

【論文概要】

第1章 はじめに

1997年1月に日本建築学会標準仕様書 JASS 5 (鉄筋コンクリート工事) が改定され、建築分野では設計基準強度 36N/mm^2 を超えるコンクリートを高強度コンクリートと定義するようになった。その後、鉄筋コンクリート造集合住宅の高層化や長スパン化などが進み、現在では設計基準強度 150N/mm^2 程度までの高強度コンクリートが広く普及するに至っている。

一方、建築物の長寿命化、新たな構造形式への適用といったニーズから、現在では高強度コンクリートに要求される性能は多様化している。建築物の長寿命化を望む建築主からは、高い強度だけではなく、高い耐久性能を持ったコンクリートが求められるようになり、コンクリート充填鋼管構造のような新しい構造形式の施工では、高い強度だけでなく、高い流動性を持ったコンクリートが必要とされている。さらに、昨今の社会的背景から、コンクリートにも環境配慮などに貢献できるような高い付加価値が要求されるようになってきている。

しかしながら、このような多様化したニーズに対応する、高強度かつ様々な高い性能 (高耐久/高流動/高付加価値) を持つコンクリート (以下、高強度・高性能コンクリートと称す) の性能は、これまで蓄積されてきた様々なコンクリートの知見だけでは評価できないことに加え、実際の施工にあたっては、従来の品質管理方法が適用できないこともある。

例えば、高強度化の基本となる力学的性質の観点では、水結合材比が 20% 以下となるような極めて低い領域における構造体コンクリートの強度発現性状に及ぼす水和熱の影響などが未解明で、設計基準強度が 100N/mm^2 を超えるような高強度コンクリートを調査設計する際の構造体強度補正值の合理的な設定などが課題となっていた。また、設計基準強度 150N/mm^2 程度 (圧縮強度 180N/mm^2 程度) までを網羅したコンクリートの力学的性質の知見などがほとんど存在せず、構造設計者が、静弾性係数、ポアソン比、各種強度などを設定することも難しかった。

高い強度とともに高い耐久性能を付与するコンクリートでは、設計基準強度 150N/mm^2 程度までの高強度コンクリートを網羅した中性化抵抗性、長さ変化、凍結融解抵抗性およびアルカリシリカ反応などに関する知見がほとんど存在せず、長期的な外部劣化因子の影響などにより、従来のコンクリートの知見では予測できない重大な不具合が発生するのではないかとこの疑問を払拭できずにいた。また、建築物の長寿命化に伴って重要度が増す、長期的な圧縮クリープ特性や強度発現性状なども未解明であった。このため、これらの劣化などに対する研究データの蓄積や耐久性能の解明が必要であった。

高い強度とともに高い流動性を付与するコンクリートでは、このようなコンクリートに使用する新しい化学混和剤や微粉末などの評価方法が確立していなかった。また、極めて低い水結合材比とした場合のコンクリートポンプによる圧送性能に関する知見なども存在せず、コンクリート充填鋼管構造などに使用する高強度コンクリートを合理的に調査設計できないといった課題があった。

これら高強度・高性能コンクリートの品質管理においても、低水結合材比のコンクリートでの塩化物イオン量の測定方法の確立や、品質管理に用いる供試体の養生方法の確立が課題となっていた。これに加え、各種要因が高強度のコンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす影響などで未解明な部分が多く、適切な圧縮強度試験方法の確立も課題となっていた。

また、これら高強度・高性能コンクリートを適用する鉄筋コンクリート部材は、配筋が過密であることが多く、構造体コンクリート強度を確認するためのコア供試体の採取や、コンクリートを打ち込んだ後の鉄筋のかぶり厚さの調査も難しいため、過密配筋された鉄筋コンクリート部材の品質を、非破壊検査で確認するような手法の確立も必要であった。

さらに、高い強度とともに、高耐久・高流動以外の高い付加価値を付与するというコンクリートでは、一般論として、低炭素化や未利用資源の有効利用などの推進といった環境配慮に関する課題や、打ち放し技術の高度化のような新技術に関する課題は挙げられるものの、明確な提案につながらない状況であった。

本候補論文は、上記のような高強度とともに様々な高い性能 (高耐久/高流動/高付加価値) をもつコンクリートにおける課題と問題を解決するため、図 1 のようにコンクリートを分類し、下記(1)～(6)の研究を行った成果を取りまとめたものである。

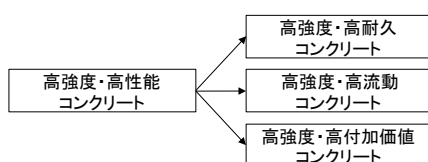


図1 本論文のコンクリートの分類

- (1) 高強度・高性能コンクリートの力学的性質の解明
- (2) 高強度・高耐久コンクリートの耐久性能と長期的な力学的性質の解明
- (3) 高強度・高流動コンクリートの圧送性能の解明
- (4) 高強度・高性能コンクリートの品質管理方法の確立と現場への適用
- (5) 高強度鉄筋コンクリート部材の品質管理方法の確立と現場への適用
- (6) 様々な性能を付与した高強度・高付加価値コンクリートの提案

本論文の構成を整理すると、図2のようになる。本論文は全8章で構成されている。

第1章は序論であり、本論文の背景と目的および研究の全体像について述べている。

第2章では、高強度・高性能コンクリートを利用する場合に基本となる、強度発現性状に及ぼす水和熱の影響の解明、静弾性係数やポアソン比の推定方法の検討、各種の力学的性質の推定方法の提案について述べている。

第3章では、コンクリートに高い強度とともに高い耐久性を付与するという観点から、5年間の促進中性化試験、20年間の乾燥収縮試験、20年間の水中膨張試験、5~10年間屋外暴露した実大模擬部材のコア供試体を用いた凍結融解試験、10年間のアルカリシリカ反応の促進試験、2年間の圧縮クリープ試験、および20年間の実大模擬部材の屋外暴露試験などを行い、高強度・高耐久コンクリートの各種耐久性能と長期的な力学的性質を解明した結果について述べている。

第4章では、高い強度とともに高い流動性を付与するという観点から、高流動コンクリート用化学混和剤の評価方法の提案、モルタルによる結合材の選定方法の提案、およびコンクリートポンプによる圧送実験によって極めて水結合材比が低い高強度・高流動コンクリートの圧送性能を解明した結果について述べている。

第5章では、高強度・高性能コンクリートに使用する微粉末の活性度指数試験に関する提案、極めて低い水結合材比のフレッシュコンクリートの塩化物イオン量を希釈法によって測定する品質管理方法の確立、極めて低い水結合材比での使用するコンクリートおよび構造体コンクリートを強度管理するための供試体の養生方法の確立、各種要因が高強度のコンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす影響の解明と適切な圧縮強度試験方法の確立について述べている。

