

氏名	ないとう ひではる 内藤英晴
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)土木工学専攻
学位論文題目	コンクリート充填型合成構造への高流動コンクリートの適用に関する研究
指導教官	東北大学教授 三浦 尚
論文審査委員	主査 東北大学教授 三浦 尚 東北大学教授 岸野 佑次 東北大学教授 鈴木 基行

論文内容要旨

1. まえがき

第二次大戦後の社会資本整備に伴ってコンクリート建造物の建設も目覚ましい勢いで増加してきた。しかし、1980年代初頭になるとコンクリート建造物の早期劣化が社会問題としてクローズアップされた。この背景には、高齢化に伴う熟練作業員の不足や、コンクリート建造物の大型化とコンクリートポンプ工法の普及に伴うコンクリートの大量打設化などにより、十分な打込みや締固めが行われなかったことがあり、これがコンクリート建造物の品質低下を招いたと言える。

このことから、1980年代後半から人手に頼らない「締固め不要の自己充填コンクリート」として高流動コンクリートの開発が進められてきた。高流動コンクリートは、締固めを行わずに型枠内や鉄筋周囲に充填できる「自己充填性」を目的として開発されてきている工法であるが、現在のところ高流動コンクリートは一般に普及するには至っていない。これには、従来のコンクリートに比べて、高流動コンクリートはコスト的に競合できる状態ではないこと、現在の施工システムには高流動コンクリートを適合させにくいこと、等の理由が挙げられる。

しかし、このような高流動コンクリートにとって不利な面を補い、高流動コンクリートの持つ高い自己充填性という特徴を積極的に活かすことにより、コスト的にも品質的にも従来コンクリートを用いる場合より優れた建造物を建設する機会も徐々に増加してきている。そのような建造物の一例として、サンドイッチ構造の沈埋トンネルやコンクリート充填鋼管柱(CFT:Concrete Filled Tube)といった、鋼とコンクリートとの合成構造が挙げられる。

沈埋トンネルのサンドイッチ構造では、周囲を鋼板に囲まれた密閉空間内にコンクリートを充填するために、締固めを行えず完成後も充填状況を確認できない場合が多い。また、補剛材や鉄筋が過密に配置される場合も想定され、通常のコンクリートでは十分に充填できないと考えられる。そのため、充填性に優れた高流動コンクリートはサンドイッチ構造に最適なものと言え、すでに神戸港島沈埋ト

ンネルや大阪南港沈埋トンネルの一部において採用されている。今後、沈埋トンネルの建設においては高流動コンクリートを用いたサンドイッチ構造がますます採用されるものと思われる。

また、1995年1月に起きた兵庫県南部地震により、構造物の耐震性がより重要視され、同地震で大きな被害を受けた橋脚や建築構造物の柱部材を主たる対象として、従来よりも強度・靱性に優れた構造（柱）部材の開発が進められている。そのような状況の中、鋼管内部にコンクリートを充填した、鋼とコンクリートとの合成構造であるコンクリート充填鋼管柱（CFT）は、耐震性に優れた構造として注目されており、その施工事例も増えてきている。鋼管内部にダイアフラムを有する、いわゆる内ダイアフラム形式のCFT構造では充填不良を避けるために、一般に高流動コンクリートが使用される。

2. 研究の目的

サンドイッチ構造やCFT構造といった、コンクリート充填型の鋼・コンクリート合成構造において使用される高流動コンクリートには、鋼板・鋼管で密閉された空間内を隙間なく充填することが要求されるが、フレッシュ状態で充填されたとしても、硬化過程において鋼板や鋼管との間に過度の間隙（肌離れ）を生じたり、硬化過程における収縮が過度に大きく、鋼材による拘束から内部ひびわれを生じては、合成構造の前提条件である一体性が損なわれることになる。

また、高流動コンクリートは充填性に優れることから、その施工においては1回の打ち上がり高さを大きくすることが多い。しかし、打ち上がり高さが大きい場合には、コンクリートには大きな沈下が生じやすいと考えられ、その結果鋼材等の拘束によりひびわれの発生することも懸念される。

しかし、コンクリート充填型の鋼・コンクリート合成構造においては、初期の充填度を高めるための、高流動コンクリートの品質変動に関する検討は見られるものの、充填直後からのコンクリートの硬化時挙動が、間隙やひびわれなどの欠陥に及ぼす影響についての体系的な検討はほとんどなされていない。また、鋼・コンクリート合成部材の内部に、ダイアフラムのような障害物が介在する場合において、その開口部の大きさがダイアフラム下面の間隙発生に及ぼす影響について検討されたものも見られない。

そこで、本研究では粉体系、増粘剤系および併用系の各種高流動コンクリートについて、セメントや混和材料など使用する材料と配合の違いなどが、コンクリートの沈下挙動および収縮挙動に及ぼす影響について検討を行うこととした。

