

明 細 書

発明の名称：

コンクリートの特性評価を行うための評価装置、及びコンクリートの特性評価方法

技術分野

[0001] 本発明は、コンクリートの特性評価を行うための評価装置、及びこの装置を用いたコンクリートの特性評価方法に関する。

背景技術

[0002] 一般に、規模の大きな（大型、大断面の）構造物に利用されるコンクリート（マスコンクリート）は、部位における温度変化に起因した温度ひずみが生じやすい。温度ひずみは、マスコンクリートの温度ひび割れを招く原因となり得る。このため、マスコンクリートの温度ひび割れのリスクを評価することは重要である。

[0003] コンクリートの温度ひび割れの性状を実験的に評価する際に利用される装置として、T S T M（Thermal Stress Testing Machine）と呼ばれる装置が知られている。この装置は、断熱状態でコンクリートの温度条件と拘束条件とを任意に制御可能な、一軸拘束型の試験装置である。T S T M装置によれば、拘束下で温度条件を変更してコンクリートの性状を評価する拘束試験と、無拘束状態で温度条件を変更してコンクリートの性状を評価する無拘束試験とを行うことが可能である。

[0004] しかし、T S T M装置は、温度管理のための通水制御、より詳細には水温や水量の制御が必要となる等の事情により、装置規模が大型化する。また、試験結果の精度を高いレベルで維持するためには、上記制御機構等のメンテナンスが必要である。このような事情から、T S T M装置は、広いスペースを有する試験室に設置されているのが通常であり、現場で実際に利用されるコンクリートを評価するのが難しい。

[0005] 特許文献1には、取扱性に優れ、断熱状態を再現した状態でコンクリート

に対する力学特性の試験を行うことのできる試験装置が、開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開2019-078614号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] マスコンクリートの温度ひび割れのリスクを評価する際には、一般的に、種々のコンクリート物性を取得した上で、それらのデータを入力値とした数値解析により温度応力を計算する方法が採用される。この数値解析に際しては、コンクリートの多様な物性値が必要となり、典型的な例としては、圧縮強度、引張強度、ヤング係数、温度上昇量、自己収縮ひずみ、熱膨張係数等の物性値が挙げられる。

[0008] 特許文献1に開示された試験装置を用いることで、断熱温度特性と、圧縮強度等の力学的な特性については得ることができるものの、温度ひび割れのリスクを評価するために必要なデータとしては不十分である。

[0009] 本発明は、上記の課題に鑑み、現場で利用されるコンクリートと同材料のコンクリートを利用しながらも、温度ひび割れリスク評価を行う際に必要な多様な物性値を取得可能な、評価装置を提供することを目的とする。また、本発明は、この評価装置を用いて、コンクリートの特性を評価する方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0010] 本発明に係る評価装置は、測定対象であるコンクリートの特性評価を行うための評価装置であって、

前記コンクリートが打設可能な複数の第一筒状体を含む強度試験部と、

前記コンクリートが打設可能な有底の第一矩形枠状体を含む無拘束試験部と、

前記コンクリートが打設可能な有底の第二矩形枠状体を含み、前記第二矩

形棒状体の長手方向に係る両端が熱膨張係数 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 未満の拘束鋼材で拘束された、拘束試験部と、

前記強度試験部、前記無拘束試験部、及び前記無拘束試験部を覆う、断熱性の収容容器と、

前記収容容器内の温度変化を計測可能な温度計とを備え、

前記無拘束試験部は、前記第一矩形棒状体の内部に設置された第一ひずみセンサを有し、

前記拘束試験部は、前記拘束鋼材に設置された第二ひずみセンサを有することを特徴とする。

[0011] 上記評価装置は、第一筒状体、第一矩形棒状体、第二矩形棒状体のそれぞれに、評価対象となるコンクリートが打設されてなる複数の試験体を、断熱性の収容容器内に配置した状態で利用される。ここで、評価対象となるコンクリートとしては、現場で打設されるコンクリートを利用することもできるし、コンクリート工場から供給された、現場で打設される予定のコンクリートと同一材料のコンクリートを利用することもできる。

[0012] 第一筒状体内にコンクリートが打設されることで得られた試験体（強度試験体）は、複数本、収容容器内に設置される。

[0013] 例えば、所定の材齢タイミングが到来するたびに、複数の前記強度試験体に属する対象材齢強度試験体を前記収容容器から取り出して、前記対象材齢強度試験体に対してヤング係数測定試験を実行することにより、コンクリートのヤング係数の経時的な変化態様が算出できる。ヤング係数測定試験は、例えば、JIS A 1149:2017「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した方法で行われる。