第6章では、高強度・高性能コンクリートを打ち込んだ高強度鉄筋コンクリート部材の品質管理において、反発度法によって構造体コンクリート強度を推定する方法の確立、および電磁誘導法によって過密配筋された鉄筋のかぶり厚さを推定する方法の確立について述べている。

第7章では、高い強度とともに様々な付加価値を付与するという観点から、副産物系混和材の多量使用による高強度コンクリートの低炭素化や、回収細骨材のような未利用資源の有効利用による環境配慮性能の付与に関する提案、および着色顔料の混入による打ち放し技術の高度化に関する提案について述べている。

第8章では、一連の研究で得られた成果を要約して示している。

本論文は、日本建築学会構造系論文集15編、日本建築学会技術報告集3編、セメント・コンクリート論文集3編、英文Journal2編、コンクリート工学年次論文集2編、コンクリート工学誌2編、日本建築学会大会梗概1編の合計28編の学術論文から構成されている。また、研究背景などを補足説明するため、一部の章に候補者の参考業績論文も示している。

なお、候補者は2021年を含め、過去4回同賞への応募を行っているが、今回の候補論文は、新たな日本建築学会構造系論文集1編を加え、研究を進めたものとなっている。前回の応募時からの業績内容の変化は、現在進めている顔料による打ち放し仕上げの高度化の研究によって第7章の研究をさらに発展させたことである。

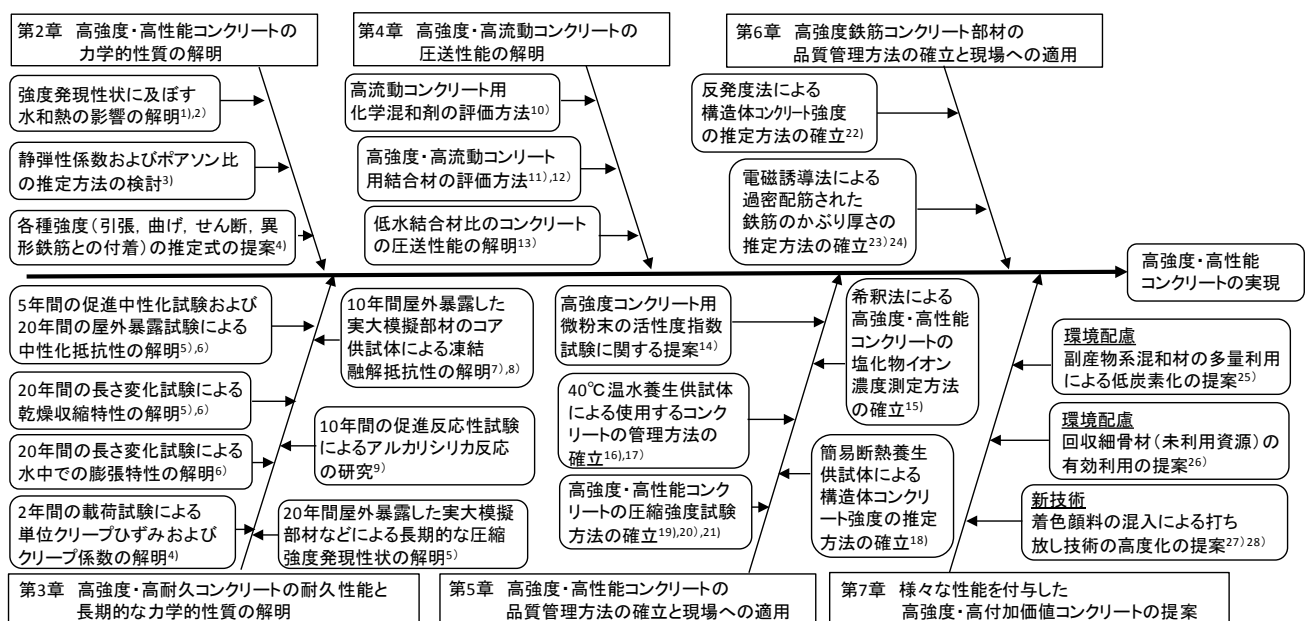


図2 本論文の構成

第2章 高強度・高性能コンクリートの力学的性質の解明

ここでは、高強度・高性能コンクリートを使用する場合の基本となる、強度発現性状に及ぼす水和熱の影響の解明と各種の力学的性質の推定方法の提案について述べる。

2.1 高強度・高性能コンクリートの強度発現性状に及ぼす水和熱の影響の解明

コンクリートの高強度化にはいくつかの方法があるが、基本的な方法としては水結合材比を低くすることが挙げられる。化学混和剤の技術が進歩した昨今では、小さな円柱供試体の高強度コンクリートを製作することはあまり難しくはない。しかしながら、実際の建築物に使用される柱や梁のような大断面部材では、単位結合材量の増大により、打ち込み後の水和熱が部材を高温にするため、供試体と同じようには強度が発現しない。1990年代後半は、単位結合材量の大きい高強度コンクリートでは、打ち込んだ柱などの構造体コンクリートが水和熱で高温になり、長期的には標準養生した供試体よりも大幅に強度低下すると考えられていた。また、当時は、低下する強度の絶対値は、強度が高くなるほど、また構造体コンクリートが経験する最高温度が高くなるほど大きくなると考えられていた。しかしながら、候補者が1990年代に行ってきた実大施工実験の結果では、高強度コンクリートで施工された実大模擬部材のコア供試体は、必ずしも標準養生した供試体と大きな強度差があるわけではなかった。そこで、保有していた約130体の実大模擬部材のデータを、セメントの種類、水結合材比などに分類して詳細に分析した。この結果、水結合材比を20%程度まで低くすると、実大模擬部材のコア供試体と標準養生した供試体の強度差は、強度が高くなるほど、また構造体コンクリートの最高温度が高くなるほど大きくなるわけではないことを明らかにした[論文1]。この理由は、極めて水結合材比が低い領域では、初期材齢での高温による構造体コンクリートの強度増進が大きく、長期的に構造体コンクリートの強度増加が停滞しても、標準養生した供試体と大きな強度差とならないためであった。現在では広く認知された知見であるが、当時は強度が高くなるほど構造体コンクリートと標準養生供試体の強度差が大きくなるという考え方が一般的であったため、このような統計的な研究とは別に、図3に示すようなセメントペーストの微細組織の形成過程による基礎的な研究による裏づけも進め、極めて水結合材比が低い領域では、初期に高温を受けたセメントペーストの積算細孔容積が、長期的にも標準養生したセメントペーストと同程度もしくは小さくなる(強度的に同程度もしくは高くなる)ことを明らかにした[論文2]。この研究成果は、水結合材比が20%以下となる設計基準強度が100N/mm²を超えるような高強度・高性能コンクリートを調合設計する際の構造体強度補正值の設定値の低減につながり、施工性の向上、発熱量の抑制などに大きく寄与したものと考えている。

