

報告 高強度コンクリートを使用した梁の初期挙動に関する実験的研究

立松 和彦*¹ 福本 昇*¹ 山崎 順二*¹ 森口 五郎*¹

要旨：高強度コンクリートを使用した建築物の場所打ち梁にひび割れが発生しやすいことから、実大の 2/3 程度の縮尺の梁試験体および架構試験体を作成して梁の初期挙動を観測した。実験の結果、架構試験体では梁断面を貫通するひび割れの発生が見られた。その主な原因はコンクリート温度降下時の外部拘束であること、また、梁内部でのひび割れ幅は、表面付近でのひび割れ幅よりもやや小さいことがわかった。

キーワード：高強度コンクリート，ひび割れ，温度ひび割れ，外部拘束，梁

1. はじめに

近年では大都市およびその周辺では必ずといってよいほど、高強度コンクリートを用いた高層 RC 造建築物を見かけるようになってきている。これらの実構造物でのひび割れの発生状況について報告された例は皆無に近いが、実際に施工中の作業所などで見聞する限りでは、程度の差はあるものの梁のひび割れは発生しているようである。高強度コンクリートを用いるために単位セメント量が大きくなる、部材断面も一般の建築物よりはやや大きいことなどから水和発熱が大きくなり、温度ひび割れが発生しやすくなるとの推察は容易である。一般にこの種のひび割れに関する実験では、小型モデルではひび割れを確実に再現させることが難しく、実大規模に近い大きさの試験体で実施することになる。そのためマスコンクリートや実構造物でのひび割れ調査などを除けば、報告例はあまり多くない [1, 2, 3]。そこで本研究では、このような高強度コンクリートを使用した場所打ち梁に生じることの多いひび割れを再現させ、梁の初期挙動について種々の計測を行った結果を報告する。試験体の大きさは実大の 2/3 程度とし、①部材実験（梁部材単体の試験体）、②架構実験（柱・梁・床からなる架構試験体）を実施した。その内、ひび割れの再現が見られた架構実験における結果を中心に報告する [4]。

2. 実験概要

2. 1 架構実験（柱・梁・床の架構）

架構実験では、柱・梁・床で構成された 1 スパンの架構試験体を 2 体作成し、ひび割れの再現、梁の初期挙動などについて検討した。試験の対象

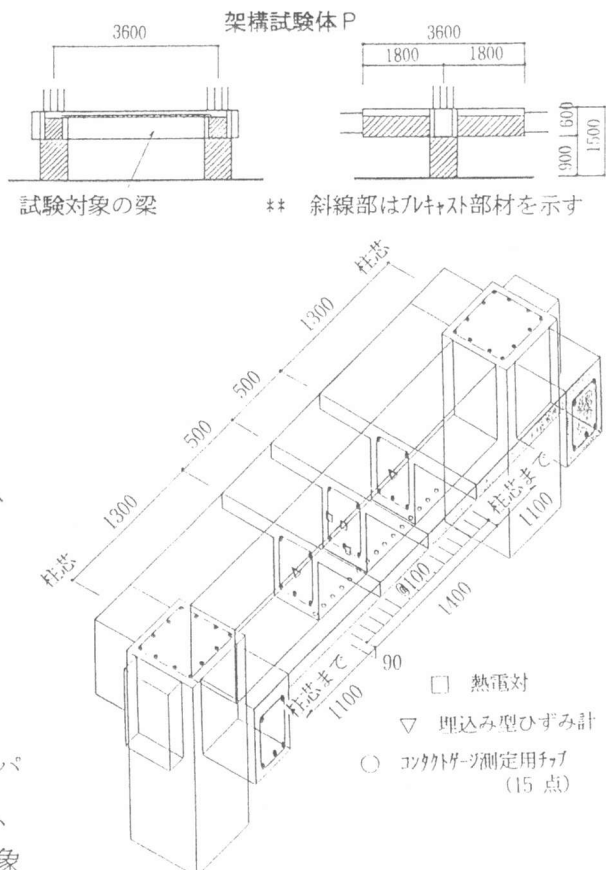


図-1 架構試験体

*1 (株)浅沼組 技術研究所

は柱間の場所打ち梁の部分であるが、直交する片持ち梁の部分をも場所打ちとしたもの（架構試験体S）とプレキャストとしたもの（架構試験体P）との2種類の試験体とした。一方向をプレキャスト部材にすることにより場所打ち部分の梁に対する拘束の程度が異なるのではないかと考え、実験の要因とした。試験体を図-1に示す。柱は600mm角、柱スパンは3600mm、梁は両方向とも幅400mm×高さ600mmとした。梁の配筋は上筋が2-D25、下筋が3-D25 ($p_w=0.70\%$)とした。スラブはハーフPCa合成床板とし、プレキャスト部50mm、場所打ち部60mmとした。架構試験体Sでは、ハーフPCa床板以外のコンクリートは柱も含めて一体打設とし、架構試験体Pでは試験対象以外の梁および柱（梁底位置まで）のコンクリートを先行打設してプレキャスト材とした。

