

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656267

研究課題名(和文) 床版耐疲労性と温度応力低減における膨張材 - 軽量骨材併用効果の検証とその戦略的活用

研究課題名(英文) VERIFICATION OF COMBINATION USE OF EXPANSIVE AGENT AND LIGHTWEIGHT AGGREGATE ON FATIGUE RESISTANCE OF RC SLAB AND THERMAL STRESS RESTRAINT AND ITS UTILIZATION

研究代表者

岸 利治 (KISHI, Toshiharu)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90251339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：膨張材と軽量骨材を併用した場合の温度応力抑制効果と床版の疲労耐久性向上の機構を理解することを目的として、熱膨張係数の測定や軽量骨材周りの微細観察等を行った。その結果、膨張材を使用した場合の若材齢における線膨張係数の増加と軽量骨材の小さな線膨張係数が、膨張材と軽量骨材の併用効果を考える上での重要な因子であると推定されたが、両者の併用効果の機構の詳細を把握するまでには至らなかった。また、膨張材の使用により骨材の界面に形成される剥離部分に、軽量骨材を使用したために新たな生成物が析出するという現象は確認されなかった。

研究成果の概要(英文)：It was reported that simultaneous use between expansive agent and artificial light weight aggregate in cement concrete could restrain thermal stress induced under elevated temperature, and it could also prolong fatigue life of RC slab. In this study measurements of thermal expansion coefficient of specimens and microscopic visual observation around lightweight aggregate were conducted to understand its complicated mechanism. By the experimental investigations two tendencies were suggested as important factors. One is time dependent change of thermal expansion coefficient of this concrete. It is higher than normal concrete at the early age but it becomes small in the longer time. The other is that thermal expansion coefficient of lightweight aggregate is almost half of normal aggregate. Precipitation of additional hydration product at the gap space created around lightweight aggregate due to expansive action was not observed though it was suggested as a possible cause of that mechanism.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート 床版 疲労 温度応力 膨張材 軽量骨材

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、ケミカルプレストレスを導入できる量の膨張材と軽量骨材を併用すれば、完全拘束下においてコンクリートが高い温度上昇履歴を経た場合でも、温度低下後にほとんど温度応力が生じないことを明らかにした。その後、この事実を踏まえた上で、膨張材と軽量骨材を用いてケミカルプレストレスを導入した床版の輪荷重走行試験が実施され、その疲労耐久性は比較用の通常の床版の 33 倍に達するという注目すべき効果が確認された。このような膨張材と軽量骨材を併用した場合の顕著な効果は実務と学術の両面において極めて魅力的なものであるが、残念ながらその機構についてはほとんど明らかになっていなかった。また、一般の鉄筋コンクリート程度の鉄筋比の場合、ケミカルプレストレスを導入したコンクリート中の骨材は、意外にも圧縮ではなく引張を受けているということが研究分担者らの研究で分かり、膨張材と軽量骨材の併用効果の解釈を一層複雑なものとなった。すなわち、完全拘束下で確認された温度応力の抑制効果は、通常の骨材よりもヤング係数が小さい軽量骨材が温度上昇膨張過程で圧縮ひずみを効果的に蓄えることにより、温度低下過程での引張応力の導入抑制に効果を発揮するものと推定していたが、コンクリートに膨張と反作用としての拘束が生じて内部の骨材に圧縮力が働かないとすれば、通常の鉄筋比程度の拘束条件では、膨張材と軽量骨材の併用効果として温度応力の抑制が期待できるかどうかは定かではなかった。また、床版の鉄筋比は一般的なものであることから、膨張材と軽量骨材を併用した床版において高い疲労耐久性が確認されたのは、単に膨張材単独による効果なのか、あるいは軽量骨材との併用効果が少なからず存在しているかについても判然としていなかった。膨張材と軽量骨材を併用した場合の効果は大変に魅力的であるが、長期の安全性と耐久性が期待される実構造物への適用を図るには、実験による断片的な事実確認のみならず、機構分析とその説明による理論的な裏付けが必要である。また、膨張材と軽量骨材の併用効果が最大限に発揮される条件が明らかになれば、その効果を積極的に活用する設計上の工夫を戦略的に採用できる可能性が高いと考えた。