[0014] より具体的な例としては、材齢1日、3日、7日、14日、28日が経過するたびに、収容容器から強度試験体を取り出して、上記の試験が実行される。このとき、強度試験体を取り出されたことで生じた隙間（元の強度試験体の占有領域）を埋めるように、断熱性の充填材を収容容器内に設置するものとしても構わない。断熱性の充填材としては、典型的には発泡ビーズ、発

泡スチロール、ロックウール、グラスウール、発泡ウレタン等が利用できる。

- [0015] また、前記対象材齢強度試験体に対して圧縮強度試験を実行することにより、コンクリートの圧縮強度の経時的な変化態様が算出できる。圧縮強度試験は、例えば、JIS A 1108:2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した方法で行われる。圧縮強度試験は、上記のヤング係数測定試験と並行して行うものとしても構わない。なお、このようにして得られた、材齢毎の、コンクリートの圧縮強度とコンクリートのヤング係数とを用いて、両者の相関関係を導出するものとしても構わない。
- [0016] また、前記対象材齢強度試験体に対して割裂引張強度試験を実行することにより、コンクリートの割裂引張強度の経時的な変化態様が算出できる。割裂引張強度試験は、例えば、JIS A 1113:2018「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠した方法で行われる。
- [0017] 同じ材齢の強度試験体に対して、圧縮強度試験と割裂引張強度試験とを実行する場合には、材齢の種類数の2倍以上の強度試験体を準備するのが好適である。例えば、材齢1日、3日、7日、14日、28日が経過するたびに、収容容器から2本以上の強度試験体を取り出して、圧縮強度試験と割裂引張強度試験が行われる。圧縮強度試験とヤング係数測定試験とは、同一の強度試験体に対して並行して実行するものとしても構わない。
- [0018] なお、同一の材齢の複数の強度試験体に対して同一の試験を行うと共に、得られた測定値に基づく演算によって得られた値（例えば平均値）をもって、試験結果で得られた計測値としても構わない。
- [0019] 上述したように、材齢タイミングが到来するたびに、強度試験体が収容容器から取り出される。一方で、無拘束試験体及び拘束試験体については、長期間（例えば25日以上の日数）にわたって収容容器内に載置される。かかる観点から、強度試験体を容易に取り出せるように、収容容器は断熱材からなり取り外し可能な蓋部を有し、強度試験体を、収容容器内において、無拘束試験体及び拘束試験体よりも上方（蓋部に近い側）に設置させるのが好適

である。

[0020] より詳細な一例として、

前記収容容器は、前記蓋部に対向する位置に設置された底部と、前記底部を四方から覆う側部とを有し、

前記無拘束試験部及び前記拘束試験部は、前記底部に沿った方向に配列され、

前記強度試験部に含まれる複数の前記第一筒状体は、前記無拘束試験部に含まれる前記第一矩形棒状体及び前記拘束試験部に含まれる前記第二矩形棒状体の直上に載置された状態で、前記底部に沿った方向に配列されているものとしても構わない。

[0021] 第一矩形棒状体にコンクリートが打設されることで得られた試験体（無拘束試験体）は、内部に第一ひずみセンサが埋め込まれた状態で実現される。第一ひずみセンサとしては、例えば、埋込型のひずみ計を利用することができる。第一ひずみセンサの計測値の経時的な変化を取得することによって、測定対象であるコンクリートの無拘束ひずみの経時的な変化が得られる。

[0022] 第二矩形棒状体にコンクリートが打設されることで得られた試験体（拘束試験体）は、熱膨張係数が $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 未満という、極めて低い拘束鋼材によって拘束された状態で、構成される。拘束鋼材としては、例えばインバー鋼材（熱膨張係数が $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度）を利用することができる。拘束鋼材には、第二ひずみセンサが設置されている。詳細な例としては、拘束鋼材の一部のねじ切り部を切削加工した上で、第二ひずみセンサが固定設置される。例えば、第二ひずみセンサとしてひずみゲージを利用できる。第二ひずみセンサの計測値の経時的な変化を取得することによって、測定対象であるコンクリートの拘束下におけるひずみの経時的な変化が得られる。

