

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420602

研究課題名(和文)鉄筋コンクリート面部材を対象とした構造ヘルスマモニタリング技術の開発

研究課題名(英文)Experimental study on structural health monitoring for reinforced-concrete plate like members

研究代表者

金澤 健司 (Kenji, Kanazawa)

一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・上席研究員

研究者番号：00371435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：大地震後における建築物の耐震性を迅速に診断できる構造ヘルスマモニタリング技術を開発するため、建物剛性や温度ひずみ特性などの実際の建物でも観測できる指標が地震損傷によってどのように変化するのを実験した。その実験の結果に基づき、損傷と剛性変化、および損傷と温度ひずみ特性の変化を再現できる物理モデルを構築した。これらの物理モデルを活用することで、地震後に発生した建築物の損傷が深刻なものか否かを診断することが可能となると期待される。

研究成果の概要(英文)：Two kinds of structural experiments of concrete and steel members have been conducted to clarify how to change in structural stiffness or thermal strain factor with several slight-to-severe quake damages: i.e., those changes can be easily observed in an actual building or a house. The aim of the experiments is to develop a next-generated seismic diagnosis on structural health monitoring which can quickly detect severe damage in an existing building or house after future earthquakes. Using the experiment results, the physical models have been formulated on concrete-steel beam members, which can be simulated with correlations of damage and changes in stiffness, or with correlations of damage and thermal strain factors. To utilize those models to structural health monitoring, it is expected that one can rapidly diagnose in a quake-stricken building whether some damage appeared then is quite severe or not.

研究分野：工学

キーワード：建築構造・材料 構造ヘルスマモニタリング 保全技術 非破壊検査 損傷検知 鉄筋コンクリート構造
固有振動数 温度ひずみ特性

1. 研究開始当初の背景

我が国の地震活動度は世界的に見ても高く、建築物の耐震性確保が重要な課題であることは一般にも広く認知されている。現行の建築物の耐震基準は、過去の地震被害等を参考に想定された外力に対して人命を確保することを目標とした最低条件として設定されている。このことは換言すれば、現行基準で設計された建築物は、将来起こるであろう大地震に対して、人命を脅かすような大被害には至らないものの、ある程度の損傷の発生を許容する考え方が採用されているといえる。しかし、1995年神戸地震の発生以降、建築物の耐震性能への要求性能として、倒壊を防止して人命を保護するだけでなく、機能維持や修復性などの、地震直後にも建築物を継続して使用するための構造性能の確保が社会一般のニーズとして強いことが認識されつつある[1]。このような背景の下で、地震後における建築物の継続使用性等を判断するための技術として、剛性や固有振動数などを評価指標とする構造ヘルスマニタリング技術 (Structural Health Monitoring) の早期実用化が望まれている。

その実用化に至る最大の課題として、建築物の継続使用性の可否を判断するための剛性低下量の閾値の設定方法が挙げられる。研究代表者および連携研究者はこれまでに、床スラブを対象として温度ひずみ特性および面外剛性を評価指標とした構造ヘルスマニタリング技術の可能性を実建物観測や実大建物の振動台実験に基づき検討してきた[2][3]。しかし、現状において、部材レベルでの実験事例やデータが乏しいため、損傷と評価指標を関係づける評価方法の実現可能性を判断できない。

2. 研究の目的

本研究では、構造ヘルスマニタリングにおける評価値の閾値を設定する方法を構築するための基礎データを収集することを目的として、鉄筋コンクリート床スラブの構造力学実験を実施した。そして、損傷と評価指標の関係を明らかにする検討を通して、構造ヘルスマニタリング技術の基本原理の確認を試みた。具体的には、温度ひずみ特性および建物剛性を指標とした構造ヘルスマニタリングを対象として、以下の事項を明らかにすることを研究目標に設定した。

(1) 温度ひずみ特性を指標とする構造ヘルスマニタリングの実現可能性

研究代表者らは、これまでの検討で実建物の温度ひずみ特性が観測可能な量であることを明らかにするとともに、床スラブの温度ひずみモデルを用いて温度ひずみ特性をモニタリングすれば、損傷による建物剛性の変化を検出できることを示す基本原理を提示してきた[2]。しかし、この基本原理が建物構造の実際の損傷に対して有効かどうかは