コンクリートの初期挙動の測定は、埋込み型ひずみ計（カルソ型）を各試験体に2台ずつ設置して行った。コンクリート温度の測定は、熱電対を用いて行った。コンクリート表面のひずみは、型枠の脱型後にコンタクトゲージを用いて測定した。発生したひび割れについては、コンタクトゲージによる挙動の測定、超音波によるひび割れ深さの推定、ひび割れ部のコア採取による調査などを実施した。なお、試験体のコンクリート打設は、プレキャスト部および柱の一部を平成5年9月下旬、場所打ち部を平成5年10月下旬に行った。

2. 2部材実験（梁単体）

部材実験では梁単体の試験体を打設した。実験の要因は、梁部材両端部の拘束の有無、梁筋の有無、などであるが、ここでは、「（端部）拘束なし+有筋（梁FB）」と「拘束あり+有筋（梁BB）」「拘束あり+有筋+型枠存置期間の延長（梁BBZ）」の3体の試験体に関するデータを中心に報告する。両端部の拘束は、両端の基礎部から柱筋を立ち上げて梁を拘束している。拘束なしのものについてはポリエチレンシートにより基礎部との付着を切っている。梁試験体は両端部を幅450mm、高さ600mmの基礎上に載せかけている。梁の断面は幅400mm×高さ600mm、全長3600mmとした。初期挙動の測定は、埋込み型ひずみ計で断面中央部のコンクリートのひずみを、ワイヤストレインゲージで梁鉄筋のひずみ（上筋2ヵ所、下筋2ヵ所）を測定した。コンクリート温度の測定は、熱電対を用いて行った。コンクリート表面のひずみは、型枠の脱型後にコンタクトゲージを用いて測定した。なお、試験体のコンクリート打設は平成5年9月下旬である。

2. 3使用材料

使用したコンクリートはW/C 36.0%, s/a 45.1%, W 180kg/m³, C 500kg/m³, S 720kg/m³, G 906kg/m³ (Gmax 20mm)とし、強度は設計基準強度で420 kgf/cm²相当になるよう計画した。架構実験におけるプレキャスト部材（梁、ハーフPCa床板など）も全て同じコンクリートを使用した。スランプは18cmとし、混和剤はナフタリン系の高性能AE減水剤を使用した。

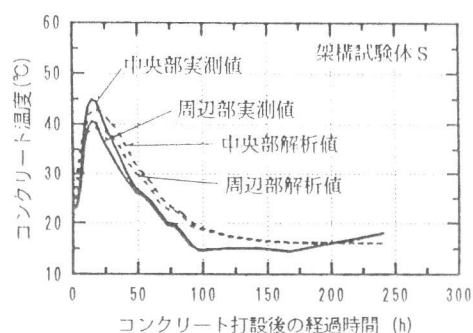


図-2 コンクリート温度

3. 実験結果および考察

3. 1コンクリート温度の解析・実測値および温度ひび割れ指数

コンクリート温度の解析は、梁断面の一部を想定して行った。解析には（社）コンクリート工学協会のマスコリート温度解析プログラム（シュミット法）を使用した。図-2に架構試験体Sの解析結果と実測値を示す。中央部の最高温度は、架構試験体が約45℃、梁試験体が約59℃であった。

解析で求めたコンクリート温度から温度ひび割れ指数を計算した。指数は材齢5日頃に最も小

さくなり、その値は架構が 0.99（材齢 5 日）、梁が 1.09（材齢 5 日）であった。この付近の材齢において架構試験体・梁試験体ともに温度ひび割れの発生する危険性が高いと考えられる。

