みなとみらい 21・25 街区ランドマークタワー（仮称） における超低発熱コンクリートの施工

山崎 真司*¹・石川 泰正*²・岡本 修一*³・川北 雅章*⁴

概要 みなとみらい 21・25 街区ランドマークタワー（仮称）高層棟の基礎となるマット部は、面積 5 350 m²、厚さ 5.0 m、鉄筋量 4 300 t、コンクリート総量約 2 万 6 750 m³ の超マスコンクリートとなっている。そこで、温度ひびわれを抑制するため、大規模建築工事としては初めて超低発熱セメントを使用したコンクリートを適用するとともに、構造物の一体性重視の観点からも分岐管工法によりコンクリートの一括大量施工を行った。本稿は、その施工概要について報告するものである。

キーワード：マスコンクリート、超低発熱セメント、フライアッシュ、分岐管工法

1. ま え が き

みなとみらい 21・25 街区ランドマークタワー（仮称）は、21 世紀におけるウォーターフロントの新都心を目指した「横浜みなとみらい 21 計画」のシンボルタワーである。そのうち高層棟は、最高高さが 296 m あり、完成すると、高さ、建築面積ともにわが国で最大規模の超高層建築物になる（図-1）。

高層棟の基礎となるマット部は、面積 5 350 m²、厚さ 5.0 m、鉄筋量 4 300 t、コンクリート総量約 2 万 6 750 m³ の超マスコンクリートとなっている。今回、厚さ 5.0 m のマット部を、0.5 m+4.5 m の 2 層打ちで施工を行った。

本報告は、主として、平成 2 年 7 月 7 日～8 日に行った 2 層目（面積 5 350 m²、高さ 4.5 m、総量約 2 万 4 000 m³）のコンクリート打設工事について述べたものである。

2. 工 事 概 要

工事名称：みなとみらい 21・25 街区

ランドマークタワー（仮称）新築工事

所在地：横浜市区西区みなとみらい二丁目 2 番

建築主：三菱地所（株）

*1 やまさき・しんじ／三菱地所（株）MM 21 設計室

*2 いしかわ・やすまさ／同 上 工務部

*3 おかもと・しゅういち／大成建設（株）技術研究所（正会員）

*4 かわきた・まさのり／みなとみらい 21・25 街区ランドマークタワー（仮称）新築工事共同企業体

設計・監理：三菱地所（株）

施 工：大成建設（株）ほか 26 社 JV

建物規模：高層棟／地下 1 階 地上 70 階 塔屋 3

図-1 完成予想図

階
低層棟／地下4階 地上5階一部8階
構 造：S造・SRC造（一部RC造）
建築面積：23 514 m²
延床面積：392 284 m²
軒 高：282.3 m, 最高高さ：296.0 m
主要施設：オフィス、ホテル、ショッピングモ
ール、イベント広場、展望フロア、文化施
設、フィットネス施設、駐車場ほか
工 期：着工／平成2年3月20日
竣工／平成5年4月（予定）

3. マスコンクリート施工に対する検討

3.1 マスコンクリート適用範囲

ランドマークタワーにおけるマスコンクリートは、マット部（厚さ5 mのRC造）、マット立上り（階高6.5 mのRC造、鉄骨はこの部分に定着される）、およびB3 F～8 F（壁厚1.6 mのSRC造）に大別され、全打設量は約6万m³である（図-2）。

3.2 品質管理体制

上述のようなマスコンクリートを施工するにあたり、温度応力等による構造上不都合なひびわれが生ずることが予想された。そこで、設計者・監理者・作業所および主要建設業各社の技術研究所の専門家によって、マスコンクリート施工検討委員会（委員長：三菱地所㈱工務部 鈴木 寿現場監理事務所長）を組織し、友澤史紀東京大学教授の技術指導を受け、コンクリートの配合、施工方法、温度応力解析および計測計画等の諸項目を検討し、現在も施工が進められている。

3.3 温度ひびわれの抑制の基本方針

ひびわれ発生を抑制する方法は、一般的に、コンクリートに発生する温度応力を低減する方法と、発生した温度応力を打ち消すような応力を作用させ応力を補償する方法の2種類に大別できる。また、ある程度のひびわ