明らかでない。本研究では、鉄筋コンクリート床スラブにひび割れ損傷を実際に与えて、温度ひずみ特性の変化を評価することによって、この基本原理が鉄筋コンクリート構造の代表的な損傷形態であるひび割れ損傷に対して成立することを実験的に確認する。

(2) 小地震を経験した建物の固有振動数が低下するメカニズムの解明

構造ヘルスマニタリングに係わる既往研究では、建物構造に発生した損傷による剛性低下を検出することを目標とするものが多い。しかし、建物の固有振動数が、大地震時だけでなく、建物構造に損傷が発生しない小地震時にも低下していること、すなわち、建物構造の非損傷時にも剛性が低下していることを示す観測事例が増えつつある。研究代表者らは、以前からこの二段階の剛性変化 (小地震と大地震、もしくは非損傷時と損傷時) に着目した研究を実施しており、特に、鉄骨造の建築物を対象とした場合には、鉄筋コンクリート造床スラブのひび割れによって、小地震時に建物の固有振動数や剛性が低下する可能性があることを指摘してきた。このひび割れは、建物全体にとっては致命的な損傷ではなく、一般には非損傷と見なして良いため、構造ヘルスマニタリングの実用化の観点に立てば、損傷時と非損傷時の剛性変化を見分けることの必要性を示唆しているといえる。本研究では、床スラブにひび割れが発生した場合の剛性変化のメカニズムを実験的に解明する。

3. 研究の方法

(1) 研究の全体概要

鋼製梁とコンクリート造床スラブから構成される合成梁 (合成梁とは、梁部材とスラブ部材にふたつを組み合わせた合成部材を指す) の縮小試験体を対象として、温度ひずみ特性と面外剛性のそれぞれを評価指標とする2種類の構造力学実験を実施した。縮小試験体は、防災科学技術研究所 E-ディフェンスにおいて 2008 年 3 月に実施された高層建物実験[3]の試験建物を参考にして、寸法比で 1/6 スケールになるように鋼製梁部分および鉄筋コンクリート造床スラブ部分を設計・製作した。本研究では、温度ひずみ特性および床スラブ面外剛性の2つの指標に対する実験を実施しているが、床スラブ部分については、これら2種類の構造力学実験において共通仕様とした。その一方で、鋼製梁部分については異なる仕様を設定しており、温度ひずみに関する実験ではアルミ製の中空断面梁を、面外剛性に関する実験では鋼製の充実断面梁を用いた。すなわち、温度ひずみ特性に関する実験では、梁とスラブの曲げ変形と熱的変形特性を再現することに配慮して、試験建物の本研究の試験体で合成梁における曲げ剛性と軸剛性のスケール則を一致させることを意図した。これに対して、面外

剛性に関する実験では、鋼製梁については、線形範囲を可能な限り大きくして損傷しにくくして、床スラブのひび割れ特性を把握しやすくすることを意図して、曲げ剛性のみのスケール則を一致させること、ならびに梁の塑性荷重を大きくすることの2点に配慮して材料と部材断面を設定した。以下の項目(2)および(3)に2種類の実験方法を説明する。

(2)温度ひずみ指標に関する実験の方法

図1に示すように、合成梁部分に様の負曲げ荷重(床スラブが引張方向となる曲げ荷重)を与える四点載荷法を用いて、コンクリート部分に曲げひび割れを発生させた。その際、負曲げ荷重を漸増させた4度の載荷/除荷を繰り返し、表1に示すように、除荷した状態に相当する時点において3度の温度ひずみ実験を実施した。詳細には、温度ひずみ実験は、載荷前の健全時と、床スラブに貫通ひび割れが発生した損傷の時点、梁が降伏した損傷の時点の三段階で実施した。これらの損傷段階では、図2の曲げ荷重と変形角の関係により、損傷の時点では残留変形があり曲げひび割れが発生したこと、損傷の時点では降伏荷重に達したことが確認される。