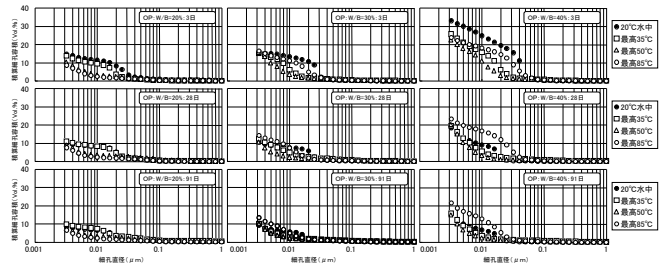


図3 初期に受ける最高温度が低水結合材比のセメントペーストの積算細孔容積に与える影響²⁾

図3に示すようなセメントペーストの微細組織の形成過程による基礎的な研究による裏づけも進め、極めて水結合材比が低い領域では、初期に高温を受けたセメントペーストの積算細孔容積が、長期的にも標準養生したセメントペーストと同程度もしくは小さくなる(強度的に同程度もしくは高くなる)ことを明らかにした[論文2]。この研究成果は、水結合材比が20%以下となる設計基準強度が100N/mm²を超えるような高強度・高性能コンクリートを調合設計する際の構造体強度補正值の設定値の低減につながり、施工性の向上、発熱量の抑制などに大きく寄与したものと考えている。

2.2 高強度・高性能コンクリートの各種力学的性質の推定方法の提案

2.2.1 高強度・高性能コンクリートの静弾性係数とポアソン比の推定方法の検討

ここでは、構造設計者が建築物の変形性能などを把握するのに必要な静弾性係数とポアソン比の値を明らかにするため、315および243ケースのデータを分析した。この結果、圧縮強度180N/mm²までの高強度・高性能コンクリートの静弾性係数であっても、圧縮強度60N/mm²を基準として構成されているJASS 5の推定式によって、概ね±20%の範囲で推定できることを明らかにした。また、ポアソン比は圧縮強度の増加に伴って増加する傾向にあることを明らかにするとともに、推定式を提案した[論文3]。

2.2.2 高強度・高性能コンクリートの各種強度の推定方法の提案

ここでは、構造設計者が設計時に引張強度や曲げ強度などの強度特性値を設定できるようにするため、圧縮強度と引張強度、曲げ強度、せん断強度および異形鉄筋との付着強度との関係について実験的な検討を行った。この結果、圧縮強度180N/mm²程度までの範囲であれば、いずれの強度も圧縮強度の関数で表すことができることを明らかにした。この研究では、圧縮強度から各種強度を推定するための指標として、圧縮強度から各種強度を推定する推定式の提案を行うとともに、圧縮強度から各種強度を簡略的に求める係数などを提案した[論文4]。

以上、第2章の研究では、高強度・高性能コンクリートを使用する場合の基本となる力学的性質について明らかにするとともに、建築物の構造設計に必要な各種強度の推定方法などを提案した。

第3章 高強度・高耐久コンクリートの各種耐久性能と長期的な力学的性質の解明

ここでは、高い強度とともに高い耐久性を付与するという観点から、5年間の促進中性化試験、20年間の乾燥収縮試験、

20年間の水中膨張試験，5～10年間屋外暴露した実大模擬部材のコア供試体を用いた凍結融解試験，10年間のアルカリシリカ反応の促進試験，2年間の圧縮クリープ試験，および20年間の実大模擬部材の屋外暴露試験などを行い，高強度・高耐久コンクリートの各種耐久性能と長期的な力学的性質を解明した結果について述べる。

3.1 5年間の促進中性化による高強度・高耐久コンクリートの中性化速度係数の解明

極めて水結合材比の低い高強度・高耐久コンクリートは6ヶ月間の促進中性化試験や暴露試験では中性化させることができないため，水結合材比40%以下となるような高強度・高耐久コンクリートの中性化速度係数は明らかになっていなかった。そこで，5年間の促進中性化試験を行い，水結合材比40%までの高強度コンクリートの中性化深さの進行過程を明らかにした【論文5】。また，この研究では，低水結合材比であっても，中性化抵抗性に寄与するのは結合材中のポルトランドセメントのみであることも明らかになった。この研究で明らかにした中性化速度係数を基に，水ポルトランドセメント比40%のコンクリート部材を炭酸ガス濃度0.2%の環境で200年間使用すると想定した場合の中性化深さを計算すると，200年後でも中性化深さは13mm程度しか進行しないことなどが計算できる。この研究によって，中性化抵抗性という観点では，高強度・高耐久コンクリートは十分な機能を発揮できることを立証した。なお，実環境下での暴露試験による研究では，圧縮強度80～150N/mm²程度の高強度・高耐久コンクリートの実大模擬部材は，20年間屋外暴露しても，まったく中性化していなかったことを明らかにしている【論文6】。

3.2 20年間の長さ変化試験による高強度・高耐久コンクリートの長期的な乾燥収縮挙動の解明

計画供用期間を長く設定するコンクリート部材では，供用期間中の収縮ひび割れの抑制にも配慮が必要となる。そこで，使用材料や調合の異なる71種類の試験体について，温度20℃湿度60%の環境下で6ヶ月間の長さ変化率を比較した。この結果，水結合材比を低く設定することにより，高強度・高耐久コンクリートの乾燥収縮を抑制できることを明らかにした【論文5】。その後，水結合材比20%程度の高強度・高耐久コンクリートについて，温度20℃湿度60%の環境下で20年間の乾燥収縮挙動を継続的に測定し続けた。この結果，図4に示すように，20年が経過しても，水結合材比20%程度の高強度・高耐久コンクリートの気中での長さ変化率は，一般のコンクリートほど大きくならないことを明らかにした【論文6】。また，長さ変化率の測定結果を質量変化率の測定結果と照らし合わせて検討した結果，低水結合材比の高強度・高耐久コンクリートの長さ変化率が大きくなる理由は，組織が緻密なため，20年間という長期間であっても水の逸散があまり起こらないためであることも明らかにした。この研究によって，乾燥収縮の抑制という観点でも，高強度・高耐久コンクリートは十分な機能を発揮できることを立証した。

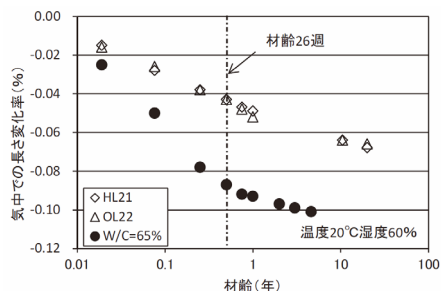


図4 材齢20年までの高強度・高耐久コンクリートの乾燥収縮率（気中での長さ変化率）⁶⁾

3.3 20年間の長さ変化試験による高強度・高耐久コンクリートの長期的な水中膨張挙動の解明

極めて水結合材比の低い高強度・高耐久コンクリートでは，従来は使用されていなかったシリカフェームやエトリングイト系混和材などの比較的新しい材料も使用される。そこで，このような混和材を使用した水結合材比16%および22%の高強度・高耐久コンクリートの水中膨張挙動についても20年間継続的に測定し続けた。この結果，20年が経過しても，シリカフェームやエトリングイト系混和材などを使用した水結合材比16%および22%の高強度・高耐久コンクリートの水中での長さ変化率は，あまり大きくならないことを明らかにした【論文6】。また，むしろシリカフェームやエトリングイト系混和材などを使用すると，膨張は抑制されるという傾向も確認できた。この研究によって，水中膨張の抑制という観点でも，高強度・高耐久コンクリートは十分な機能を発揮できることを立証した。

