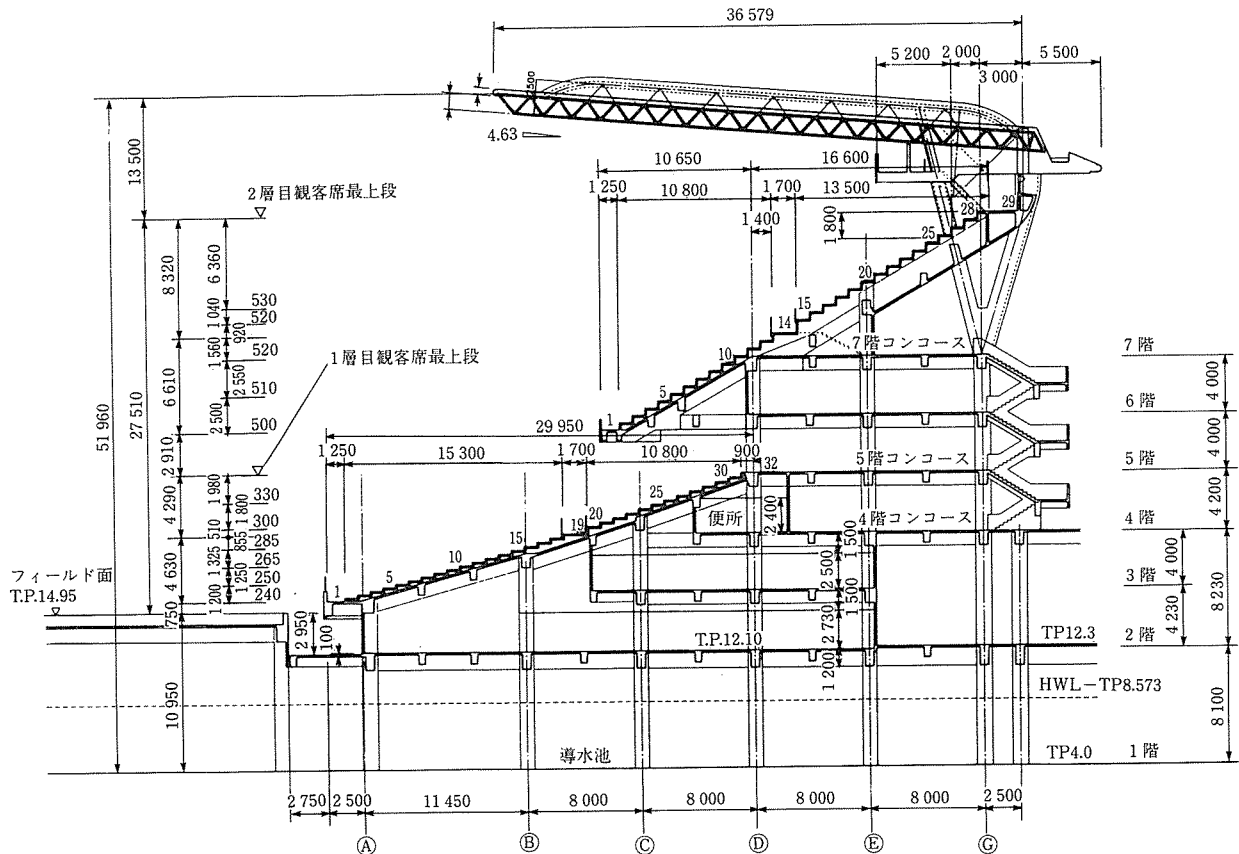


図-3 メインスタンド断面図



写真-2 建物外景

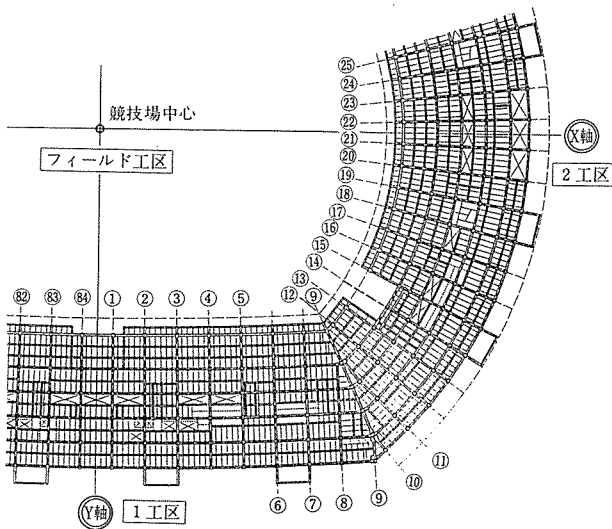


図-4 2階伏図

静的設計と耐震設計を主とし、1次設計および2次設計は用途係数1.25を掛けた値を採用している。また、スタンド部分については表-1に示すようなレベル-1、レベル-2の2段階の目標地震動レベルを設定し、それぞれのレベルの地震動に対して耐震設計をしている。

- 1) 1次設計では、鉛直荷重時応力、水平荷重時応力の組合せに対して、許容応力度設計を行ったが、温度応力を考慮した設計を行いノンエキスパンションジョイント化の安全性の確認をしている。
- 2) 2次設計では、スタンドおよびフィールド人工地盤部は「ルート3b」とし、保有水平耐力が必要保有水平耐力以上であることを確認している。

スタンド外周人工地盤部については、「ルート3a」による終局強度設計を行っている。

- 3) スタンドの耐震設計は、2段階のレベル地震動に対して、表-2に示す耐震判定基準を満たすように行っている。

表-1 地震動レベルと建物の耐震性能目標

地震動レベル	レベル	1	2
	最大速度		20cm/s
地震動の大きさ		建物の耐用年限中に1度以上遭遇する可能性がある地震動	将来遭遇する可能性があると考えられる最大級の地震動
建築物の耐震性能目標		小規模の修復により建物を再使用できるよう、構造部材は軽微な損傷が生じても降伏しないこと。	建築物に多少の損傷が生じて、人命の安全が守られるよう、建築物の崩壊、非構造部材の脱落等が生じないこと

表-2 耐震判定基準

レベル	1	2