3. 2 ひび割れの発生

部材実験（梁試験体）では端部の拘束、梁筋の有無などいくつかの要因を設定したが、いずれもひび割れの再現には至らなかった。温度ひび割れ指数などの点では架構実験と条件はあまり変わらないと思われたが、基礎部からの鉄筋だけでは十分な拘束を付与できなかったため、ひび割れ発生に至らなかったものと考えられる。一方、架構実験では試験体 S、試験体 P ともにひび割れが発生した。図-3 にひび割れの状況を示す。梁のせき板用のセパレーターの位置で、各試験体とも 2 本のひび割れが生じた。材齢 7 日に型枠を脱型したが、脱型直後にはひび割れは確認できず、脱型の数時間後にひび割れを確認した。なお、ひび割れの発生したセパレーターやひずみ計の周囲には、コンクリートの沈下に伴う沈みひび割れなどの欠陥は見られなかった。

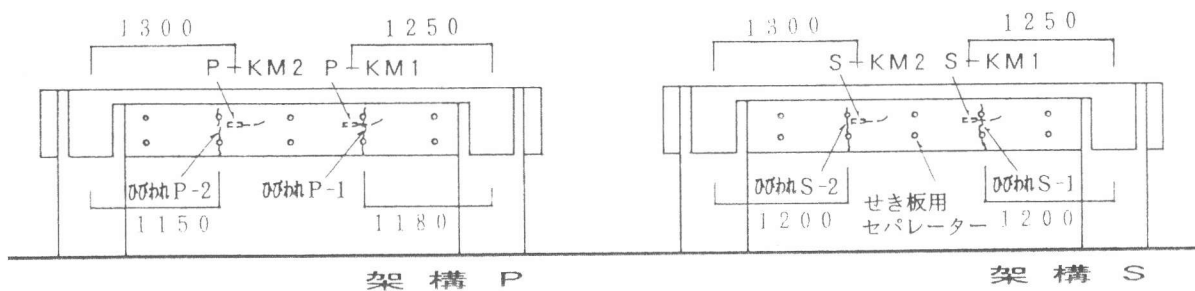


図-3 ひび割れの状況（東面）

3. 3 部材実験におけるひずみの計測

梁試験体におけるコンクリートのひずみを図-4 に示す。梁試験体では、型枠の存置期間を長くした梁 BBZ が最もひずみの絶対値は小さくなった。「端部拘束あり+有筋」の梁 BB と、「端部拘束あり+有筋+型枠の存置期間延長」の梁 BBZ とは型枠の存置期間のみが異なる（BB, FB は材齢 6 日で脱型、BBZ は材齢約 1 ヶ月で脱型）が、BBZ では BB より 100 μ 程度小さなひずみを示した。型枠による保温効果と考えられるが、

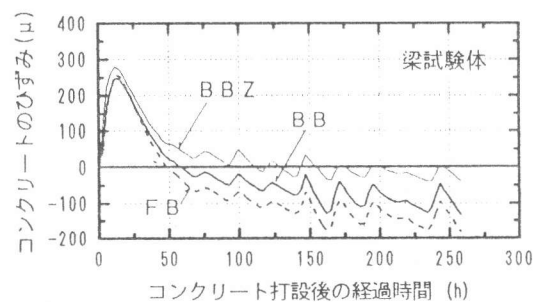


図-4 コンクリートのひずみ（梁）

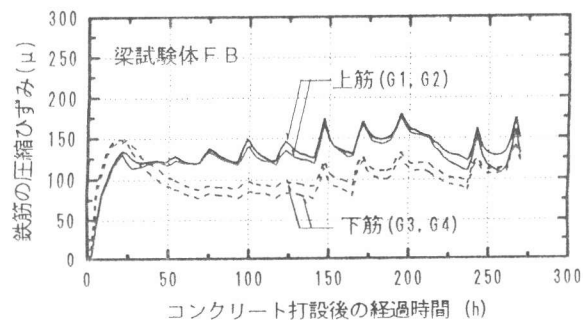
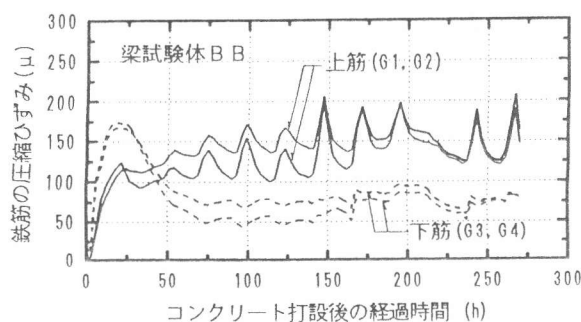