3.4 10年間屋外暴露した実大模擬部材のコア供試体による高強度・高耐久コンクリートの凍結融解抵抗性の解明

研究当初から，空気量を小さく設定することの多い高強度・高耐久コンクリートでは，凍結融解抵抗性が確保できないかもしれないという説があった。そこで，空気量を2%程度とした水結合材比20～50%のコンクリートの凍結融解抵抗性を実験的に検討した。この結果，水結合材比が大きい場合や，単位水量が大きい（コンクリートとしての空気量が同等なので，セメントペースト中の空気量が相対的に少なくなる）場合に凍結融解抵抗性が低下するものの，水結合材比が低くなると，空気量が2%であっても十分な凍結融解抵抗性が確保できることが明らかになった【論文7】。その後，硬化後の乾湿繰り返しや，DEF (Delayed ettringite formation) のような特殊な劣化が原因でマイクロクラックが多数発生した高強度・高耐久コンクリートでは凍結融解抵抗性が低下するという指摘を受け，関東エリアで10年間屋外暴露した実大模擬部材からコア供試体を採取し，凍結融解試験を実施した。この結果，10年屋外暴露した実大模擬部材の構造体コンクリートであっても，600サイクルまでの凍結融解によって相対動弾性係数が低下しないことを明らかにした【論文8】。この研究に

よって、凍結融解抵抗性という観点でも、高強度・高耐久コンクリートは十分な機能を発揮できることを立証した。

3.5 10年間の促進反応性試験による高強度・高耐久コンクリートのアルカリシリカ反応の研究

研究当初から、単位結合材量が大い低水結合材比の高強度・高耐久コンクリートでは、コンクリート中の水溶液のアルカリ濃度が高くなり、結果としてアルカリシリカ反応が起こりやすくなるのではないかと懸念があった。そこで、産地によっては無害ではないものもある安山岩系の骨材を用いた高強度・高耐久コンクリートの試験体を作製し、本来、40℃とした槽内で6ヶ月間の促進養生を行う JASS 5N T-601（コンクリートの反応性試験方法）による反応性試験に準拠し、40℃で、10年間、試験体を促進膨張させた。この結果、10年間の促進試験でも、高強度・高耐久コンクリートでは極端な膨張などは起こらなかったことを明らかにした[論文 9]。この研究では、低水結合材比の高強度・高耐久コンクリートでも、アルカリ濃度などが問題となる可能性は低いことを明らかにしたと考えている。ただし、アルカリシリカ反応の抑制については、コンクリートの水結合材比などよりも骨材自体の選定のほうが重要であるため、無害と判定される骨材を使用することが前提であると考えている。

3.6 高強度・高耐久コンクリートの圧縮クリープ特性の解明

高強度・高耐久コンクリートの主要な適用先である超高層鉄筋コンクリート造建築の下層階の柱では、長期的な圧縮クリープによるひずみも大きな問題となる。そこで、長期的な載荷実験による圧縮クリープ特性の解明も行った。この結果、圧縮強度 180N/mm²程度までの範囲であれば、図 5 に示すように、圧縮強度の増加とともに単位クリープひずみ、およびクリープ係数が減少することを明らかにした[論文 4]。すでに、超高層鉄筋コンクリート造住宅では計画供用期間を 200 年と設定しているものも建設されており、長期的な圧縮クリープの予測において、極めて重要な知見を示せたと考えている。

3.7 高強度・高耐久コンクリートの長期的な強度発現性状の解明

建築物の長期的な性能保証の観点では、高強度・高耐久コンクリートの長期的な強度発現性状の解明も重要な課題であった。そこで、高強度・高耐久コンクリートで作製した 20℃封かん養生した供試体や、屋外暴露した実大模擬部材を 20 年間保存し、長期的な強度発現性状を検討した[論文 6]。この結果、図 6 に一例を示すように、20 年間、20℃封かん養生を行った供試体や、屋外暴露した実大模擬部材は、いずれも圧縮強度が向上し続けていたことを明らかにした。なお、20 年間 20℃封かん養生で保管した供試体の圧縮強度試験後の破片を X 線回折によって分析したところ、骨材の成分とエトリングイト系混和材に起因する僅かなエトリングイト以外のピークは確認されず、将来的に問題となりそうな生成物なども確認されなかった。

以上、第 3 章の研究では、計画供用期間の長い建築物に利用できる高強度・高耐久コンクリートの各種耐久性能と長期的な力学的性質を解明した。

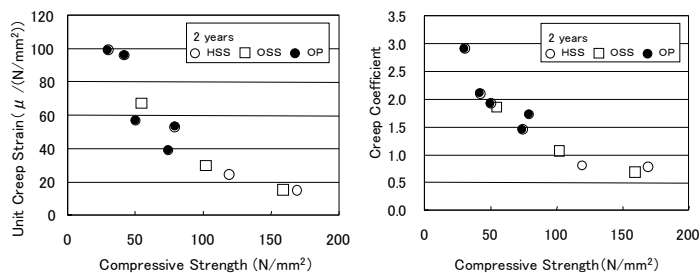


図 5 圧縮クリープ試験による単位クリープひずみとクリープ係数 (材齢 2 年, 軸力比 1/3σ)⁴⁾

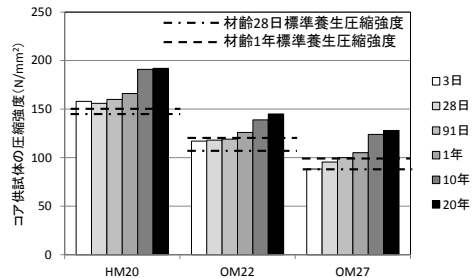


図 6 材齢 20 年までの実大模擬部材の長期的な圧縮強度発現性状⁶⁾

第 4 章 高強度・高流動コンクリートの圧送性能の解明

ここでは、高い強度とともに高い流動性を付与するという観点から、高流動コンクリート用化学混和剤の評価方法の提案、モルタルによる結合材の選定方法の提案について述べる。また、コンクリートポンプによる圧送実験を行い、極めて水結合材比が低い場合の高強度・高流動コンクリートの圧送性能を解明した結果について述べる。