温度ひずみ実験の方法は、南側と見なした床スラブの一面のみにヒータを設置した上で、日照を模擬して断続的な温度を与え、その際に発生する温度変化とひずみと、床スラブ部分の四隅の水平変形を測定した。そして、それらのデータを用いて、変形と温度データの相関関係が床スラブの損傷度によってどのように変化するのかを分析した。

(3)面外曲げ剛性指標に関する実験の方法

図3(a)に示すように、電動ジャッキを用いて負曲げ荷重を合成梁に付与した上で、各荷重段階において試験体中央部2点を打撃することによる自由振動試験を実施した。自由振動試験から得られる減衰波形に基づいて、合成梁試験体の固有振動数を測定し、載荷経験と固有振動数の変化の傾向を分析した。曲げ載荷/除荷荷重と変形量の関係を示す図3(b)によれば、試験体の挙動は弾性範囲を維持していることが確認される。このような破断範囲に留まる合成梁の面外剛性の載荷経験依存性を評価するため、固有振動数の減少量を床スラブの面外曲げ剛性の低下率と見なして、載荷経験と床スラブの剛性低下量の間接的に評価した。

4. 研究成果

(1)温度ひずみ特性を指標とする構造ヘルスマニタリングの実現可能性[4]

温度ひずみ指標に関する実験のデータを用いて、床スラブの南北温度差と南北ひずみ差の関係を整理したグラフを図4に示す。実験では、ヒータで床スラブ南側を加熱すると南側の温度が上昇し、北側の温度はほとんどの変化しないため、南北温度差が0から増加

していき、加熱を停止すると南北温度差が減少し、さらに再び加熱すると南北温度差が再び増加する、という温度の変化を与えている。この温度の変化は、日照による建物温度の日変化を模擬したものである。温度や温度差の変化によって、床スラブが局部的に膨張/収縮して、床スラブ全体に温度ひずみや温度応力が発生する。図4縦軸の南北ひずみ差は、材軸方向の床スラブの“ひずみ”を南側と北側の2辺に対して東西方向の変位データを用いて計算し、さらに、そのようにして計算した“南側の東西方向ひずみ”から“北側の東西方向ひずみ”を差し引いた数値で評価した。この南北ひずみ差は、床スラブの温度膨張や温度収縮による変形ではなく、南側のみに温度を付与することで生じる南側と北側の変形の差で発生することに留意されたい。

図4より、ヒータ温度が上昇/下降を繰り返すたびに温度差とひずみ差が軌跡を描くこと、その関係は線形関係にあること、その1次回帰式の1次係数は損傷が増大するに伴って、減少する傾向があることが確認された。

この温度差とひずみ差の関係は、研究代表者が事前に予想した図5に示す床スラブの温度ひずみモデルおよび比例係数(温度差とひずみ差の1次回帰式の傾きと等しい)で説明できる[2]。モデルでは、例えば、北側温度 T_N を不変として南側温度 T_S のみを上昇させると南側のバネが熱膨張しようとするが、南北のバネを連結するせん断ばねを介して北側ばねの拘束によって、その膨張量は抑制される、という一連のプロセスを表現している。また、モデルでは、床スラブにひび割れが発生して床スラブの軸方向ばねの剛性が低下すると、温度差とひずみ差の比例係数が低下する傾向が表現されている。

図4の実験結果は、床スラブの曲げひび割れが増加すると、軸剛性の減少量 K_N が増加し、その結果として比例係数すなわち温度差とひずみ差の傾きが減少するという一連の傾向と合致する。以上のように、本研究の部材レベルでの実験により、このメカニズムを実験データにより裏付けることができた。

(2)小地震を経験した建物の固有振動数が低下するメカニズムの解明

面外曲げ剛性指標に関する実験のデータを用いて、部材変形角や載荷経験と床スラブの面外曲げ剛性を評価した結果を図6に示す。また、参考として、合成梁の曲げ荷重と曲率変形から推定した曲げ剛性を図7に示す。これらは、いずれも床スラブ面外方向の曲げ剛性を評価したものであるが、図6は自由振動波形から、図7は載荷時における荷重変形データから評価している点が異なっており、図6は動的なデータから評価した動剛性、図7は静的なデータから評価した静剛性をそれぞれ評価しているといえる。