層間変位角	1/200以下	1/100以下
層の塑性率	1.0以下	2.0以下

なお、入力地震波については標準的な地震動として「TAFT1952(EW)」、「TOKYO 101 1956(NS)」、「HACHINOHE 1968(NS)」と建設地の地域特性を表すような模擬地震波「YOKOFACE」を採用している。

(2) 構造各部の設計方針

1) スタンド本体

本体の主架構はプレキャストPC造の7階建である。構造計算は日本建築センター編の「プレストレストコンクリート造設計施工指針」に準拠し、1次設計、2次設計（ルート3b）の保有水平耐力の計算を行って、保有水平耐力が必要保有水平耐力を上回ることを確認している。必要保有水平耐力は構造特性係数（ D_s 値）を0.3として、用途係数は1.25の値を採用している。

2) フィールド人工地盤部

フィールド人工地盤1階部は遊水池機能を条件づけられたことから、プレキャストPCブレース設置部分以外は地中梁をなくし、各柱脚はピン構造としている。このため、水平力抵抗要素としてPCブレースを設置している。耐震設計ルートは「ルート3b」として、保有水平耐力の計算を行っている。必要保有水平耐力は D_s 値を0.4、用途係数は1.25の値を採用している。

3) スタンド外周人工地盤部

人工地盤部のプレキャストPC造、基礎はプレキャスト鉄筋コンクリート造の純ラーメン構造である。耐震設計ルートは「ルート3a」の終局強度設計である。用途係数は1.25の値を採用している。

3.2 耐震設計

(1) スタンド本体

解析にあたっては、建物が対称形であることから、X方向、Y方向ともそれぞれ1/2ブロック分の立体剛性マトリックス解析（図-5）により、鉛直荷重時、水平荷重時の応力を算出している。