4.1 高流動コンクリート用化学混和剤の評価方法の提案

比較的強度の低い領域であれば、結合材を普通ポルトランドセメントのみとした高強度・高流動コンクリートとしても、コンクリート充填鋼管構造の柱などに問題なく圧入施工できる調査設計を行うことができる。ただし、このような調査で粘性低下による材料分離が懸念される場合には、フレッシュコンクリートの粘性を補うことのできる増粘剤含有高性能 AE 減水剤などを用いる必要がある。しかしながら、増粘剤含有高性能 AE 減水剤は比較的新しい商品であり、現状ではこのような新しい化学混和剤の増粘効果を評価する方法が存在しない。そこで、増粘剤含有高性能 AE 減水剤を製造している全 7

メーカーの商品を取り寄せ、各商品の性能を確認するとともに、増粘剤含有高性能 AE 減水剤の粘性を評価するための JP 漏斗流下試験による評価方法を提案した[論文 10]。増粘剤含有高性能 AE 減水剤は、将来的に普及が期待されている新しい混和材料であり、今後、提案した評価方法も利用されるものと期待している。

4.2 高強度・高流動コンクリート用結合材の評価方法の提案

高強度・高流動コンクリートの水結合材比を低くしていくと、フレッシュコンクリートの粘性が増大し、スランプフローで管理するような高流動コンクリートとするだけではコンクリートポンプでの圧送性能などを確保することが難しくなる。このような施工性の低下を回避するには、低水結合材比の高強度・高流動コンクリートに用いる結合材の構成から検討する必要がある。そこで、いくつもの結合材を短時間で試験することを可能とする簡易なモルタル試験を提案した[論文 11]。この試験では、容器に入れたモルタルに重錘付きの円筒棒を沈めるだけで、モルタルの粘性特性を概ね把握することができる。同論文では、この試験によってシリカフェームによるモルタルの粘性抑制効果が明確に表せることを明らかにしている。なお、論文 12 では、この試験によって選定した結合材を用いた水結合材比 30%の高強度・高流動コンクリートを高さ 90m のコンクリート充填鋼管構造の柱に圧入施工した結果、一般的なコンクリートポンプで問題なく圧入できることを立証している。

4.3 極めて水結合材比が低い場合の高強度・高流動コンクリートの圧送性能の解明

コンクリート充填鋼管構造の普及とともに、より高い設計基準強度の高強度・高流動コンクリートが利用されるようになった。そこで、設計基準強度 150N/mm²程度に相当する水結合材比 15%の高強度・高流動コンクリートの圧送性能を、コンクリートポンプによる圧送実験によって検証した。この研究では、低水結合材比の高強度・高流動コンクリートの圧送時の管内圧力損失などを明らかにするとともに、回転翼粘度計による測定によって、圧送後の高強度・高流動コンクリートの粘性が大幅に低下することなどを解明した[論文 13]。

以上、第 4 章の研究では、締固めのできないコンクリート充填鋼管構造などにも利用できる高強度・高流動コンクリートの使用材料の評価方法の提案と、圧送性能の解明を行った。

第 5 章 高強度・高性能コンクリートの品質管理試験方法の確立と現場への適用

ここでは、一般的な品質管理試験方法を適用できない高強度・高性能コンクリート用の各種品質管理試験方法を確立した成果を、使用材料の管理、フレッシュコンクリートの受入れ検査での管理、および圧縮強度試験の実施までの時系列で述べる。

5.1 高強度コンクリート用微粉末の活性度試験方法に関する検討

水結合材比の低い高強度・高性能コンクリートでは、シリカフェームのような微粉末の利用が必須となる[参考業績論文 1]。このような比較的新しい高強度・高性能コンクリート用材料の品質試験は、制定からの時間もあまり経過しておらず、試験方法の過程の中に未解決な課題もあった。シリカフェームの品質の評価では、セメント粒子間を埋めるマイクロファイラー効果に加え、ポゾラン反応などにも期待した活性度指数（強度寄与率）が重要な指標となるが、輸出国では活性度指数の確認までは行わないことが多い。そこで、JIS A 6207（コンクリート用シリカフェーム）では、品質の項目に活性度指数を定め、国内に流通するシリカフェームの活性度指数の安定をはかっている。しかしながら、現行の活性度指数試験では、使用できる化学混和剤の種類に幅があり、化学混和剤の種類が変わると試験結果が安定しないという指摘もあった。そこで、系統的な検討により、化学混和剤の種類などの各種試験要因が活性度指数試験結果に及ぼす影響を明らかにした[論文 14]。基本的には現行の活性度指数試験でシリカフェームの活性度指数を把握できると考えているが、連続的な受入れに対しての品質管理を行う場合には、試験に用いる化学混和剤の種類や銘柄を同一のものとするべきと考えている。

5.2 希釈法による高強度・高性能コンクリートの塩化物イオン濃度試験方法の確立

極めて水結合材比の低い高強度・高性能コンクリートでは、フレッシュコンクリートから発生するブリーディング水が少なく、既存の塩化物イオン測定器で測定するろ液などが採取できないことも多い。そこで、採取したコンクリートに純水を加え、希釈したコンクリートから試験用のろ液を採取して塩化物イオン濃度を測定する試験方法を提案した[論文 15]。なお、使用する測定器としては、高強度・高性能コンクリートに含まれる化学混和剤の影響を受けにくい電量滴定法およびモール法が、高い測定精度で塩化物イオン濃度を測定できることを明らかにした。

5.3 40℃温水養生供試体による使用するコンクリートの管理方法の確立

一般に、建設現場で受け入れた使用するコンクリートの圧縮強度の試験や、プレキャスト工場でのプレキャスト部材に用いるコンクリートの圧縮強度の試験では、標準養生した供試体を使用する。また、この供試体の圧縮強度試験結果と構造体強度補正值を使用し、構造体コンクリートの強度管理も兼ねることができる。しかしながら、低水結合材比の高強度・高性能コンクリートでは、部材に打ち込まれた構造体コンクリートの圧縮強度が標準養生した強度管理用供試体の圧縮強

度を上回ることがあるため、標準養生した供試体の試験結果を二つのコンクリートの強度管理に兼用できないケースが存在する。そこで、実大模擬部材での試験結果を用いて、どのようなケースで部材に打ち込まれた構造体コンクリートが標準養生した供試体の圧縮強度を上回るのかを検討した。この結果、上記のような現象は、水結合材比が低い領域になると生じるだけでなく、水和の遅い低発熱系のセメントを用いた場合には、より高い水結合材比で、上記のような現象が生じることを明らかにした。次に、これらの知見を踏まえた上で、30℃、40℃および50℃の温水で強度発現を促進した供試体の圧縮強度と構造体コンクリート強度の関係などを実験的に検証し、構造体コンクリート強度を若干上回るような強度を発現する供試体の作製方法について研究した。この研究により、40℃の温水で強度発現を促進した供試体によって、合理的に構造体コンクリート強度を管理する方法を提案した[論文 16]。さらに、提案した方法を使用して、連続的に製造した設計基準強度 150N/mm²の高強度・高性能コンクリートの強度管理を行ったところ、構造体コンクリート強度を模擬した簡易断熱養生供試体の圧縮強度よりもやや高めな安定した圧縮強度が得られることを明らかにした[論文 17]。