## 2. 研究の目的

ケミカルプレストレスを導入する膨張材と軽量骨材の併用がもたらす効果として、完全拘束下において温度応力がほとんど残存しないという特異な現象と、床版の疲労耐久性も著しく向上するという事実に着目した。しかし、膨張材と軽量骨材の併用が顕著な効果をもたらす機構は複雑であり、理論的な検討はほとんど進んでいなかった。そこで、待望される技術の早期の実用化を後押しするため、機構に関する理論的な裏付けを与えることを目的とした。

また、両者の併用効果が最大限に発揮される条件が明らかになれば、その効果を積極的に活用する設計上の工夫を戦略的に採用できるものと考え、その要点を明らかにすることを意図した。具体的には、養生温度を変えた膨張コンクリートの一軸引張特性に関する検討、膨張材および軽量骨材が供試体の熱膨張係数に与える影響の検討、膨張材と軽量骨材を併用した場合の骨材界面の性状観察により、膨張材と軽量骨材の併用効果の機構を検討した。

## 3. 研究の方法

### (1) 養生温度を変えた膨張コンクリートの一軸引張特性に関する検討

膨張コンクリートが完全拘束下で高温履歴を受けた場合に、初期に導入されたケミカルプレストレスが温度低下後にほとんど残存せずに消失してしまうと考えられる現象の機構を理解するために、養生温度を変えた膨張コンクリートの一軸引張特性に関する検討を行った。コンクリート部材に十分な量の膨張材を添加した場合、コンクリートにはプレストレスが、また鉄筋にはプレストレスが導入される。プレストレスの効果により、コンクリートのひび割れ発生応力が増加し、またひび割れが発生した場合もプレストレスにより鉄筋ひずみやひび割れ幅が抑制される。ここでは、養生温度を実験水準として、膨張材を使用した鉄筋コンクリート供試体の一軸引張試験を実施し、ひび割れ発生時の応力およびひび割れ発生後の鉄筋ひずみを測定することで、膨張材によるケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレスの評価を行った。供試体寸法は、100mm × 100mm × 400mm で断面中央に D16 ねじ節鉄筋を配置し、両端部を鋼板で拘束した。使用したセメントは普通ポルトランドセメント、膨張材は低添加型とし標準添加量を添加した。材齢 1 日で脱型し、20 および 35 ± 5 (ホットカーペットで包み加温。以下、高温履歴とする) の、2 種類の条件下で湿布養生を与えた。高温履歴を与えたケースにおいても、ホットカーペットから取り出して供試体が 20 程度に戻ったのちに載荷を行った。載荷は材齢 28 日で実施した。

### (2) 膨張材および軽量骨材が供試体の熱膨張係数に与える影響の検討

既往の研究では、膨張材の使用による線膨張係数は小さくなるとする報告があったが、本研究の初年度の結果では、逆に膨張材による反応生成物の熱膨張係数が大きい可能性が示唆された。そこで、コンタクトゲージを用いたセメントペースト供試体の熱膨張係数の測定を系統的に行った。供試体は、40mm × 40mm × 160mm のペースト供試体とし、ベースセメントとして普通ポルトランドセメントと低熱ポルトランドセメントの 2 種類、混和材として、膨張材使用の有無と共に、高炉スラグ微粉末もしくはフライアッシュを使用した。膨張材の置換率は 5% と 10% の 2 種類

とした。供試体総数は108本となった。打設から24時間後に脱型し養生を行った。養生条件は、気中(室温 $20\pm 2$  ,湿度60%以上)および水中(水温 $20\pm 2$  )とした。養生後、供試体に計測チップを100mm間隔に3箇所貼り付け、所定の温度履歴を与えた後にコンタクトゲージを用いて温度ひずみを測定した。高温履歴を与える時は極端な乾燥を防ぐために、供試体を乾燥した布及び真空パックで包んだ。温度履歴は、恒温恒湿槽の温度設定として、試験開始時は20とし、その後30分後から2.5時間後にかけて60まで昇温させ、6.5時間までは60一定の状態を維持した後、8.5時間までに20に降温させ、12.5時間まで計測を行った。試験時におけるセメントペースト供試体の温度を確認するために、温湿度センサを供試体に埋め込み、内部温度の計測を行った。測定は、試験開始時、開始から6時間半、12時間半の3回行った。供試体材齢は、7日と28において測定を行った。

また、軽量骨材がコンクリートの熱膨張係数に与える影響を確認する目的で、普通骨材と軽量骨材それぞれ単体の熱膨張係数を測定するために、骨材をエポキシ樹脂で接着させた骨材供試体の熱膨張係数の測定も行った。