[0023] 無拘束試験体及び拘束試験体は、複数の強度試験体と共に、断熱性の収容容器内に収容されている。これらの試験体は、材齢が経過すると共に水和反応が進展することで発熱するため、この発熱に起因して収容容器内の温度が上昇する。その後、水和反応の進展が飽和状態に達すると、収容容器内の温

度上昇の速度は緩和し、更に期間が経過するとやがて外気温と同等の温度まで低下する。つまり、無拘束試験体及び拘束試験体は、断熱性の収容容器内において、同一の温度履歴の下に置かれる。

[0024] 第一ひずみセンサの計測値は、温度履歴に伴うひずみと自己収縮ひずみとが反映された、自由ひずみの値に対応する。一方、拘束鋼材に設置された第二ひずみセンサの計測値は、鋼材ひずみであって、温度履歴に伴うひずみと自己収縮ひずみとが反映された、拘束状態におけるひずみの値に対応する。このため、第一ひずみセンサの計測値と第二ひずみセンサの計測値とに基づいて、より詳細には、第一ひずみセンサの計測値と第二ひずみセンサの計測値との差分値に基づいて、拘束ひずみの値を得ることができる。つまり、測定対象であるコンクリートの、拘束ひずみの経時的な変化が得られる。

[0025] 拘束鋼材とコンクリートとの間の力のつり合いと、ひずみの適合条件に係る関係から、コンクリートに生じる拘束応力は、拘束試験体内の拘束鋼材の比率（鋼材比）と、拘束鋼材のヤング係数と、拘束状態におけるひずみの値とに基づく演算によって算出できる。上述したように、拘束状態におけるひずみの値としては、第二ひずみセンサの計測値を利用することができる。拘束鋼材のヤング係数は、拘束鋼材として利用した鋼材の物性値を利用できる。鋼材比は、拘束試験部を構成する第二矩形棒状体の長手方向に係る端部の面積と、拘束鋼材の横断面積との比率の値を利用できる。

[0026] このようにして、測定対象となるコンクリートの拘束ひずみの経時的な変化態様と、拘束応力の経時的な変化態様とが得られると、両者の相関関係に基づいて、昇温時及び降温時のそれぞれにおける、見かけヤング係数が算出できる。拘束応力と拘束ひずみとは、昇温時、降温時のそれぞれにおいて、ほぼ直線的な相関性を示す。このため、それぞれの相関関係を例えば最小二乗法に基づいて直線的に近似して、その傾きを導出することによって、昇温時、降温時のそれぞれにおける、測定対象となるコンクリートの見かけヤング係数とすることができる。この見かけヤング係数は、時々刻々と変化する拘束応力の下での弾性ひずみとクリープひずみの双方が考慮されたヤング係

数と見なすことができる。

- [0027] 一方で、上述したように、材齢の異なる複数の強度試験体に対して、それぞれヤング係数測定試験が実行されることにより、測定対象となるコンクリートの、実際のヤング係数の経時的な変化が得られる。日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針2016」（以下、単に「制御指針」と略記する。）によれば、クリープの影響はヤング係数に低減係数を乗じた有効ヤング係数による剛性低下として考慮される。このことから、ヤング係数測定試験によって得られた実際のヤング係数と、（昇温時、降温時それぞれの）見かけヤング係数との比率とによって、測定対象となるコンクリートの、（昇温時、降温時のそれぞれの）ヤング係数の低減係数を算出することができる。
- [0028] 上記の制御指針によれば、コンクリートに利用されるセメントの種類や配合等にかかわらず、昇温時と降温時のそれぞれで一律に定められたヤング係数の低減係数の値が用いられている。これに対し、本発明に係る評価装置を利用すれば、測定対象となるコンクリートに特有のヤング係数の低減係数が得られるため、この値を数値解析に利用することで、マスコンクリートの温度ひび割れのリスクを、より精度よく評価することが可能となる。
- [0029] また、上記の評価装置には、収容容器内の温度変化を計測可能な温度計が備えられている。このため、温度計の計測値の変化履歴を取得することで、有効材齢を算出できる。つまり、収容容器から強度試験体を取り出したときの材齢と、有効材齢との関係を得ることができる。
- [0030] このように得られた、収容容器から強度試験体を取り出したときの材齢と有効材齢との相関関係に関する情報を用いて、種々の相関情報を得ることができる。例えば、材齢毎に取り出された強度試験体に対して圧縮強度試験を実行することによって得られた、コンクリートの圧縮強度の経時的な変化態様と、コンクリートの有効材齢との相関関係を得ることができる。また、例えば、材齢毎に取り出された強度試験体に対して割裂引張強度試験を実行することによって得られた、コンクリートの割裂引張強度の経時的な変化態様