図6より、動剛性については、弾性範囲の変形状態を維持する合成梁であっても、床ス

ラブのひび割れ等の軽度の状態変化によって、初回載荷時に固有振動数が非可逆的に低下する傾向や、残留応力の変化に依存して固有振動数が可逆的に増減する傾向などを確認した。これらの実験結果は、研究代表者らが実大建物実験など[3]で観察した建物の弾性変形経験時に建物の固有周期が長周期化する現象を裏付ける内容となっている。

なお、図7によれば、静剛性は、載荷回数が増加するとともに、曲げ剛性が増加する傾向がある。この傾向は、図6に示した動剛性の評価結果や既往の観測事例とは整合しないといえる。要因として、動剛性と静剛性は床スラブの異なる変形メカニズムに起因したものであることが考えられる。すなわち、動剛性が純粋に当該部材変形角の時点での剛性を表しているのに対して、静剛性は当該部材変形角の時点だけでなく完全に除荷した時点までの状態に対する評価値であり、異なる状態を評価している可能性がある。

(3)今後の研究展開

温度ひずみ特性および面外曲げ剛性を指標とする構造ヘルスマニタリング技術の基本原則を定性的に確認することができた。今後は、損傷と非損傷を見分けるための閾値を策定するための、より精密な実験手法の開発を進める予定である。

<参考文献>

[1]日本建築構造技術者協会：建築の構造設計，第4編 目標性能と性能メニュー，オーム社，2002。

[2]金澤健司：構造部材の健全性判定方法、装置ならびにプログラム，特許4859712,2011.3。

[3]尾野勝，金澤健司ほか：実大振動台実験における高層鉄骨造建物の地震損傷検地，日本建築学会構造系論文集，第662号，pp.775-783，2011.4。

[4]上島洋毅、金澤健司ほか、温度ひずみを利用した鉄筋コンクリート面部材の損傷診断法に関する構造力学実験，構造工学論文集，Vol.61B，2015.4。

[5]永野正太郎、金澤健司ほか、曲げ載荷を受ける合成梁縮小試験体の自由振動試験（その1）（その2），2015年度日本建築学会学術講演梗概集，2015.9。

5. 主な発表論文等

（研究代表者及び連携研究者に下線を付す）

〔雑誌論文〕（計12件）

上島洋毅、金澤健司、永野正太郎、北村春幸、曲げ荷重を受ける合成梁縮小試験体の自由振動実験、その3 動剛性と静剛性を同時測定するための実験法の検討、その4 曲げ交番載荷時における静剛性と動剛性の分析、日本建築学会学術講演概要集、査読無し、構造、2016（掲載決定）。

上島洋毅、金澤健司、永野正太郎、北村春幸、曲げ交番載荷を受ける合成梁縮小試験体の動的特性に関する実験的研究、その1 実験手法の提案、その2 曲げ載荷実験および加振実験に関する考察、第86回日本建築学会関東支部発表会研究報告集、査読無し、2016-1巻、2016、pp.241-244、pp.245-248。

永野正太郎、金澤健司、上島洋毅、北村春幸、曲げ荷重を受ける合成梁縮小試験体の自由振動実験、その1 負曲げ載荷実験による曲げ剛性の評価、その2 負曲げ載荷時における合成梁の固有振動数と曲げ剛性の分析、日本建築学会学術講演概要集、査読無し、構造、2015、pp.997-998、pp.999-1000。

上島洋毅、金澤健司、高橋悟、北村春幸、温度ひずみを利用した鉄筋コンクリート面部材の損傷診断法に関する構造力学実験、構造工学論文集、査読有、Vol.61B、2015、pp.9-17。

上島洋毅、金澤健司、高橋悟、北村春幸、温度ひずみを利用した鉄筋コンクリート床スラブの損傷診断法に関する基本原則確認実験、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、査読無し、1巻、2014、pp.2198-2205。