#### (3) 膨張材と軽量骨材を併用した場合の骨材界面の性状観察

研究分担者の過去の検討により、膨張材を多量に添加した場合には、骨材界面に剥離が生じることが確認されている。また、本研究の予備実験での観察により、膨張材と軽量骨材を併用した場合には、骨材界面の剥離部分が析出物により埋められたように見える部分があるとの報告を得た。この段階では、膨張材を含むペーストマトリックスの膨張によって骨材周りに形成された剥離部分に新たな生成物が生じているとの証左を得るには至らなかったが、若材齢時であればセメントには未反応部分が残存していること、またプレウェッティングされて使用されている軽量骨材は内部に多量の水を含んでおり、これが自己収縮の緩和に効果があることが知られていたことから、膨張材の効果により温度上昇過程で形成された骨材界面の剥離部分に軽量骨材中の水が供給されれば、剥離部分に新たな水和物が析出することで、温度降下時に閉合しようとする剥離に対して楔のような効果をもたらす可能性が考えられた。そこで、標準添加量以上の膨張材を添加して、骨材周りに形成される剥離部分に新たな析出物が生成するかどうかをマイクロスコプを用いて観察することとした。骨材種類や養生条件が剥離幅に与える影響を把握するため、剥離幅の測定も行った。

骨材には、比較のため、天然骨材と軽量骨材を使用した。水結合材比は45%、膨張材置換率は10%とした。供試体は $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体で、条件毎に3本ずつ

計18本を作製した。打設から24時間後に供試体を切断し、マイクロスコプを用いて骨材界面を観察した。剥離幅の計測は、供試体の条件別に500箇所とし、平均値を求めた。一部、材齢3日以上での観察も行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 養生温度を変えた膨張コンクリートの一軸引張特性に関する検討

本検討で得られた結論は以下のとおりである。一軸引張試験において、高温履歴を受けた供試体ではひび割れ発生応力の低下が確認された。これは、温度低下に伴う収縮に起因すると考えられる。標準添加量の膨張材を使用した場合、20の養生を与えたケースにおいては、ひび割れ発生応力は無添加のケースと同程度であった。一方、高温履歴を与えた場合には無添加のケースを下回った。膨張材を標準添加量の2倍使用した場合、最大35程度の温度履歴であれば、温度低下後もケミカルプレストレスが保持されることを確認した。また、別途実施した膨張材を使用したコンクリートと普通コンクリートの線膨張係数の比較実験から、膨張材による反応生成物の線膨張係数が大きい可能性が示唆された。

##### (2) 膨張材および軽量骨材が供試体の熱膨張係数に与える影響の検討

セメントペースト供試体に高温履歴を与えることで、各種条件毎の線膨張係数との関係を得た。普通ポルトランドセメントを使用した場合の膨張材量の影響として、材齢7日では添加量の増加に伴い熱膨張係数が増大する結果となった。一方、材齢28日では逆に、膨張材の添加量が増加するにつれて熱膨張係数が減少する結果となった。初年度の検討において、膨張材の添加により熱膨張係数は増大する傾向を確認したが、他の研究者による既往の研究では、膨張材の添加により熱膨張係数は減少することが報告されており、矛盾する結果となった。しかし、本研究初年度の検討では、測定を材齢3日で行ったのに対して、他の研究者による既往の研究では材齢14日ないし材齢2日~10日にかけて行った実験結果であることから、材齢によって膨張材による線膨張係数への影響が異なっている可能性が考えられた。

ベースセメント種類の影響としては、材齢7日において、普通ポルトランドセメントでは膨張材の添加により熱膨張係数が増加しているのに対して、低熱ポルトランドセメントでは熱膨張係数が大きく抑えられていることを確認した。低熱ポルトランドセメントの使用により、若材齢時の線膨張係数の増大を抑制できる可能性を示していると解釈できる。材齢28日においては、膨張材をセメントの10%と置換して気中養生を与えた場合を除いて、普通ポルトランドセメントを使用したケースと同程度の熱膨張係数となった。混和材の影響に関しては、混和材の添加によ