れの発生は許容するが、発生するひびわれの位置、場所、幅を制御するという考え方もある。今回、現場周辺の環境、施工条件、経済性等も踏まえ委員会で検討を行った結果、採用された主なひびわれ抑制の基本方針は、次のとおりである。

（1）セメント

コンクリート発熱量の低減を目的に、使用実績、供給量・体制なども考慮し、低発熱型高炉セメントB種（以下MBB）、およびこれにさらに20%フライアッシュを混入させた超低発熱セメント（以下FMBB）を使用する。

（2）配 合

単位セメント量の低減を目的に、設計基準強度の指定材令を91日とし、施工性の向上のためスランプを増大させる場合には流動化剤を使用する。また、大量のコンクリートを長時間にわたって打設するので、コールドジョイント発生防止の意味からも遅延形のAE減水剤を使用する。

（3）打 設

マット部は、ひびわれ抑制ばかりでなく構造物の一体性も重視する目的で、打設方法としては、LNG地下式貯蔵槽の底版等で実績があり、大量のコンクリートを打継目やコールドジョイントを作ることなく一度に連続打設できる「分岐管工法」¹⁾を採用する。また、コンクリート打設平均温度は30℃以下とし、これを満足できないと予想される場合（たとえば夏期打設となるマット立上り部）には、ブレーキング（練りませ水を冷却機で4℃まで下げる）を行う。

4. コンクリートの配合

4.1 セメントの選定

図-3に、コンダクションカロリメーターによる水和熱試験の結果を示す。FMBBは、水和発熱速度の第1ピークがもっとも小さくなっており、また48時間後

Construction of MM 21 LANDMARK TOWER's Mat Foundation Using Super Low-Heat Concrete

By S. Yamasaki, Y. Ishikawa, S. Okamoto and M. Kawakita

Concrete Journal, Vol. 29, No. 4, pp. 50~58, April 1991

Synopsis Mat foundation of MM 21 LANDMARK TOWER is very massive reinforced concrete structure (Area; 5 350 m², Depth; 5.0 m, Reinforcement; 4 300 t, Concrete Volume; 26 750 m³). Therefore, Super low-heat cement, which consists of portland cement, blast-furnace slag, and fly ash are employed in order to prevent the occurrence of thermal cracks in concrete. And for eliminating construction joints, Concrete is placed by Bifurcating Pipe Layout Method. This report will explain the outline of these concrete works.

Keywords : mass concrete, low-heat cement, fly ash, bifurcating pipe layout method

マット部

- ・設計基準強度：240kgf/cm²
- ・コンクリート打設量：2万4800m³
- ・代表厚さ：5.0m

マット立上り部

- ・設計基準強度：350kgf/cm²
- ・コンクリート打設量：1万6200m³
- ・代表厚さ：壁 5.2m

B3F~8F

- ・設計基準強度：300kgf/cm²
- ・コンクリート打設量：1万9360m³
- ・代表厚さ：壁 1.6m

図-2 マスコンクリートの適用範囲

図-3 セメントの水和熱試験結果

の積算発熱量は、MBB よりさらに約 13% 小さく、普通ポルトランドセメントの 45% 程度であることが分かる。

当工事におけるマスコンクリート用セメントとして

は、MBB または FMBB を使用するものとしたが、マット部コンクリートのセメントには、一括大量打設を可能とするためにも、より発熱量の少ない FMBB を選定した。

図-4 コンクリート試練り強度試験結果 (材令 91 日)

4.2 基本配合

一般の生コンクリート工場では、FMBBの使用実績が少ないので、まず、委員会でのコンクリートの試練りを行い、コンクリートの基本配合を定め、これにもとづいて各工場で試練りを行い、最終的に配合を決定することにした。

目標スランプ $12 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、目標空気量 $4 \pm 1\%$ で、水セメント比を 40, 45, 50, 55% の 4 種類に変化させ、委員会で実施した材令 91 日における強度試験の結果を図-4 に示す。