図-5 鉄筋のひずみ（梁）

このことはひび割れの発生を抑制、あるいは発生したひび割れの拡大を抑制することにつながると思われる。また、梁F B（拘束なし）は梁B B（拘束あり） 50μ 程度大きなひずみを示した。

梁試験体における鉄筋のひずみを図-5に示す。上筋では日射の影響によると考えられるひずみの変動が明瞭にあらわれているが、下筋ではそれほどではない。また、梁F B（拘束なし+有筋）と梁B B（拘束あり+有筋）とでは、端部拘束のあるB Bの方が上筋と下筋とのひずみの差がやや大きかった。端部での拘束の程度の違いによるものと考えられ、上下のひずみの差が大きい梁B B（拘束あり）の方がひび割れが発生しやすい状態にあったと思われる。

3. 4 架構実験におけるコンクリートのひずみ

架構試験体におけるコンクリートのひずみを図-6に示す。架構試験体では、試験体S、Pともに材齢4日付近で測定値が大きく変化している。これは温度ひび割れ指数が最小になった材齢とほぼ一致している。図-3に示したように、ひび割れS-2、P-2はひずみ計S-KM2、P-KM2の直近で、ひび割れS-1、P-1はひずみ計S-KM1、P-KM1のコード部分で発生した。そこで、ひび割れ部で採取したコアを詳しく調べたところ、ひび割れS-2はひずみ計S-KM2の端部フランジの約2mm外側に、ひび割れP-2はひずみ計P-KM2の端部フランジにかかるような位置に入っていたことが確認できた。ひび割れとひずみ計とのかような位置関係により良好な追随性が得られ、図-6のような結果になったと考えられる。材齢7日に型枠を脱型するまでは試験体には一切外力はかかっていないので、このひずみの変化の原因は、梁内部でのひび割れの発生ではないかと考えられる。

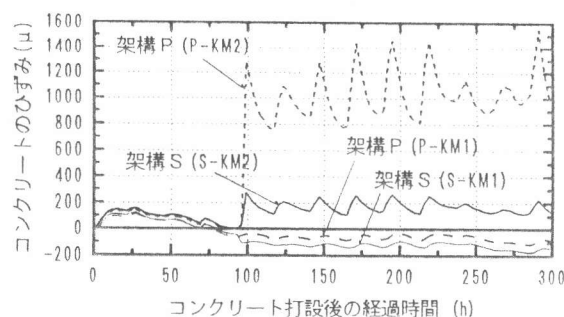


図-6 コンクリートのひずみ（架構）

また、材齢7日に型枠を脱型した直後にはコンクリート表面にひび割れは見られず、その数時間後にひび割れを確認した。ひび割れの発生（確認）状況からその原因を推測すると、型枠を脱型したことによりコンクリート表面が急激に乾燥し、あるいは急激に冷やされて表面にひび割れが発生する場合と、コンクリートの内部において既に（材齢7日までに）発生していたひび割れが型枠脱型までは型枠あるいは内部の鉄筋に拘束されてコンクリート表面に到達しておらず、脱型により進展してコンクリート表面に達した場合との2通りのケースが考えられる。コンクリート温度の測定結果や温度ひび割れ指数、コンクリートひずみの測定値、そして後述するように、貫通ひび割れであったことなどを総合的に勘案すると、後者即ち内部からのひび割れの進展により、型枠脱型後数時間でコンクリート表面にひび割れが発生（到達）したと考えるのが自然であろう。そうすると、このひび割れは温度降下時即ち収縮過程での梁に対する外部拘束によって生じる温度ひび割れであると考えられる〔1〕。端部の拘束効果を定量的にとらえることは難しいが、部材実験の結果および部材実験と架構実験との試験体の差異を考慮すると、梁端部の拘束の程度の差がひび割れの発生につながっていると思われる。なお、架構試験体S（直交する梁も場所打ち）と架構試験体P（直交梁はルキャスト）との違いについては、今回の実験ではひび割れの発生に関して、ほとんど差異が認められなかった。

3. 5 コンクリート強度

部材実験および架構実験におけるコンクリート強度は、シリンダー強度（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）で450～497 kgf/cm^2 （現場水中養生4週）、コア強度で492～516 kgf/cm^2 （材齢20～22週）と、ほ