また、サンドイッチ構造やCFT構造について、高流動コンクリートの充填性能や間隙の発生状況、および間隙を抑制するために本研究において提案した加圧打設工法の効果について、実験面と解析面とから検討を行うこととした。さらには、実大規模の鋼・コンクリート合成構造のモデルについて、高流動コンクリートを用いた充填実験を行い、充填性能および加圧打設工法の効果の確認を行うこととした。

3. 本論文の構成

第1章は序論であり、研究の背景と高流動コンクリートの技術の現状、および本研究の目的について述べた。

第2章では、密閉空間内に充填された後のコンクリートの変形を引き起こす要因である、コンクリ

ートの沈下挙動と自己収縮挙動について検討を行った。

コンクリートの沈下特性の検討では、試料の高さ、セメントの種類、混和材料の種類や混入率を変化させ、粉体系、増粘剤系および併用系の各種高流動コンクリートについてその影響を調べた。その結果、①沈下は凝結までのごく初期材齢の間に急激に進行する初期沈下と、凝結以降において僅かづつ進行する長期沈下とに分けられること、②初期沈下量は試料高さに比例すること、③初期沈下量は硬化体の骨格が形成される（凝結）までの時間に左右されること、④高炉スラグ微粉末を多量（内割りで80%）混入すると沈下量は大きくなること、⑤フライアッシュを混入したり低熱型セメントを用いると、凝結が遅くなり初期沈下量が大きくなること、⑥ブリーディングが大きいと初期沈下量も大きくなること、等が明らかとなった。

自己収縮についても、各種高流動コンクリートを対象とし、セメントの種類、混和材料の種類や混入率、および硬化途中での乾燥の影響等について検討を行うとともに、自己収縮挙動や乾燥を伴う時の収縮挙動について、既往の予測式の適用性について評価を行った。ここでは、①高炉スラグ微粉末の混入は自己収縮を増大させ、②フライアッシュや収縮低減剤の混入や低熱型セメントの使用は自己収縮の低減に効果があること、③増粘剤や高性能AE減水剤の種類の違いは自己収縮に影響しないこと、④自己収縮過程で乾燥を開始させると収縮ひずみが急激に増加するが、乾燥後のひずみ増加量は配合により異なる（高炉スラグ微粉末混入のように、自己収縮が大きいものほど乾燥に伴うひずみ増加量は小さい）、⑤既往の予測式を高流動コンクリートに適用するには、さらに長期材齢に基づく算定式としたり、混和材の種類や混入率に応じた式への拡張が必要であること、等が明らかとなった。

第3章では、中間ダイヤフラムを有する部材を対象として、高流動コンクリートの配合、開口部の大きさ等が、ダイヤフラム下面の間隙発生に及ぼす影響について検討を行った。また、ダイヤフラムの開口部の大きさやダイヤフラムより上方に充填されたコンクリートが間隙発生に及ぼす影響と、サンドイッチ部材内に充填されるコンクリートの充填時挙動について、これまでほとんど適用事例の無い個別要素法による流動解析を試み、その適用性についても検討を行った。

その結果、①凝結が早くなり沈下量の小さくなる配合ほど、ダイヤフラム下面に生じる間隙量は小さくなること、②ダイヤフラム開口部が小さいほど試料上端での沈下量は小さくなるが、反対に間隙量は大きくなること、③ブリーディングが大きいと間隙も大きくなること、④個別要素法により実際のスランプフロー試験での状況を再現でき、高流動コンクリートの大変形問題のシミュレーション手法として個別要素法は有効であると判断されること、⑤個別要素法によりダイヤフラム下面の間隙発生状況、サンドイッチ構造における補剛材の向きが充填性に及ぼす影響を定性的に評価できること、等が明らかとなった。

第4章においては、密閉空間内に充填された後のコンクリートに、一部を打ち上げたコンクリートの自重により圧力を加えることにより、間隙発生量を抑制する加圧充填工法について基礎的実験を行い、その効果を検証した。これより、①加圧高さが高くなるほど加圧の効果により間隙は小さくなること、②加圧高さの増大に伴う間隙減少の効果の現れ方は配合により異なり、凝結の早い配合ほどその効果が大きいこと、等が判明した。

第5章においては、骨材などの品質変動に対して市中の生コン工場において対応可能な高流動コンクリートの製造方法について検討を行った。また、生コン工場で製造した高流動コンクリートを用い

て、サンドイッチ構造模型およびCFT模型への充填実験を行い、打設方法や高流動コンクリートの種類などが充填性能に及ぼす影響について検討するとともに、加圧充填工法の効果の確認を行った。その過程において、①異なる粒度の細骨材を組み合わせる場合には、土木学会標準粒度の中間となる混合とすることにより、最適な流動性状のものが得られること、②サンドイッチ構造への充填方法としてはポンプ筒先をコンクリート上面よりやや離れた隔離方式で充填するのがよいこと、③加圧充填工法を採用した充填実験では、増粘剤系および併用系のいずれの配合でもスランプフローを $65\pm 5\text{cm}$ で管理した結果、良好な充填結果を得ることができると、④CFTへの充填では高流動コンクリートを圧入施工するのが良く、落とし込み打設では空気の巻き込みが異常に大きくなり好ましくないこと、等が明らかとなった。