マット部の配合強度は、各工場の実績にもとづき、

$$F_{91} = F_c + 2.5\sigma$$

ここに、 F_{91} : 配合強度 (kgf/cm^2)

F_c : 設計基準強度 (kgf/cm^2)

σ : 標準偏差 ($=25 \text{ kgf/cm}^2$)

とした。マット部の設計基準強度は 240 kgf/cm^2 であるので、配合強度は 302 kgf/cm^2 となる。したがって、図-4 から、 $F_{91} = 302 \text{ kgf/cm}^2$ を満足する水セメント比は 61% となるが、特記仕様書において水セメント比の最大値は 55% と規定されているので、基本配合は水セメント比 55% (単位セメント量 271 kg/m^3 、単位水量 149 kg/m^3 、細骨材率 45.5%) とした。

また、水セメント比 45, 50, 55% のコンクリートについて、練上り温度 20°C で実施した断熱温度上昇試験の結果を図-5 に示す。なお、各配合の単位セメント量は、それぞれ 343, 304, 271 kg/m^3 である。

この試験結果を、断熱温度上昇式

$$Q_{(t)} = K(1 - e^{-\alpha t})$$

にあてはめると、

$$K = 1.57 + 0.10 C \text{ (}^\circ\text{C)}$$

図-5 コンクリートの断熱温度上昇試験結果

図-6 各種セメントを使用したコンクリートの断熱温度上昇曲線

$$\alpha = 0.33 + 0.0004 C \text{ (1/日)}$$

が得られる (C : 単位セメント量 kg/m^3)。既往の各種セメントを使用したコンクリートの断熱温度上昇曲線 ($C=300 \text{ kg/m}^3$ 、練上り温度 20°C)²⁾ に、今回実施した水セメント比 50% ($C=304 \text{ kg/m}^3$) の結果を併記すると、図-6 が得られる。この図からも、FMBB はきわめて温度上昇が低いセメントであることが分かる。

4.3 プラント試練り

マット部コンクリート約 2 万 4 000 m^3 を 2 日間 (40 時間) 連続打設で終了させるには、平均約 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ のコンクリートを確保しなくてはならない。そこで、現場に 40 分程度でコンクリートを供給できるという条件で、生コン工場 10 社を選定し、基本配合をもとに各工

表-1 各生コン工場の決定配合

工場	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					AE 減水剤
			W	C	S	G		
A	55	46.1	144	262	866	1 050		0.640
B	55	46.1	144	262	866	1 050		0.655
C	55	45.5	149	271	845	1 050		0.678
D	55	45.5	146	265	844	1 039		0.663
E	55	45.5	149	271	843	1 053		0.678
F	55	46.0	151	275	853	1 018		0.688
G	55	45.5	149	271	843	1 050		0.678
H	55	45.5	149	271	836	1 043		0.678
I	55	44.1	152	276	814	1 058		0.690
J	55	45.4	149	271	840	1 050		0.678

表-2 生コン工場使用骨材の種類

工場	粗 骨 材	混合比率	細 骨 材	混合比率
A	高知県鳥形山 石灰岩		千葉県君津市 山砂	
B	高知県鳥形山 石灰岩		千葉県君津市 山砂	
C	高知県鳥形山 石灰岩		千葉県君津市 山砂	
D	大分県津久見 石灰岩		千葉県君津市 山砂	
E	大分県津久見 石灰岩	70	千葉県君津市 山砂	50
	東京都西多摩 硬質砂岩	30	神奈川県厚木市 川砂	50
F	大分県津久見 石灰岩		千葉県君津市 山砂	
G	青森県八戸市 石灰岩		千葉県君津市 山砂	
H	青森県八戸市 石灰岩	60	千葉県君津市 山砂	70
	山梨県大月村 安山岩	40	神奈川県厚木市 川砂	30
I	青森県八戸市 石灰岩		千葉県君津市 山砂	
J	埼玉県秩父市 砂 岩		千葉県君津市 山砂	

場で試し練りを実施した。なお、各工場ともセメントと混和剤は同一のものを使用できる供給体制を確保した。ただし、骨材（細骨材、粗骨材）は、各工場が通常使用しているものである。