5.4 簡易断熱養生供試体による構造体コンクリートの管理方法の確立

簡易的な断熱養生槽内で、強度管理用供試体に打ち込まれたコンクリートと類似の温度履歴を与え、構造体コンクリートに近い圧縮強度の供試体を作製する方法の検討も進めた。候補者は、日本建築学会賞（技術）を頂くまでに、発熱体である供試体を1個ずつ断熱するだけで、設計基準強度 60～100N/mm²程度のコンクリートの構造体コンクリート強度と概ね似た強度の供試体を作製することができることを提案[参考業績論文 2]していたが、その後も、より高い強度のコンクリートに用いることのできる養生槽の改良について研究を続けた。その結果をもとに、単位結合材量が大きく、構造体コンクリートが水和熱でより高温になる設計基準強度 150N/mm²程度の高強度・高性能コンクリートにも対応できるように、発熱体である供試体をいくつか隣接させた状態で断熱する改良型の簡易断熱養生槽を提案した[論文 18]。

簡易断熱養生供試体の研究は、JASS5 T-606（簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度の推定方法）の制定などにも貢献し、多くの実務で利用されている。

5.5 高強度・高性能コンクリートの圧縮強度試験方法の確立

一般のコンクリートよりも強度の高い高強度・高性能コンクリートでは、圧縮強度試験に関連する様々な要因が試験精度に影響することが懸念された。そこで、供試体の運搬、載荷面の整形、および試験時の供試体の設置位置の誤差などが試験結果に及ぼす影響の解明を行い、高強度・高性能コンクリートの適切な圧縮強度試験方法を確立することとした。

現場で採取された高強度・高性能コンクリートの供試体は、採取した日に試験機関に車両運搬されることも多い。そこで、採取直後の運搬による振動が、高強度・高性能コンクリートの供試体の圧縮強度に及ぼす影響について、体系的な実験による検証を行った。この結果、車両による比較的小さな運搬振動であっても、振動機による再振動のような影響が試験結果に生じることを明らかにした[論文 19]。この研究により、より正しい試験結果を得るには、成形直後の供試体を振動の少ない環境で保管すべきであることなども明確になった。実務では、採取当日の運搬などは控えるべきと考えられる。

また、極めて高い強度の高強度・高性能コンクリートでは、供試体の載荷面の平面度が圧縮強度試験結果に及ぼす影響を解明することも重要であった。そこで、水結合材比 15～27%の5種類のコンクリートをレディーミクストコンクリート工場で練り混ぜ、それぞれ48個の供試体を採取して、供試体の載荷面の平面度が圧縮強度試験結果に及ぼす影響を検討した。この結果、圧縮強度が高くなるにつれ、供試体載荷面の平面度が圧縮強度試験結果に及ぼす影響が顕著になることを明らかにした[論文 20]。なお、この研究では研磨機によって研磨した約120個の供試体の載荷面の平面度も測定しており、適切に整形した研磨面では、JIS A 1132（コンクリート強度試験用供試体の作り方）の平面度の規定を上回ることはないことも明らかにした。したがって、高強度・高性能コンクリートの供試体では、上下の載荷面の両面を研磨処理し、より正確な試験結果を得るべきと考えられる。

さらに、極めて高い強度の高強度・高性能コンクリートでは、圧縮強度試験機に設置した供試体の偏心が圧縮強度試験結果に及ぼす影響の解明も重要であった。より正確な試験結果を得るためには、試験員が圧縮強度試験機に正しく試験体を設置する作業は極めて重要と考えられたが、当時はこれを明確なデータをもとに説明することができなかった。そこで、圧縮強度 20～180N/mm²の5種類のコンクリートについて、供試体の設置位置が圧縮強度試験機の軸から最大9mmずれた場合までの圧縮強度試験結果の低下率と、そのときの試験体の変形状態について実験的に検証した。この結果、偏心荷重を受けた供試体の変形状態や強度低下は理論的にも説明できること、また、強度が高くなるにつれ、供試体の偏心が圧縮強度試験結果に及ぼす影響が顕著になることを解明した[論文 21]。この研究では、高強度・高性能コンクリートの圧縮強度試験を行う際には、供試体の偏心には十分に留意すべきであることを明らかにした。

以上、第5章の研究では、従来の試験方法を適用できない高強度・高性能コンクリート用の品質管理試験方法を確立するとともに、実際の建設現場の品質管理などに適用した。

第6章 高強度鉄筋コンクリート部材の品質管理方法の確立と現場への適用

ここでは、高強度・高性能コンクリートを打ち込んだ鉄筋コンクリート部材の品質管理において、構造体コンクリート強度を推定する方法および過密配筋された鉄筋のかぶり厚さを推定する方法について研究した成果を述べる。

6.1 反発度法による構造体コンクリート強度の推定方法の提案

5.4のように、あらかじめ特別な養生を行った供試体を作製しておけば、打ち込まれた構造体コンクリート強度を評価することも可能である。しかしながら、このような供試体の製作個数には限りがあるため、非破壊試験によって、直接、鉄筋コンクリート部材の圧縮強度を推定するような手法も必要であった。試験機器の普及状況から考えれば、推定手法はリバウンドハンマーを用いた反発度法が理想であったが、当時の一般論として、リバウンドハンマーによる反発度測定値は、コンクリートの圧縮強度が高くなるにつれて感度が落ちるため、設計基準強度 150N/mm²程度の高強度コンクリートへの適用は難しいとされていた。実際に実験を行ってみると、高強度領域での反発度測定値は強度の増加に対してやや緩慢になるものの、圧縮強度 200N/mm²程度までであれば圧縮強度の推定が可能であることなどが明らかになった。ただし、単純な推定式のみでの圧縮強度の推定では精度の向上は期待できないため、円柱供試体を用いた圧縮強度の補正方法なども含め、反発度法による高強度・高性能コンクリートの構造体コンクリート強度の評価方法を提案した[論文 22]。

6.2 電磁誘導法による過密配筋された鉄筋のかぶり厚さの推定方法の提案

鉄筋コンクリート部材の品質評価としては、鉄筋のかぶり厚さも重要になる。JASS 5 T-608(電磁誘導法によるコンクリート中の鉄筋位置の測定方法)の制定にあわせ、電磁誘導法によって過密配筋された高強度プレキャストコンクリート柱部材の鉄筋のかぶり厚さを測定した場合の推定精度などを検証した。この結果、中子筋によってせん断補強筋が複数重なる部分では、鉄筋のかぶり厚さの推定値が実際よりも小さく評価されることなどが明らかになった。この傾向を室内試験などで再検証したところ、小さめに評価された値には一定の規則性があることも確認できた。そこで、中子筋が存在するような位置を測定した場合の測定値の補正方法について提案した[論文 23] [論文 24]。