る熱膨張係数への影響は全体的に大きくなかった。

以上の傾向は、乾燥収縮・自己収縮の影響を無視したものである。しかし実際には高温履歴を与えている間に乾燥収縮・自己収縮によりセメントペーストの膨張が緩和されたものと考えられる。そこで多少強引な方法ではあるが、収缩量に対する補正を与えた場合の熱膨張係数の算出を試みた。収縮の補正方法は、供試体温度が試験開始時と同じ20に戻ったと考えられる12.5時間後における温度ひずみが0となるように補正を加え、この補正分が温度ひずみ以外の収縮に起因するひずみであると仮定した。このような仮定を行った上で、補正により得られた測定開始6時間半後の温度ひずみから熱膨張係数を算出した。その結果、上記の仮定により収縮を除いた場合でも、補正前に確認された結果と同様に、普通ポルトランドセメントを使用した場合には、材齢7日では膨張材添加量の増加に伴い熱膨張係数が増大しており、一方、材齢28日では熱膨張係数が減少するという傾向が確認された。このことから、膨張材を使用した場合には若材齢では膨張材添加量の増加と共に線膨張係数が増加する一方で、材齢28日では逆に減少するという特異な傾向が存在するものと考えられる。また、材齢7日において、低熱ポルトランドセメントを使用することで線膨張係数が抑制されるという結果に関しても、補正前と同様であった。

普通骨材と軽量骨材をそれぞれエポキシ樹脂で固めた骨材供試体を用いた測定の結果、軽量骨材の熱膨張係数は普通骨材と比較してほぼ半分の値であることを確認した。このことは、温度降下時に普通骨材を使用したコンクリートに比べて、軽量骨材を使用したコンクリートの温度ひずみが小さくなる可能性が示唆された。

### (3) 膨張材と軽量骨材を併用した場合の骨材界面の性状観察

予備実験において膨張材と軽量骨材を併用した場合に骨材界面の剥離部分に析出物が生成してケミカルプレストを保持する機構の存在が浮上したが、マイクロスコップを用いた詳細目視観察を行った結果、そのような骨材界面における新たな生成現象はほとんど確認されなかった。

骨材界面の剥離幅に関しては、普通骨材・軽量骨材ともに水中養生を行った場合に気中養生と比較して大きくなるという結果が得られた。骨材界面周辺のペーストが膨張すると、5円玉を熱した場合に中央の孔が膨張すると同様のメカニズムにより、骨材剥離が生じるものと考えられる。水中養生における供試体は、十分な水分供給により大きく膨張したために剥離幅が大きくなったものと考えられる。一方、気中養生を行った場合には骨材剥離が抑制された。これは乾燥により供試体が収縮したことが主要因と考えられるが、膨張と収縮という単純な重ね合わせだ

けではなく、収縮が生じたことの二次的な効果として、膨張効率が抑制されたものと考えられる。また、気中養生において材齢24時間と材齢3日の剥離幅を比較したところ、普通骨材界面の剥離幅の平均値が0.03mm程度減少したのに対し、軽量骨材では0.02mm程度と減少が少なかった。軽量骨材の内部養生効果により、乾燥収縮・自己収縮が抑制されたことに加えて、膨張材の膨張効果が有効に発現した影響と考えられる。

また、軽量骨材を用いた供試体の剥離幅は普通骨材と比較して小さいという結果が得られた。しかしその差はわずかであり、使用骨材毎の剥離幅の分布形状は類似していた。また、この傾向は養生条件に拘わらず同様であった。

以上に検討により、膨張材を使用した場合の若材齢における線膨張係数の増加と軽量骨材の小さな線膨張係数が、膨張材と軽量骨材を併用した場合の効果を考える上での重要な因子であると推定されたが、両者の併用効果の機構の詳細を把握するまでには至らなかった。また、膨張材の使用により骨材の界面に形成される剥離部分に、軽量骨材を使用したために新たな生成物が析出するという現象は確認できなかった。

## 5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計0件)

### 〔学会発表〕(計2件)

飯島 光, 酒井雄也, 岸 利治, 溝淵利明, 養生温度を変えた膨張コンクリートの一軸引張特性, 第40回土木学会関東支部技術発表研究会, 2013年3月15日, 宇都宮大学, 宇都宮  
Hikaru Iijima, Yuya Sakai, Toshiharu Kishi, Mechanical Performance of expansive concrete in uniaxial tension test with different cement type, age, and curing condition, The 13<sup>th</sup> East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13), 2013年9月11日, 北海道大学, 札幌

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岸 利治 (KISHI, Toshiharu)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号: 90251339

### (2) 研究分担者

酒井 雄也 (SAKAI, Yuya)  
東京大学・生産技術研究所・助教  
研究者番号: 40624531