試し練りの結果決定したマット部コンクリートの配合を、表-1に示す。単位水量は144～152 kg/m³、細骨材率は44.1～46.1%の範囲にあり、ほぼ類似した配合となった。これは、表-2に示すように、10工場が使用している細骨材はすべて千葉県君津産の山砂で（2工場は君津産山砂に川砂を混合）、粗骨材は1工場（砂岩を使用）を除き石灰岩の碎石を使用していることによるものと考えられる。図-7に、10工場の試し練りから得られた強度試験の結果を示す。図から、各工場とも材令91日で配合強度302 kgf/cm²を十分に満足している。

5. マット部コンクリートの施工

5.1 分岐管工法の利点

マスコンクリートにかぎらず、一般的にコンクリート

図-7 強度試験結果

構造物を打設する場合、構造面、長期耐久性や経済性などから考えると、なるべく打継ぎ部を少なくし、一体として打設することが望ましい。たとえば、垂直打継ぎ部では、温度降下や乾燥によるコンクリートの収縮にともない、継目が開き、鉄筋に過大な引張応力が発生したり、鉄筋の発せいによる長期耐久性低下の懸念がある。また、水平分割による多層打設を行うと、上部のコンクリートが既設の下部コンクリートにより外部拘束を受けるので、1リフトの打設高さを極端に小さくして温度上昇を低減しないかぎり、水平分割打設のほうが一体打設よりも温度ひびわれに対して不利になることが多い³⁾。さらに、今回のマット部のように打設面積が広い場合には、水平打継ぎ部のレイトランス処理に時間と労力がかかり、最終的には不経済となる。

このような問題点を一挙に解決する工法として、分岐管工法を採用することにした。分岐管工法概念図を図-8に示す。この工法は、コンクリートの分配供給の一方法で、打設範囲全体にあらかじめ分岐式の配管を行い、多数の吐出口を配置することにより、ポンプ車で圧送したコンクリートを配管の切継ぎなしに、全域を同時にかつ均等に連続して打設する方法である。

5.2 分岐配管計画

マット部の分岐管の配管計画を図-9に示す。マット

図-8 分岐管工法によるコンクリート打設概念図

図-9 分岐管配管計画図

図-10 1ブロック当りの打設要領図

図-11 コンクリートの供給計画と実際

部総打設面積 5 350 m² を 10 打設ブロックに分割し、各打設ブロックは、さらに図-10 に示すように分岐管による 8 本のフレキシブルホースでカバーした。さらに、各フレキシブルホースは、それぞれ 4 か所のホッパーにコンクリートを供給することにした。すなわちマット部の周辺に配置された 10 台のコンクリートポンプ車から

圧送されるコンクリートは、80 本のフレキシブルホースに分配され、さらに 320 か所のホッパーに供給されることになる。なお、1 ホッパー当りの平均打設面積は約 17 m² (半径 2.3 m) である。作業員の配置は、1 フレキシブルホース当り筒先マン 1 名、パイプレーターマン 1 名で、1 ポンプ車当り 16 名の人員となる。

5.3 コンクリートの打設

コンクリートの供給計画を図-11 に示す。打設日は、生コン工場を専用プラントとして使用しやすい週末に設定した。選定した生コン工場 10 社について、コンクリートを昼間しか製造できない工場 (グループ A) と夜間もコンクリートの製造が可能な工場 (グループ B) の 2 グループに分け、土曜日の昼間は A、B 両グループを使用し各社 80 m³/h のペースで打設し、夜間は引き続き B グループを、日曜日の昼間は A グループを使用し、各社 140 m³/h のペースで打設することとした。

実際の打設状況を写真-1~4 に示す。打設は、7月7日(土曜日)の午前7時に開始し、翌8日(日曜日)午後10時30分に、延べ39時間30分で全コンクリート量の打設を予定どおり完了した。

5.4 品質管理

コンクリート打設中におけるスランプ、空気量、打設温度の管理図を図-12 に示す。管理目標値は、スランプ

写真-1 打 設 状 況 (全景)