以上、第6章の研究では、高強度・高性能コンクリートを打ち込んだ鉄筋コンクリート部材の品質管理試験方法を確立するとともに、実際の建設現場の品質管理などに適用した。

第7章 様々な性能を付与した高強度・高付加価値コンクリートの提案

ここでは、高い強度とともに様々な付加価値を付与するという観点から、低炭素化や未利用資源の有効利用による環境配慮性能の付与に関する提案および着色顔料の混入による打ち放し技術の高度化に関する提案について述べる。

7.1 環境配慮を目指した高強度・高付加価値コンクリートの検討

環境配慮の観点から高強度コンクリートに高付加価値を付与させる研究としては、副産物系混和材の利用による低炭素化、副産物系骨材の利用による未利用資源の有効利用などに取り組んでいる。

低炭素化に関する研究では、普通ポルトランドセメントを使用した設計基準強度 36N/mm²の梁を、副産物置換率 70%まで向上させた結合材を用いた設計基準強度 80N/mm²の高強度・高付加価値コンクリートに置き換えることで、図7のように断面の縮小化をはかれるとともに、表1のように材料起因のCO₂排出量を2/3程度に抑制できることを明らかにしている[論文 25]。

また、未利用資源の有効利用に関する研究では、昨今 JIS 化した回収骨材の利用の可能性を研究している。例えば、回収細骨材の物性は原骨材に比べ、微粒分が少なくなる傾向にあることを明らかにしたが[論文 26]、粉体量の多い高強度コンクリートでは、フレッシュコンクリートの粘性抑制の観点から、細骨材の微粒分の減少はむしろ理想的な条件であると考えている。現在までの実験では水結合材比 40%程度の高強度・高付加価値コンクリートの実験に留まっているが、戻りコンクリートから洗い出して回収した回収骨材の物性そのものは原骨材とそれほど変わらないことから、より水結合材比の低い高強度・高付加価値コンクリートへの適用についても十分な可能性があると考えている。

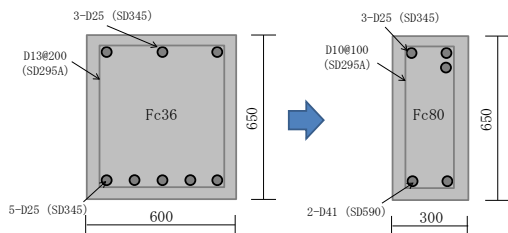


図7 研究対象とした梁断面の変更²⁵⁾

表1 研究対象とした梁のCO₂排出量抑制効果²⁵⁾

	Fc (N/mm ²)	CPL 置換率 (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
				OP	CPL-H	砕石	砕砂	
原設計	36	0	45.4	375	0	924	836	293.2
実施設計	80	70	20	247.5	577.5	891	514	209.5

計算用CO₂排出量 (kg/t)

OP: 766.6, CPL-H: 26.5(スラグで代用), 砕石: 2.9, 砕砂: 3.7

7.2 着色顔料の混入による打ち放し技術の高度化を目指した高強度・高付加価値コンクリートの検討

極めて水結合材比の低い高強度コンクリートを利用すれば、部材断面の小さいスレンダーな柱を実現することも可能である[参考業績論文 3] [参考業績論文 4]。断面を縮小化した柱では、断面増加の要因となる仕上げ材などを施さず、高強度コンクリートの打ち放し面をそのまま仕上げに使えることが理想である。しかしながら、一般的な高強度コンクリートの色をそのまま使えば、柱の色はすべて灰色になることになり、内装などでの意匠的な自由度は限られる。また仮に、薄塗りの塗装仕上げまでを許容したとしても、継続的なメンテナンスは必要となる。そこで、高付加価値の要素の一つとして、着色顔料の混入による打ち放し技術の高度化を進めた[参考業績論文 5]。この結果、白色ポルトランドセメントをベースとした水結合材比 20%の着色モルタルで、圧縮強度 140N/mm² 程度の高強度が得られるとともに、長期的な変色の少ない綺麗な発色を得ることが可能なことを明らかにした[論文 27]。また[論文 28]では、長期的な変色を考慮しつつ、合理的な色彩に着色するための顔料置換率の設計方法について図8のような例を示しながら提案を行った。将来的に、色の選べる高強度鉄筋コンクリートの細柱などが活用できるようになれば、空間の自由度とともに、内装の色彩の自由度も上がるのではないかと期待している。

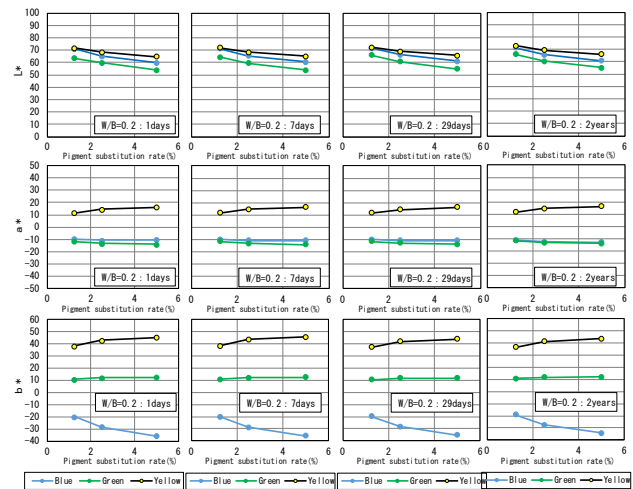


図8 材齢の変化に伴う顔料置換率とモルタルの色彩値の関係 (水結合材比 20%)²⁸⁾

以上、第7章の研究では、社会的なニーズなどに対応できる高強度・高付加価値コンクリートの方向性として、副産物系混和材の多量利用による低炭素化や、未利用資源 (回収細骨材) の有効利用による環境配慮性能の付与に関する提案および着色顔料の混入による打ち放し技術の高度化に関する提案を行った。

第8章 まとめ

本論文では、候補者が高強度・高性能コンクリートの性能評価と品質管理方法に関して行ってきた一連の研究について取りまとめた。本論文の一部は、日本建築学会の高強度コンクリート施工指針 (案)・同解説、暑中コンクリートの施工指針・同解説、コンクリート充填鋼管構造設計施工指針、高強度コンクリートの技術の現状 (2009)、日本コンクリート工学会のコンクリート技士・主任技士研修テキストにも紹介されており、新しい事象を発見するとともに、高強度・高性能コンクリートを利用する多くの技術者に貢献してきたと考えている。また、第3章で示した圧縮クリープ特性の研究は、JIS A 1157 (コンクリートの圧縮クリープ試験方法) の制定、第5章で示した微粉末の評価方法の研究は JIS A 6209 (コンクリート用火山ガラス微粉末) の制定、第5章で示した簡易断熱養生供試体の研究は JASS5 T-606 (簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度の推定方法) の制定にも貢献し、実用的価値を認めて頂くとともに、社会的にも貢献することができたと考えている。今後も、高強度・高性能コンクリートの品質の向上に貢献できる研究を続け、コンクリート技術の発展の一助となることができればと考えている。