と、コンクリートの有効材齢との相関関係を得ることができる。

[0031] 収容容器内に設置した状態から、25日以上が経過した後に無拘束試験体を収容容器から取り出して、断熱環境下で温度変化（例えば、外気温から60℃程度まで）を与えながら第一ひずみセンサの計測値を読み取って、温度と第一ひずみセンサの計測値との関係を得るものとしても構わない。

[0032] 25日以上が経過した後の無拘束試験体は、その後に温度変化を与えても、水和反応に伴う追加的な自己収縮ひずみが発生しないと考えられる。つまり、25日以上が経過した後の無拘束試験体に対して温度変化を生じさせて、温度と第一ひずみセンサの計測値との相関性を得ることによって、コンクリートの温度ひずみに関する情報を得ることができる。詳細には、温度と第一ひずみセンサの計測値との関係から、コンクリートの熱膨張係数が得られる。典型的には、温度と第一ひずみセンサの計測値とは、ほぼ直線的な相関性を示すため、例えば、温度と第一ひずみセンサの計測値との相関関係を最小二乗法に基づいて直線的に近似して、その傾きを導出することによって、コンクリートの熱膨張係数が得られる。

[0033] 一方で、収容容器内に設置された状態の無拘束試験体に設けられた第一ひずみセンサの計測値は、収容容器内の温度履歴に基づく温度ひずみと自己収縮ひずみとが反映された値である。収容容器内に無拘束試験体が設置された状態における温度変化の値に、上記方法で算出したコンクリートの熱膨張係数を乗じることで、収容容器内に設置された無拘束試験体に生じていた温度ひずみの値を導出できる。よって、収容容器内に設置された状態の無拘束試験体に設けられた第一ひずみセンサの計測値から、上記温度ひずみの値を差し引くことによって、無拘束試験体の自己収縮ひずみの経時的な変化態様が得られる。この自己収縮ひずみは、測定対象のコンクリートの自己収縮ひずみである。

[0034] よって、上述した方法で得られた材齢と有効材齢との相関関係に関する情報に基づいて、測定対象のコンクリートの有効材齢と自己収縮ひずみとの相関関係を得ることができる。コンクリートの有効材齢と自己収縮ひずみとの

相関関係に関する情報は、当該コンクリートを用いて実際の構造物を建設した場合の、温度ひび割れリスクを、3D-FEM解析で評価する際に利用することができる。

[0035] 上記評価装置において、温度計は、収容容器内の温度が計測されればその設置位置は不問であるが、コンクリートの温度を精度よく計測するという観点からは、前記強度試験部、前記無拘束試験部及び前記拘束試験部のうちの少なくとも一方に取り付けられているのが好適である。ただし、上述したように、材齢毎に強度試験体を取り出されるため、強度試験部に温度計を設置する場合には、収容容器から取り出されるタイミングが最も遅い強度試験体に設置するのが好ましい。

[0036] なお、拘束試験体には、コンクリートと拘束鋼材とが含まれ、拘束鋼材はコンクリートと比べて、比熱、熱伝導率、及び熱容量が異なる。一方で、無拘束試験体には拘束鋼材が含まれていない。このため、コンクリートの温度を精度よく計測するという観点からは、拘束試験体よりも無拘束試験体に温度計を設置するのがより好ましい。

[0037] 更に、上述したように、無拘束試験体の自己収縮ひずみを求める場合には、無拘束試験体に生じていた温度ひずみの値から算出するため、この精度を高める観点からも、無拘束試験体に温度計が設置されているのがより好ましい。更には、上記のように、熱膨張係数を計測するために、収容容器から取り出された無拘束試験体に対して断熱試験を計測する観点からも、少なくとも無拘束試験部に温度計が取り付けられているのがより好ましい。

[0038] 収容容器内に設置された拘束試験体及び無拘束試験体は、同一容器内に設置された複数の強度試験体の水和反応による発熱に起因した温度履歴が与えられる。例えば、拘束試験体又は無拘束試験体に温度計が設置されている場合には、材齢毎の温度変化の態様を取得できる。よって、材齢と、拘束試験体又は無拘束試験体に取り付けられた温度計の計測値との関係を逆解析することによって、測定対象のコンクリートの断熱温度上昇特性を得ることができる。コンクリートの断熱温度上昇特性に関する情報は、当該コンクリート