写真-2 打設状況（1ブロック）

写真-3 コンクリート打設口

写真-4 コンクリート締固め状況

図-12 コンクリート品質管理図

図-13 圧縮強度試験結果ヒストグラム

12±2.5 cm, 空気量 4±1%, 打設温度 30℃ 以下で, 打設中のスランプの平均値は 13.4 cm, 空気量の平均値は 3.9%, 打設温度 27.0℃ であった。

また, 材令 91 日におけるコンクリートの圧縮強度試験の結果を図-13 に示す。すべて設計基準強度 240 kgf/cm² を超えており, 全試験数 57 の平均強度は 315.5 kgf/cm² (標準偏差 19.9 kgf/cm²) で, 十分に満足できる結果となった。

6. マット部の温度および応力の測定結果

図-14 に, マット部平面中央位置における深さ方向に測定した温度 および有効応力履歴を示す。中心 (測点 3) の最高温度は 54.5℃ で, 打設時温度 27.0℃ からの温度上昇量は 27.5℃ であった。この値は, 事前に実施した同配合のコンクリートによる断熱温度上昇試験結果 (練上り温度 30.7℃, $K=28.1^\circ\text{C}$) と同程度である。また, 発生した有効応力も, 引張りで 5 kgf/cm² 程度と低く抑えることができ, 温度応力による有害なひびわれ

図-14 マット部中央位置における温度および有効応力計測結果

の発生は認められなかった。これらの結果から、超低発熱セメントを使用することにより、マスコンクリートの温度応力を十分低減できることが分かる。

7. む す び

みなとみらい 21・25 街区ランドマークタワー（仮称）を施工するにあたり、総量約 2 万 4 000 m³ の基礎マット部を、大規模建築工事では初めて超低発熱セメントを用いたコンクリートを使用し、分岐管工法により 40 時

間一括連続打設を行った。その結果として、温度上昇が少なく、有害な温度ひびわれ発生のないコンクリートを施工することができた。

近年、建築物の高層化にともないコンクリートの高強度化が望まれ、また、施工の省力化とも相まって、大量急速施工・連続施工へと進む傾向にある。さらに、コンクリート構造物の耐久性向上の観点から、これまで以上の高度なひびわれ抑制対策が要求されるようになってきている。こうしたなかで、セメントの水和熱に起因する温度ひびわれの発生が問題となることが多くなっている。その対策として超低発熱セメントの使用は、コンクリートの発熱量を直接低減できるため、施工条件によらず効果が確実に得られること、また、比較的低コストで実施できること等から、大規模建築工事において、今後ますます使用が増大してゆくことが予想される。

最後に、本工事において種々ご指導いただいた友澤史紀東京大学工学部教授、マスコンクリート施工検討委員会委員の皆様方、ならびに現在も引き続きご協力いただいているセメントメーカー、生コンクリート工場、協力業者各社の方々に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 田辺 清・高瀬三郎：分岐管によるコンクリートのポンプ施工－東電・東扇島 LNG センター－，コンクリート工学，Vol. 25，No. 6，1987. 6
- 2) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5，鉄筋コンクリート工事，日本建築学会
- 3) 宇田川ほか：コンクリートスラブの施工時温度応力に対する層割りの影響，土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集，V 203，1982. 10

＜図 書 案 内＞

Seminar on

Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures

Vol. 1・2, Tokyo, May 20-24, 1985

A 4 判 2 分冊・238+304 ページ／セット価格 20 000 円（税 600 円）・送料 400 円

本書は、1985 年 5 月 20 日～24 日に行われた「鉄筋コンクリートの有限要素解析」に関する講演会および日米セミナーにおける発表論文 [アメリカ側 13 編 (Vol. 1)，日本側 23 編 (Vol. 2)] を収録したものである。

●申 込 先：(社) 日本コンクリート工学協会・管理課「書籍販売係」

〒102 千代田区麹町 5-7 TBR ビル 708 号／電話 (03) 3263-1571 (担当：山口・吾子)

<申込方法> 書籍名・送付先を明記のうえ、前金にてお申込みください。