高橋悟、金澤健司、上島洋毅、北村春幸、温度ひずみを利用した鉄筋コンクリート床スラブの損傷診断法、その1 曲げ亀裂を受けた鉄筋コンクリートの動的特性、その2 各損傷状態における温度ひずみの評価、日本建築学会学術講演概要集、査読無し、構造、2014、pp.121-122、pp.123-124。

高橋悟、金澤健司、上島洋毅、北村春幸、温度ひずみを利用した鉄筋コンクリート床スラブの損傷診断法、その1 曲げ載荷実験と固有振動数の評価、その2 各損傷段階における温度ひずみの評価、第84回日本建築学会関東支部研究発表会研究報告集、査読無し、1巻、2014、pp.629-632、pp.633-636。

6. 研究組織

(1)研究代表者

金澤 健司 (KANAZAWA, Kenji)

一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・上席研究員

研究者番号：00371435

(2)連携研究者

北村 春幸 (KITAMURA, Haruyuki)

東京理科大学・理工学部建築学科・教授

研究者番号：20339112

(3)研究協力者

高橋 悟 (TAKAHASHI, Satoru)

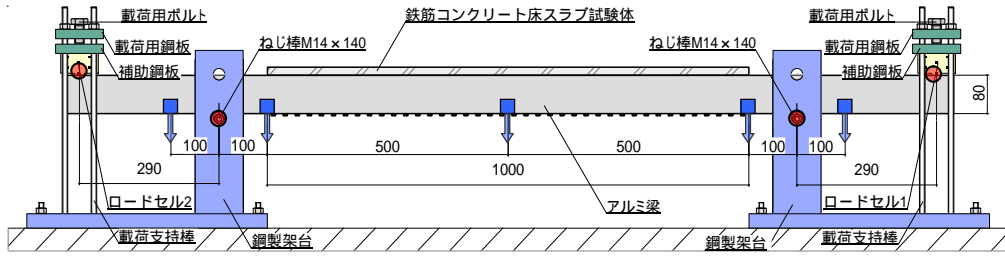
吉澤 伊織 (YOSHIKAWA, Iori)

上島 洋毅 (KAMISHIMA, Hiroki)

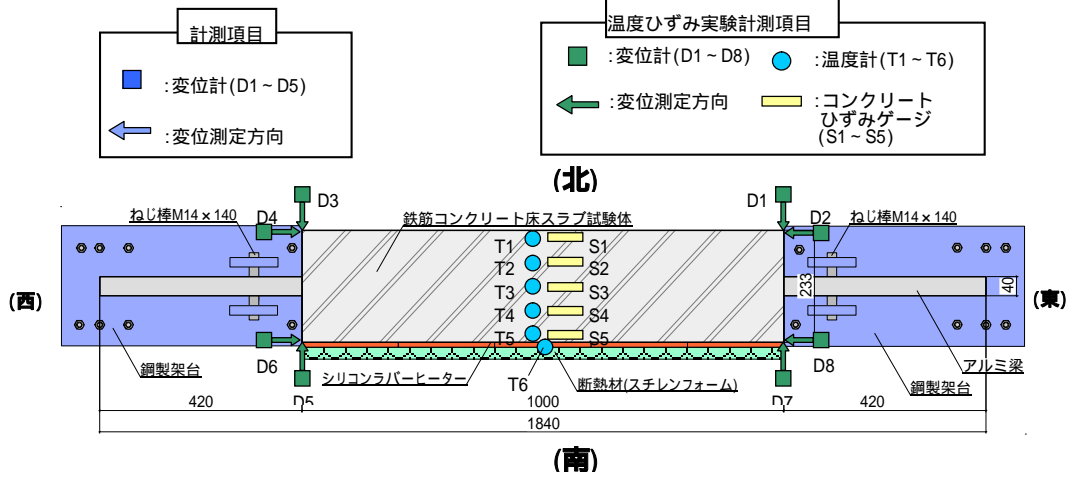
永野 正太郎 (NAGANO, SHOTARO)

上記4名はいずれも、研究当時 東京理科大学・大学院理工学研究科・大学院生。

●: 四点載荷法における載荷 4 点 . 両端 2 点に同一の荷重を付与して、中央 2 点間に均一の曲げ荷重を作用させる .