1次設計時の最大層間変形角は、X方向1/350（1階）、

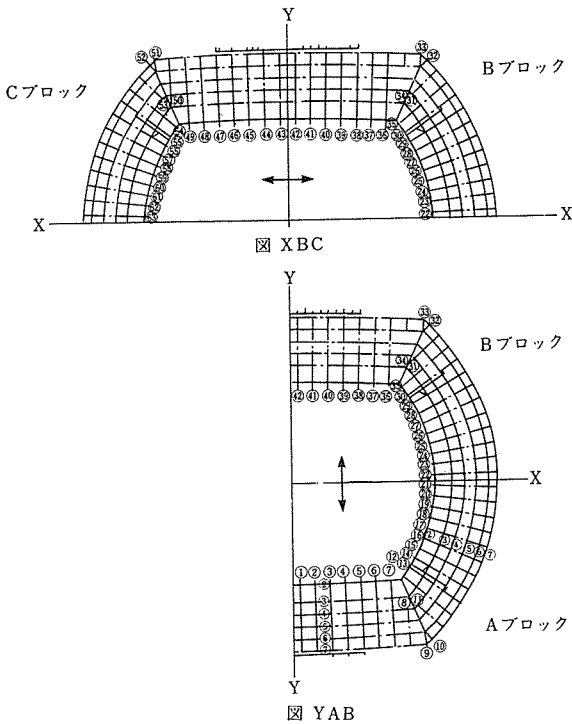


図-5 解析モデル

Y方向1/348（1階）である（表-3）。

保有水平耐力は、構造特性係数（ $D_s=0.3$ ）と用途係数（ $I=1.25$ ）を考慮した必要保有水平耐力に対して、X方向で1.08～1.36倍、Y方向で1.08～1.41倍の余裕度となっている（表-4）。

(2) フィールド人工地盤部

1次設計時の鉛直荷重、水平荷重の応力は疑似立体剛性マトリックスにより算出している。水平力のブレース負担率は、X、Y方向とも約93%となっている。

2次設計の保有耐力は、構造特性係数（ $D_s=0.4$ ）と用途係数（ $I=1.25$ ）を考慮した必要保有水平耐力に対して、X方向で1.03倍、Y方向で1.29倍となっている。

(3) スタンド外周人工地盤部

1次設計時の鉛直荷重、水平荷重の応力は疑似立体剛性マトリックス解析により算出している。1次設計せん断力に対する最大層間変形角はX方向で1/520（1階）、Y方向で1/542（1階）となっている。

2次設計は終局強度設計を行っている。水平力は1.5Kとし、用途係数（ $I=1.25$ ）を考慮している。柱、大梁の設計応力に対する終局耐力の余裕度は以下のようにになっている。

- 大梁 「曲げ」 に対して 1.01～1.27
「せん断」 に対して 1.04～1.22
- 柱 「曲げ」 に対して 1.11～1.39
「せん断」 に対して 1.16～1.46

4. スタンドの動的解析

表-3 層間変形角（静的解析）

○Y方向加力時

通り	42通り-G通り				
	δ (cm)	$\Delta \delta$ (cm)	h(cm)	$\gamma = \Delta \delta / h$	
7階	6.78	0.32	978	0.327×10^{-3}	1/3056
6階	6.46	0.73	400	1.825×10^{-3}	1/547
5階	5.73	0.81	400	2.025×10^{-3}	1/493
4階	4.92	0.51	420	1.214×10^{-3}	1/823
3階	4.41	0.74	400	1.850×10^{-3}	1/540
2階	3.67	1.09	453	2.406×10^{-3}	1/415
1階	2.58	2.58	900	2.867×10^{-3}	1/348

○X方向加力時

通り	42通り-G通り				
	δ (cm)	$\Delta \delta$ (cm)	h(cm)	$\gamma = \Delta \delta / h$	
7階	6.53	0.33	978	0.337×10^{-3}	1/2963
6階	6.20	0.56	400	1.400×10^{-3}	1/714
5階	5.64	0.64	400	1.600×10^{-3}	1/625
4階	5.00	0.60	420	1.429×10^{-3}	1/700
3階	4.40	0.79	400	1.975×10^{-3}	1/506
2階	3.61	1.04	453	2.296×10^{-3}	1/435
1階	2.57	2.57	900	2.856×10^{-3}	1/350

表-4 保有水平耐力表

$Q_{un} = D_s * F_{es} * Q_{ud} = 0.3 * 1.0 * Q_{ud}$
 $Q_{ud} = Z * R_t * A_i * C_o * W * I$ ($C_o = 1.0, I = 1.25$) (t)