ば計画どおりの値であった。

3. 6 ひび割れの追跡調査

コンクリートのひずみの計測はコンクリート打設後2週間程度で終了したが、ひび割れを確認した直後（材齢7日）からひび割れの挙動をクラックスケールやコンタクトゲージなどを用いて追跡し、最終的にはひび割れ部のコアを採取した。

クラックスケールでの測定結果を図-7に示す。ひび割れを最初に確認した時点でその幅は0.05mm程度

であった。その後徐々にではあるがひび割れ幅が広がり、材齢50日では0.10～0.15mmとなった。一方、コンタクトゲージによる測定は、材齢8日（型枠脱型の翌日）に開始した。1試験体あたり2ヵ所に発生したひび割れが測定区間（14区間、1400mm）内に入るよう測定用チップを取付けた。14区間の内、ひび割れを含む両端部各2区間（200mm）と中央部の10区間（1000mm）の、それぞれの初期値（材齢8日）から材齢80日までの変化量を図-8および表-1に示す。両試験体とも、2本のひび割れで挟まれた中央部（ $\ell 2$ ）が材齢80日で0.15～0.25mm収縮していること、ひび割れを含む両端部2区間（ $\ell 1$, $\ell 3$ ）はほとんど変化していないこと、測定区間の全長（L）が0.19mm収縮していることがわかる。中央部の収縮が単純にひび割れ幅の拡大によるものと考えると測定開始時より約0.1mmひび割れ幅が広がったことになり、クラックスケールによるひび割れ幅の測定結果とほぼ一致する。しかし、実際にひび割れを有する両端部の区間の変化量がほぼ0であることを考えると、柱間隔そのものが縮んでいることが考えられる。つまり、材齢とともに中央部が収縮し、それにより固定が不十分な柱脚部をわずかに回転させたと思われる。この期間ではコンクリートの温度はほぼ外気温に追随していることから、この収縮は温度ひび割れの影響ではなく乾燥収縮が徐々に進行していくことによるものと考えられる。これらから、柱脚が固定されている実際の構造物では今回の実験でのひび割れ幅よりも若干大きな幅のひび割れになる可能性があるといえる。

また、材齢15～16週で、超音波伝播時間の測定によりひび割れ深さの推定を行った。ひび割れが貫通している場合および、ひび割れ幅が小さすぎる場合にはこの手法は適さないので測定結果が必ずしも正確とはいえないが、ひび割れが貫通しているであろうことを非破壊で確認するための一手法として実施した。梁底から300mmの位置ではひび割れ深さの推定はできたが、梁底から

125mmの位置ではひび割れ深さの推定はできなかった。この結果からは、梁断面のおよそ下半分にひび割れが進展し、貫通していると推定された。

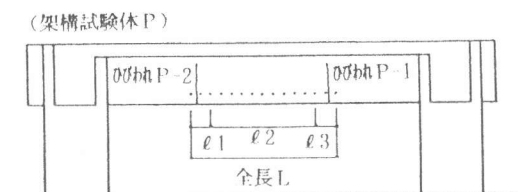


図-8 コンタクトゲージによる測定区間

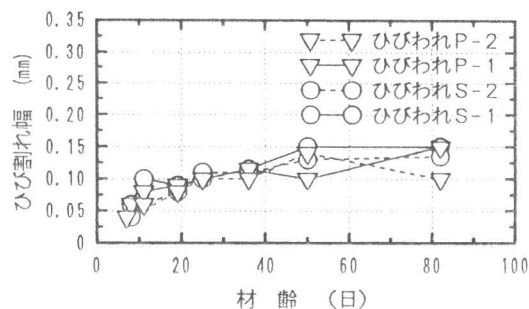


図-7 ひび割れ幅の推移（クラックスケール）

表-1 コンタクトゲージによる測定結果

試験体および測定区間*1		初期値 材齢8日*2	材齢82日	初期値からの 変化量
架構試験体P	ℓ1	200.00	200.02	0.02
	ℓ2	1000.53	1000.28	-0.25
	ℓ3	200.16	200.20	0.04
	全長L	1400.69	1400.50	-0.19
架構試験体S	ℓ1	199.95	199.92	-0.03
	ℓ2	998.96	998.81	-0.15
	ℓ3	200.32	200.32	0.00
	全長L	1399.23	1399.04	-0.19