(a) 立面図 (曲げ載荷実験および自由振動実験での据付状況)



(b) 平面図 (温度ひずみ実験での据付状況)

図 1 温度ひずみ指標に関する実験の方法

表 1 温度ひずみ指標に関する実験一覧

順序	内容	試験体状態
1	温度ひずみ実験	健全
2	曲げ載荷実験	損傷 (2.4kN)
3	曲げ載荷実験	損傷 (3.6kN)
4	曲げ載荷実験	損傷 (6.6kN)
5	温度ひずみ実験	損傷 (6.6kN)
6	曲げ載荷実験	損傷 (9.5kN)
7	温度ひずみ実験	損傷 (9.5kN)

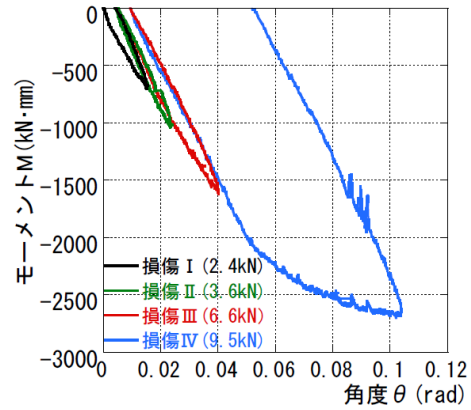
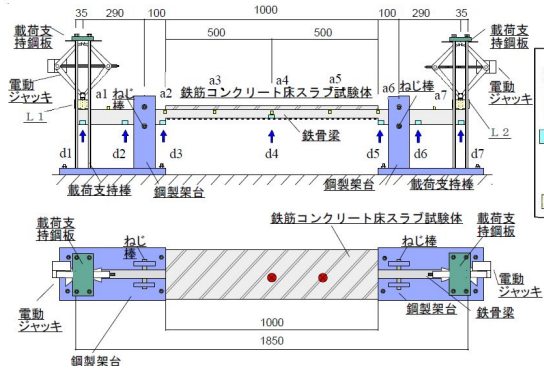
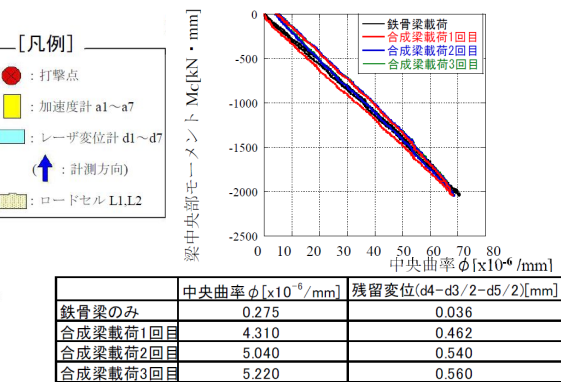


図 2 曲げ載荷実験結果(西側の M - 関係)