方向	階	Z	A_i	R_t	W	Q_{ud}	Q_{un}	Q_u	Q_u / Q_{ud}	Q_u / Q_{un}
X	7	1.0	2.134	0.973	37 384.42	97 030.4	29 109.2	34 302.1		1.17
	6	1.0	1.778	0.973	66 144.12	143 036.2	42 910.9	53 452.5		1.24
	5	1.0	1.654	0.973	82 129.63	165 218.3	49 565.5	54 541.3		1.10
	4	1.0	1.537	0.973	100 915.16	188 648.4	56 594.5	77 295.9		1.36
	3	1.0	1.271	0.973	159 861.90	247 123.1	74 136.9	80 483.2		1.08
	2	1.0	1.121	0.973	175 939.32	239 664.5	71 899.4	83 230.6		1.15
	1	1.0	1.000	0.973	242 419.55	294 842.8	88 452.8	98 900.9		1.11
Y	7	1.0	2.134	0.973	37 384.42	97 030.4	29 109.2	34 333.6		1.17
	6	1.0	1.778	0.973	66 144.12	143 036.2	42 910.9	52 389.6		1.22
	5	1.0	1.654	0.973	82 129.63	165 218.3	49 565.5	53 701.1		1.08
	4	1.0	1.537	0.973	100 915.16	188 648.4	56 594.5	80 068.0		1.41
	3	1.0	1.271	0.973	159 861.90	247 123.1	74 136.9	80 573.9		1.08
	2	1.0	1.121	0.973	175 939.32	239 664.5	71 899.4	80 038.0		1.11
	1	1.0	1.000	0.973	242 419.55	294 842.8	88 452.8	97 687.6		1.10

スタンドの対称性を利用し、図-5に示すようにX方向、Y方向とも1/2ブロックの立体振動解析を行った。この解析モデルの節点数は約3 000、要素数は約7 300である。なお、使用プログラムはMSC-NASTRANである。屋根を含めたスタンドは全部材をとり、柱脚は固定としている。

動的解析結果は、レベル-1地震動（20kine）の応答時においては、「3. 構造設計」で述べた地震波に対して、全部材が弾性範囲にあった。レベル-2地震動（40kine）では、地震波「TOKYO 101」で梁の断面に降

伏ヒンジを発生する結果となったが、おおむね弾性範囲であった。

PC圧着工法による接合部は、力学的特性として、荷重～変位関係においてOrigin-Orientedの特性を持つことから、ヒンジ形成後の剛性低下を考慮した解析も行った。その結果によれば、40kineはもちろん、50kineの地震動でも応答層せん断力は保有水平耐力以下で、かつ、層間変形角が1/150以下であり、レベル-2地震動に対しても建物が安全であることを確認している。

5. PC工事の施工

5.1 スタンドの施工計画

方円形状のスタンド部は、フレーム全長が約900mとなり、しかも最終的にはノンエキスパンションで一体となることから、①プレストレス導入によるフレームの弾性収縮、②PC部材の乾燥収縮、③温度応力、などによる不静定二次応力を最小とするため、全体を4エリアに分割し、これら各エリアのコーナー部のフレーム（円周方向のスパン数として4～5スパン分、図-4のコーナー部参照）を同時着工してPC圧着工法によってこのフレーム部分を剛節構造とした。

この4エリアの各コーナー部のフレームの構築後は反時計回りに柱、大梁の架設を順々に行き、最終的には4つのコーナー部分で同時に緊張し全体を一体化した。この際、桁行方向には6～8スパンごとに仮のエキスパンションジョイントを設けて水平移動を可能にしながら建方精度の調整を行っている。図-6にPC組立圧着工法の手順を示す。

PCケーブル配線を図-7に示す。コンクリート部材製作工場で行われる一次ケーブルは図-7の梁下端各スパンごとの長さのものであり、二次ケーブルについては2つの種類に分けられる。1つは各柱～梁結合部ケーブル（a、bケーブル参照）と、2つ目はスパン全長にわた

って貫通しているケーブル（①～⑧ケーブル参照）である。2次ケーブルの緊張は、各柱～梁の圧着目地部のモルタル強度が300kgf/cm²以上になったことを確認した後、常に梁の他端が柱のケーブル上で水平移動できる状態（すなわち、ローラー支持）にしておいて柱・梁部を緊張するシステムがここでは採用されている。この緊張システムによって全体フレームを剛節フレームとした場合に生じる不静定二次応力を極力小さくすることが可能となり、スタンド全体を一体の建物とすることが可能としている。