【業績論文】

- 1) 陣内 浩・榊田佳寛・早川光敬・並木 哲：高強度コンクリートの構造体と標準養生供試体の強度差に及ぼす要因，日本建築学会構造系論文集，Vol. 67，No. 562，pp. 1～7，2002. 12
- 2) 陣内 浩・黒岩秀介・早川光敬：初期に高温履歴を受ける高強度セメント硬化体の強度発現性状と微細構造，日本建築学会構造系論文集，Vol. 66，No. 542，pp. 39～46，2001. 4
- 3) 陣内 浩・榊田佳寛・早川光敬・並木 哲：180N/mm²クラスまでの高強度コンクリートの圧縮力学特性，セメント・コンクリート論文集，No. 57，pp. 421～427，2004. 2
- 4) 陣内 浩・榊田佳寛・早川光敬・並木 哲：180N/mm²クラスまでの高強度コンクリートの各種強度と長期力学特性，セメント・コンクリート論文集，No. 57，pp. 428～435，2004. 2
- 5) 陣内 浩・並木 哲・黒岩秀介・渡邊悟士：高強度コンクリートの長期的な長さ変化と中性化に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol. 70，No. 594，pp. 9～15，2005. 8
- 6) 陣内 浩・黒岩秀介・並木 哲・早川光敬：材齢 20 年における圧縮強度 80～180N/mm² 級の高強度コンクリートの諸物性，日本建築学会構造系論文集，Vol. 81，No. 727，pp. 1373～1382，2016. 9

- 7) 陣内 浩・黒羽健嗣・並木 哲・後藤和正：超高強度コンクリートによる柱構造体の強度特性および耐久性の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp.1055～1061, 1995.6
 - 8) 陣内 浩・坂井悦郎・黒岩秀介・並木 哲：超高強度コンクリートの長期耐久性能に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.59, pp.390～396, 2006.2
 - 9) 陣内 浩・並木 哲・黒岩秀介・山本佳城・渡邊悟士：超高強度コンクリートの長期アルカリシリカ反応性，日本建築学会学術講演梗概集 DVD. 材料施工，pp.569～570, 2016.8
 - 10) 陣内 浩・黒羽健嗣・並木 哲・後藤和正：超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.255～261, 1994.6
 - 11) Hiroshi JINNAI, Shusuke KUROIWA, Kazumasa GOTO and Mitsutaka HAYAKAWA, Construction Record of High-rise Buildings -Applications of High-strength CFT Structures-, International Journal of Steel Structures, Vol.5, No.4, pp.407～412, 2005.12
 - 12) 寺内利恵子・早川光敬・陣内 浩・黒岩秀介：超高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.72, No.622, pp.25～31, 2007.12
 - 13) 陣内 浩：超高強度コンクリート用微粉末のモルタルによる活性度指数試験結果の再現性に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，Vol.85, No.775, pp.1113～1121, 2020.9
 - 14) 陣内 浩・小泉信一・鹿毛忠継：増粘剤含有高性能 AE 減水剤の性能に関する基礎的研究，日本建築学会技術報告集，第26巻，第63号，pp.424～427, 2020.6
 - 15) 寺内利恵子・早川光敬・小山善行・陣内 浩・黒岩秀介：希釈法による高強度コンクリートの塩化物イオン測定方法の研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.72, No.614, pp.17～20, 2007.4
 - 16) 寺内利恵子・早川光敬・陣内 浩・渡邊悟士：高強度コンクリートの製造管理に用いる供試体の試験材齢と養生方法に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.73, No.633, pp.1899～1906, 2008.11
 - 17) 陣内 浩・寺内利恵子・小浜忠夫・服部敦志：設計基準強度 150N/mm²までの高強度プレキャストコンクリートの性能評価と品質管理，コンクリート工学，Vol.46, No.7, pp.24～29, 2008.7
 - 18) Hiroshi JINNAI, Shusuke KUROIWA, Satoshi WATANABE and Satoru NAMIKI, Adiabatic Curing Method for Estimating 91-Day Strength in Structure with 150MPa Concrete, Journal of Advanced concrete technology, Vol.5, No.2, pp.161～170, 2007.6
 - 19) 小山善行・早川光敬・陣内 浩・中村光男：車両運搬による材齢初期の振動が高強度コンクリートの供試体の圧縮強度に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.78, No.692, pp.1665～1672, 2013.10
 - 20) 小山善行・早川光敬・陣内 浩・中村光男：超高強度コンクリート供試体の載荷面の平面度と圧縮強度の関係に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.75, No.649, pp.475～481, 2010.3
 - 21) 小山善行・早川光敬・陣内 浩・中村光男：偏心荷重が超高強度コンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.77, No.675, pp.669～677, 2012.5
 - 22) 陣内 浩・渡邊悟士・山本佳城・吉田 泰・早川光敬：高強度コンクリートの圧縮強度推定における反発度法の適用性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.78, No.683, pp.9～16, 2013.1
 - 23) 陣内 浩・辻谷 薫・吉田 泰・中村光男・加藤 圭・佐藤貢一・飯島真人・並木 哲：電磁誘導法による鉄筋のかぶり厚さ測定装置の基本性能に関する実験的検討，日本建築学会技術報告集，第16巻，第34号，pp.855～860, 2010.10
 - 24) 陣内 浩・辻谷 薫・吉田 泰・中村光男・加藤 圭・佐藤貢一・飯島真人・並木 哲：電磁誘導法による鉄筋のかぶり厚さの測定精度と補正法に関する実験的検討，日本建築学会技術報告集，第16巻，第34号，pp.861～866, 2010.10
 - 25) 陣内 浩・加藤雅樹・立山香織・近藤憲二：主要構造部材を環境配慮型コンクリートで構築した建築物の実現と CO₂削減効果，コンクリート工学，Vol.52, No.6, pp.528～533, 2014.6
 - 26) 陣内 浩・鈴木澄江・榊田佳寛・棚野博之・鹿毛忠継：回収した細骨材を用いたモルタルに関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.84, No.756, pp.129～137, 2019.2
 - 27) 陣内 浩・小山善行：顔料を用いた水結合材比の異なるモルタルに関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.84, No.765, pp.1367～1375, 2019.11
 - 28) 陣内 浩：顔料の使用量が着色されたモルタルの色に与える影響に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.86, No.782, pp.533～543, 2021.4
- *なお、業績論文リストに関連する【参考業績論文】は各章に添付している。