*1: 測定区間は14区間（1区間100mm、全長1400mm）

*2: 型枠脱型の翌日

3. 7 ひび割れ部のコア採取

梁内部でのひび割れの状況を調べるため、架構試験体 S, P それぞれの 1 ヵ所のひび割れについて材齢 21 週で 2 本のコアを採取した。コア採取に先立ち材齢 17 週で、ひび割れを固定させるために樹脂注入（エポキシ樹脂系低粘度注入剤＋蛍光顔料）を行っている。4 本のコアとも、ひび割れは貫通していたことが注入材の充填状況から確認できた。次に、採取したコアのひび割れ幅を目盛り付きルーペ（最小目盛 0.10 mm、倍率 30 倍）で測定した。その結果を図-9 に示す。コアの採取位置にかかわらずいずれのコアも、表層部より内部のひび割れ幅が若干小さい傾向にあった。これらは、内部では鉄筋による拘束があること、温度変化の影響が表層部より内部の方が小さいこと、表面から乾燥収縮が徐々に進行していることなどによるものと思われる。

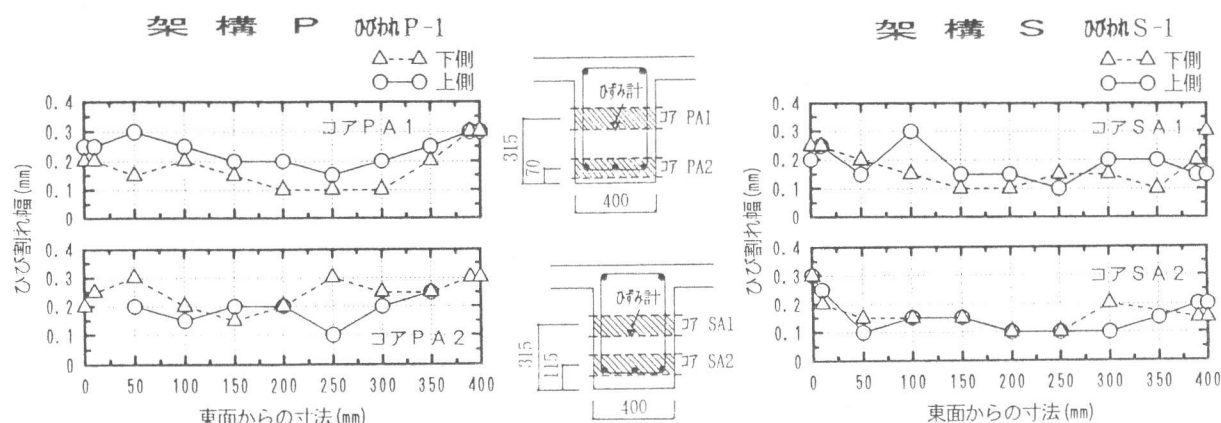


図-9 採取したコアのひび割れ幅 (ルーペ)

4. まとめ

今回の部材実験および架構実験から、以下のような知見が得られた。

- ・ 高強度コンクリートを使用した場所打ちの梁に生じることの多いひび割れは、コンクリートの温度降下時の外部拘束が主な原因となって発生する温度ひび割れであると考えられる。
- ・ ひび割れは梁の内部で発生し、その時点で梁に型枠が存在すればひび割れはコンクリート表面まで到達せず、型枠脱型後、数時間程度で表面に到達する。
- ・ 表面付近でのひび割れ幅は、その後、乾燥収縮により少し拡大する。
- ・ 発生したひび割れは貫通ひび割れであったが、梁の内部でのひび割れ幅は表面付近のひび割れ幅よりも小さかった。

コンクリートの高強度化は将来的にも不可避であると思われるが、それに伴って生じる、温度ひび割れなどの欠陥の発生を少なくすることも重要な課題の一つである。方策の一つとして、コンクリートの低発熱化、部材のプレキャスト化などをより一層進めていく必要があると考えられる。

〔参考文献〕

- 1) 江口 清ほか：高強度鉄筋コンクリート梁の温度ひび割れ測定、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992.8
- 2) 紺野 弘毅ほか：高強度コンクリートの架構におけるひび割れ状況(New RC 実大施工実験#19)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992.8
- 3) 笹原 厚・大谷 博：高強度コンクリートの架構におけるひび割れ測定(New RC 実大施工実験#20)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992.8
- 4) 立松和彦ほか：高強度コンクリートを使用した梁の初期挙動に関する実験的研究(第2)、浅沼組技術研究所報、1994.12