5.2 PC建方

プレキャストPC部材の建方にあたっては、4つのエリアごとに300t～650tのクローラークレーンをスタンド内外に配置し行われた（図-8、写真-3、4）。そのための走行路は軟弱地盤であることから地盤表層を地盤改良している。

5.3 プレキャストPC部材の製作と運搬

プレキャストPC部材のコンクリートは、柱、梁、ハーフPC床版ともすべての設計基準強度を $F_c=500\text{kgf/cm}^2$ とし、管理値としては高強度コンクリートであることから1.1倍を管理目標とした。

コンクリートの品質管理は、「横浜国際総合競技場構造検討委員会」（後述）、PC圧着建築協会で設定した高強度コンクリートの品質管理基準に基づき製作可能な工場を選定し、20を超えるPC工場で作成にあたった。

部材の運搬はトレーラー陸送が主であったが、スタンド部最上階の40tを超えるY字型柱は海上輸送により、横浜港経由で現場にトレーラーで搬入した。使用したPC部材数量を表-5に示す。

5.4 建物の全体工程

建物の全体工程を表-6に示す。スタンド部のPC建方工事の工期は約13ヵ月で終了している。ケーブル式PC圧着工法を適用することによって、建設工期は在来工法

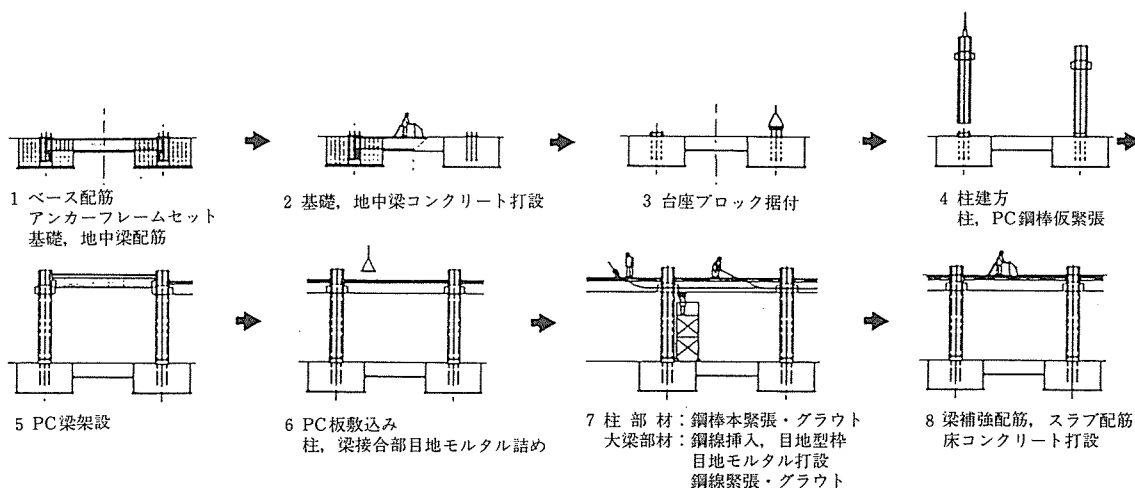


図-6 PC組立圧着工法要領図

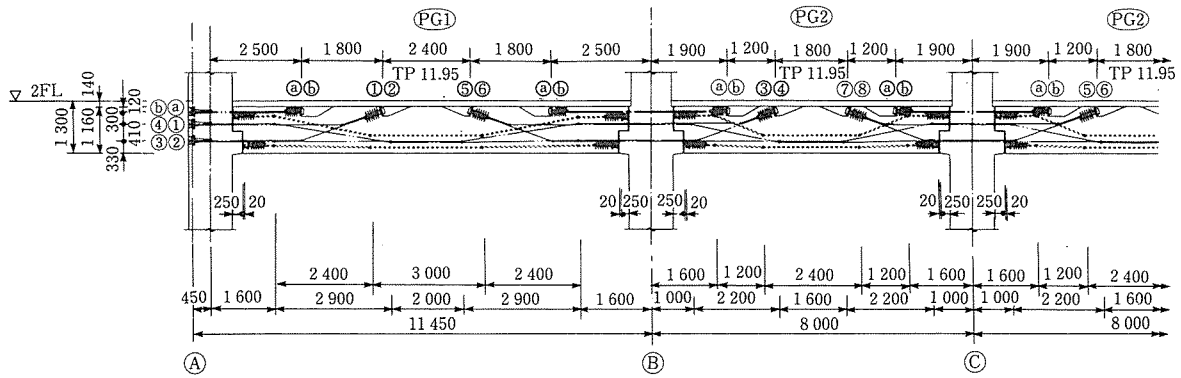


図-7 PCケーブル配線図

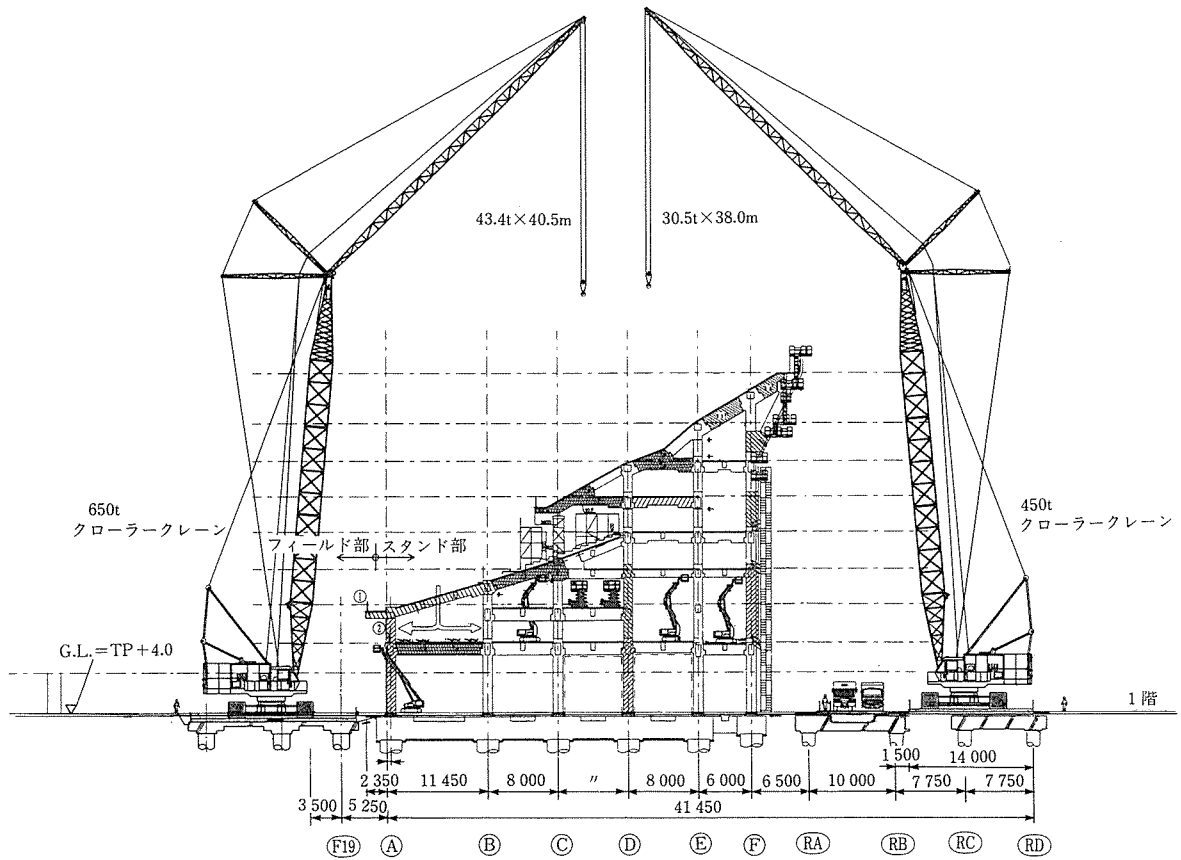


図-8 PC建方計画図サイドスタンド(断面図)