第6章は結論であり、各章で得られた結論をまとめて述べた。サンドイッチ構造への充填を考えたとき、①高炉スラグ微粉末混入は自己収縮を増大させ、硬化時における鋼材拘束によるひびわれが発生しやすいこと、特に混入率が大きくなると初期沈下も大きくなるため望ましい配合とは言えず、適用するには十分な注意が必要である。②フライアッシュを混入したもの、低熱型セメントを用いたものでは自己収縮が低減され、鋼材拘束によるひびわれは生じにくくなるが、凝結が遅いことやブリーディングが大きくなることにより、初期沈下に伴う間隙が大きくなりやすいといった欠点がある。また、加圧充填において加圧の効果を生じさせるためには、加圧高さを本実験での1mよりさらに高くするといった対策が必要であるなど、適用性もやや劣るものである。③増粘剤系の沈下は他の配合と比べてほぼ同等ではあるが、セメント量が小さいため自己収縮が小さいこと、加圧高さをそれほど高くとも加圧の効果を得られやすく、加圧高さが50cm程度でも間隙を十分小さなものとすることができることから、充填性からは比較的望ましい配合と言える。④併用系は沈下と自己収縮が共に小さく、間隙が小さくなるため良好な充填性の得られやすい配合であるが、増粘剤系に比べて加圧効果がやや出にくい配合である。しかし、加圧高さを大きめ(1m以上)とすることにより、十分な充填性は得られるものと考えられる。

4. あとがき

以上の研究の結果、高流動コンクリートの沈下・収縮挙動およびコンクリート充填型合成構造への高流動コンクリートの充填性能について体系的に評価を行うことができた。これより、本研究は高流動コンクリートと、それを適用するコンクリート充填型合成構造の品質および信頼性向上に大いに貢献するものと考えられる。

以上

審査結果の要旨

近年、構造部材として、各種の鋼・コンクリート合成構造が開発され、我が国の土木構造物にも幅広く採用されている。その中には、コンクリート充填鋼管柱や鋼・コンクリートサンドイッチ構造などのように、鋼枠の中にコンクリートを充填してそれらを一体化したコンクリート充填型の合成構造があり、このような構造では、狭い鋼枠の中にコンクリートを密実に充填する事が必須条件となる。

鋼枠の中にコンクリートを充填する場合、現在では充填を比較的容易に行うことの出来る高流動コンクリートが使用されるようになってきた。しかし高流動コンクリートは使用実績が未だ多くなく、この種の充填構造に適用したときの充填性については未だ十分な検討がなされていない。

本論文は、これらの問題を解決するため、粉体系、増粘剤系および併用系の各種高流動コンクリートに対して、使用する材料や配合の相違などが、コンクリートの沈下挙動と収縮挙動に及ぼす影響を検討するとともに、コンクリート充填型の鋼・コンクリート合成構造を想定した模型及び実物大実験によって、高流動コンクリートの充填性能や部材中の間隙の発生状況、さらには間隙を抑制するための打設方法について検討を行ったものであり、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的および本論文の構成について記述している。

第2章では、各種高流動コンクリートについて、打設後初期および長期の沈下を測定することによって、それらの沈下特性を明らかにした。その中で、コンクリートの沈下は初期のものが大きく、これらはコンクリートの凝結前に発生すること、長期に発生するものは主としてコンクリートの自己収縮によるものであること、それらの収縮量は使用材料によって大きく異なること、等を定量的に明らかにした。

第3章では、コンクリート充填鋼管柱のように細長い鋼枠の中にダイヤフラムがある場合のコンクリートの充填性を検討するため、ダイヤフラムの開口率や間隔を変化させた実験を行い、ダイヤフラムの下面に発生する間隙を小さくするために必要な、ダイヤフラムの開口率とそれぞれの開口率に対応するコンクリートの配合と打設方法との関係を明らかにした。また、コンクリートの充填状況を解析的に求める方法を提案し、いくつかのケースについて実験結果と比較をして提案した解析法の妥当性を明らかにした。

第4章では、より密実な充填を行うためのコンクリートの加圧打設法を提案している。

この方法は、コンクリートの充填後一定の圧力をかけることによって、特にコンクリートの打設初期の沈下による鋼板下面の間隙を防ごうとするものである。

ここでは、構造部材中の縦方向の沈下の影響のみを調べる円筒形供試体と横方向の広がりの影響も調べることのできる箱形供試体との二種類の供試体による実験を行って、鋼板下面に発生する間隙を小さくするために必要な、それぞれのコンクリートの配合に対する加圧量を示した。

第5章では、縦3m横3m高さ1.1mの実物大供試体を作成してコンクリートの配合や加圧量を変えた充填実験を行ない、第4章で提案した充填方法の効果を確認した。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は、最近多く用いられるようになったコンクリート充填型の合成構造に高流動コンクリートを密実に打設する方法を開発したものであり、コンクリート工学及び土木工学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。