(a) 試験体の設置状況



(b) 曲げ載荷実験による曲げ荷重と変形曲率の関係

図 3 面外曲げ剛性指標に関する実験の方法

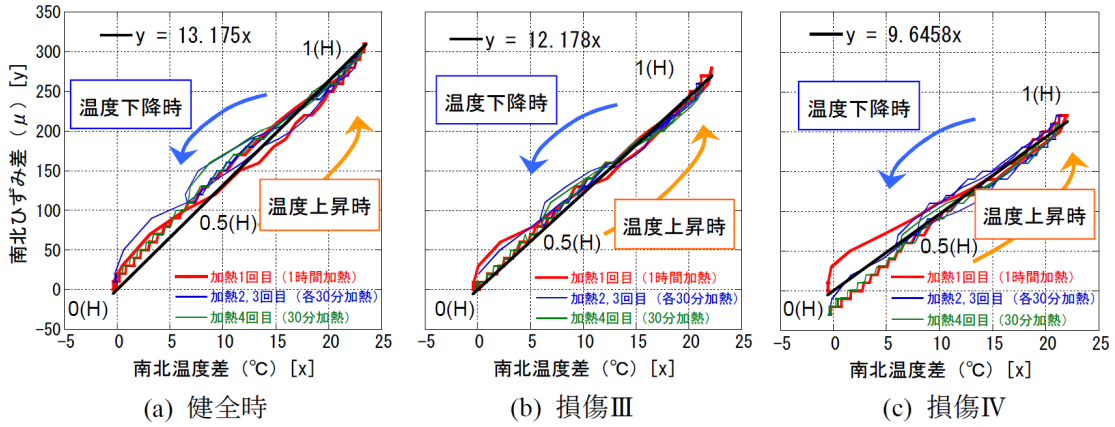
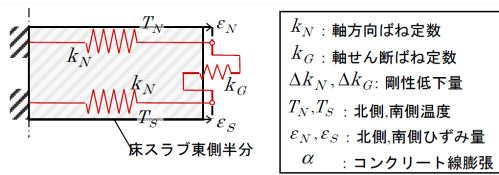
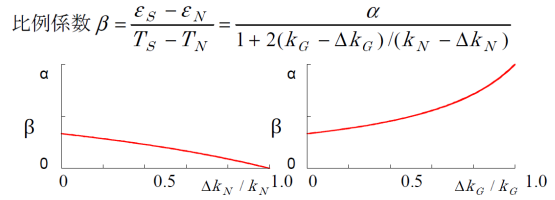


図4 温度差とひずみ差の相関関係 (温度ひずみ指標に関する実験結果)

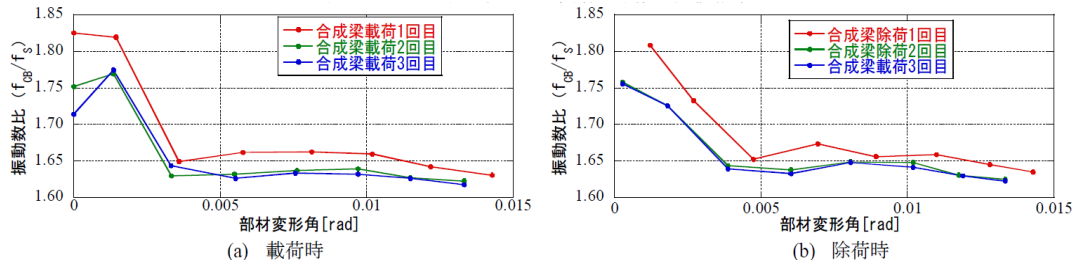


(a) 温度ひずみモデル図



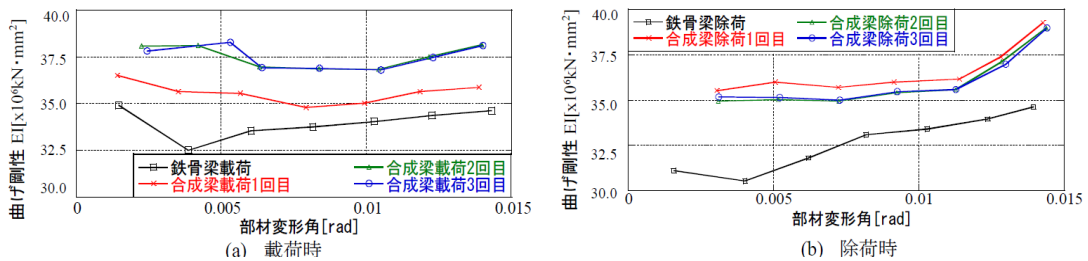
(b) ばね定数と比例係数の関係

図5 床スラブの温度ひずみモデル



(注) 動剛性の荷荷経験依存性は、鉄筋コンクリート床スラブ付き合成梁の固有振動数 f_{fb} を鉄骨梁の固有振動数 f_s で除した振動数比で評価した。

図6 床スラブ面外曲げ剛性 (動剛性) の荷荷経験依存性の評価結果



(注) 静剛性の荷荷経験依存性は、曲げ荷重と変形曲率の関係より割線曲げ剛性を算定して評価した。

図7 床スラブ面外曲げ剛性 (静剛性) の荷荷経験依存性の評価結果