のSRC造に比べて約1年間の工期短縮を実現させている。

6. おわりに

本競技場の構造体は前述のような選定理由により、プレキャストPC造に決定されたが、横浜市としては実施例が少ないこと、建物高さが31mを超え51.96mであることから、委員会を設置し検討・審査を行うこととした。

具体的には表-7に示した学識経験者・建築技術者および行政からなる「横浜国際総合競技場構造検討委員会」を組織し、種々の検討作業により構造体としての安

全性の確認・検証を行った。

参考文献

- 1) KEIZO TANABE : NEWLY DEVELOPED " Press-joint System" Design and Construction method. FIP Symposium '93 (Modern prestressing Techniques and their Applications) in Kyoto, JAPAN Oct. 17-20, 1993
- 2) 田辺恵三 : コーベル式PC圧着工法を用いた剛節骨組の力学的特性と耐震性能に関する研究, 東北大学工学博士論文, 1996.3.15
- 3) 田辺恵三 : プレキャストPC圧着接合に関する設計法と実験的研究, プレストレストコンクリート, Vol.35, No.4 1993

【1997年6月9日受付】

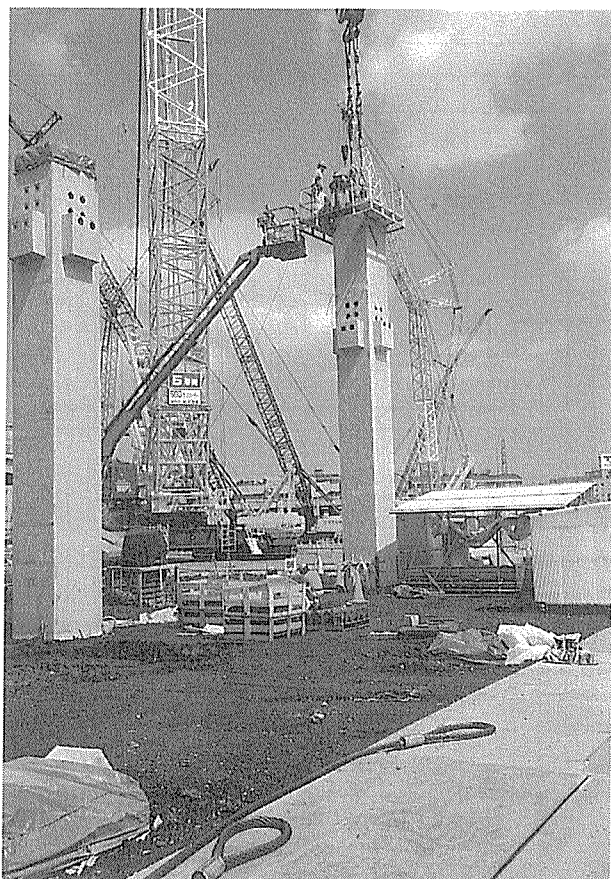


写真-3 PC部材の架設状況(その1)

表-5 PC部材数量表 (単位:ピース)

エリア	部材名	TOTAL	1工区	2工区	3工区	4工区
スタンド	柱	3 032	910	608	906	608
	大梁	4 140	1 270	776	1 292	802
	小梁	2 839	1 016	491	820	512
	床	17 684	5 710	3 028	5 794	3 152
	天井板	416	133	75	133	75
	段床・踏石	13 146	4 041	2 444	4 217	2 444
	TOTAL	42 537	13 548	7 502	13 634	7 853
フィールド	柱・梁・床	3 459	3 459	—	—	—
外周道路 エントランス アリーナ	柱	810	288	96	330	96
	大梁・小梁	1 567	594	184	602	187
	床	5 030	1 920	540	2 030	540
	TOTAL	7 407	2 802	820	2 962	823
カーテンウォール	4 334	1 415	730	1 017	1 172	
全 体	TOTAL	57 737	21 224	9 052	17 613	9 848
エリア	TOTAL	その1	その2			
人 工 地 盤	1 465	721	744			

PCコンクリート数量 約109 800m³
 PC鋼材 約6 000t
 PC鋼棒 約2 000t

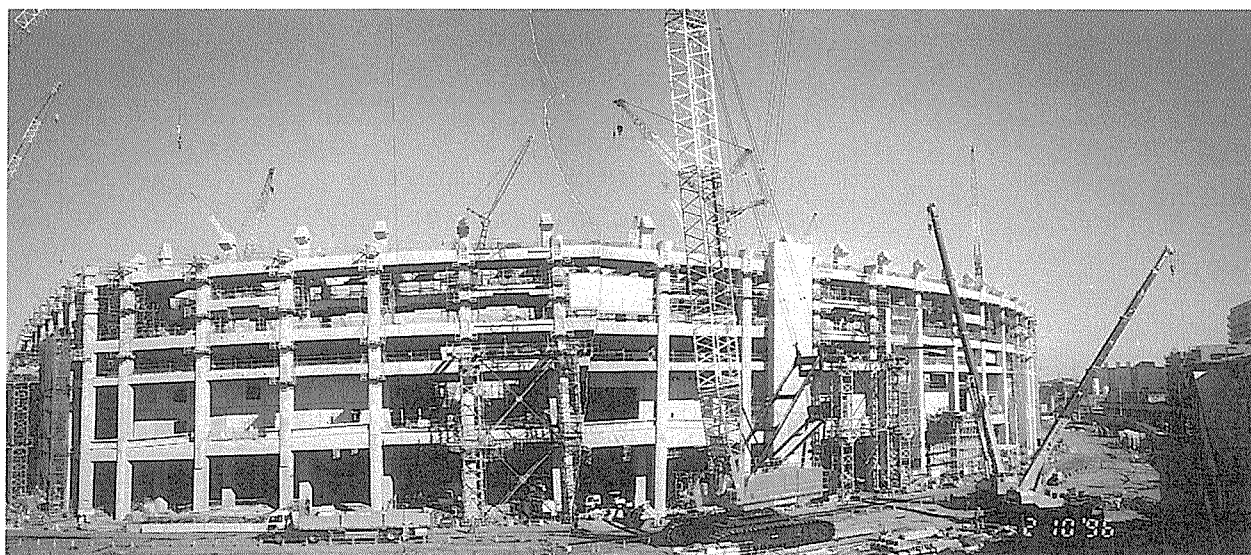


写真-4 PC部材の架設状況(その2)

表-6 基本工事工程表

年度 月 延月	平成5年度			平成6年度								平成7年度								平成8年度								平成9年度																								
	H6.1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	H7.1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	H8.1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	H9.1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48				
スタンド	着手			準備、地盤改良								地上PC開始								屋根鉄骨開始								屋根鉄骨完了								受電								完成期限 10月31日								
	杭工事、基礎躯体工事											準備								地上PC完了								屋根鉄骨工事								仕上工事																
	PC建方工事																																																			
フィールド	準備、地盤改良、杭、基礎躯体工事												スタンド工事用重機走行路																PC建方工事								PC建方工事								工事(別途)							
																													屋根工事作業ヤード																							
人工地盤	準備、地盤改良、杭、基礎躯体工事												PC躯体工事																PC躯体工事								仕上工事															
													スタンド工事用重機走行路																屋根工事作業ヤード																							

表-7 横浜国際総合競技場(仮称)の構造検討委員会・委員会名簿
(1993年当時)

- 委員長 藤本一郎 関東学院大学工学部教授
- 委員(順不同) 松村 晃 神奈川大学工学部建築学科助教授
- 精木 紀男 関東学院大学工学部建築学科教授
- 中田 慎介 建設省建築研究所建築試験室長
- 平石 久広 建設省建築研究所第3研究部構造研究室長
- 小島 賢治 横浜市緑政局 横浜総合運動公園整備室 担当部長
- 紙井 文雄 横浜市金沢区区政部 建築課 課長
- 原田 智吉 横浜市建築局建築指導部 建築審査課 構造係長
- 東 武史 (株)松田平田 構造設計部 部長
- 大関 雄一 (株)松田平田 構造設計部 担当部長
- 坂井 吉彦 (株)松田平田 構造設計部 担当部長
- 小林 直紀 (株)東畑建築事務所 構造部 部長
- 町田 重美 (株)東京建築研究所 取締役副社長
- 武田 照雄 (株)建造技術研究所 代表取締役社長
- 田辺 恵三 PC圧着建築協会 技師長
- 顧問 問 広谷啓太郎 (株)松田平田 横浜支所 所長