を用いて実際の構造物を建設した場合の、温度ひび割れリスクを、3D-FEM解析で評価する際に利用することができる。

[0039] ところで、コンクリートの物性の中でもクリープ特性については、実験又は数値解析を通じた取得が難しい。よって、クリープの影響をヤング係数の低減係数で評価して用いることが多い。

[0040] 一方で、個々のコンクリートに関して、ヤング係数の低減係数を定めることは容易ではない。このため、現在は、日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針2016」（以下、単に「制御指針」と略記する。）等に提示されている、ヤング係数の低減係数が全てのコンクリートに対して適用されるのが通常である。

[0041] しかし、実際には、コンクリートに利用されるセメントの種類や配合等に応じて、ヤング係数の低減係数の値が変化することが予想される。したがって、上記の制御指針で規定されているヤング係数の低減係数の値を一律で採用し、当該値に基づいてマスコンクリートの温度ひび割れのリスクを評価すると、そのリスク評価の精度が十分に担保されない可能性も考えられる。

[0042] 上記の評価装置は、測定対象となるコンクリートの性状を考慮した状態で、ヤング係数の低減係数を含むコンクリートの物性値を推定する方法の一手段として活用することができる。ただし、コンクリートの物性値を推定する方法の実施手段としては、上記評価装置を用いない方法も可能である。以下、この推定方法について説明する。

[0043] この推定方法は、測定対象であるコンクリートの物性値の推定方法であって、

前記コンクリートを打設して得られた複数の試験体を、温度上昇及び温度下降を含む温度履歴を有する、一以上の断熱性の収容容器内に設置する工程（a）と、

所定の材齢タイミングが到来する毎に、前記複数の試験体に属する強度試験体に対してヤング係数測定試験を実行して、前記コンクリートのヤング係数の経時的な変化態様を算出する工程（b）と、

前記複数の試験体のうち、無拘束状態の枠体に前記コンクリートを打設して得られた無拘束試験体に取り付けられた第一ひずみセンサの計測値である第一ひずみ値を取得する工程（c）と、

前記複数の試験体のうち、拘束鋼材で拘束された枠体に前記コンクリートを打設して得られた拘束試験体に取り付けられた第二ひずみセンサの計測値である第二ひずみ値を取得する工程（d）と、

前記第一ひずみ値と前記第二ひずみ値とに基づいて、前記コンクリートの拘束ひずみ値の経時的な変化態様を算出する工程（e）と、

前記拘束試験体が有する前記拘束鋼材に基づく値と前記第二ひずみ値とに基づいて、前記コンクリートの拘束応力の経時的な変化態様を算出する工程（f）と、

前記拘束ひずみ値と前記拘束応力との相関関係に基づいて、昇温時及び降温時のそれぞれにおける見かけヤング係数を算出する工程（g）と、

前記工程（b）で得られた前記ヤング係数と、前記工程（g）で得られた前記見かけヤング係数との比率に基づいて、昇温時及び降温時のそれぞれにおけるヤング係数の低減係数を導出する工程（h）とを有することを特徴とする。

[0044] ここで、評価対象となるコンクリートとしては、現場で打設されるコンクリートを利用することもできるし、コンクリート工場から供給された、現場で打設される予定のコンクリートと同一材料のコンクリートを利用することもできる。

[0045] 例えば、所定の材齢タイミングが到来するたびに、強度試験体を収容容器から取り出してヤング係数測定試験を実行することにより、コンクリートのヤング係数の経時的な変化態様が算出できる。ヤング係数測定試験は、例えば、JIS A 1149：2017「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した方法で行われる。より具体的な例としては、材齢1日、3日、7日、14日、28日が経過するたびに、収容容器から強度試験体を取り出して、上記の試験が実行される。

- [0046] なお、同一の材齢の複数の強度試験体に対して同一の試験を行うと共に、得られた測定値に基づく演算によって得られた値（例えば平均値）をもって、試験結果で得られた計測値としても構わない。
- [0047] 無拘束試験体は、第一ひずみセンサが取り付けられた状態で、無拘束状態の枠体にコンクリートが打設されて得られた試験体である。より詳細には、無拘束試験体は、第一ひずみセンサを無拘束状態の枠体の内側に設置した状態で、第一ひずみセンサを埋設するようにコンクリートを打設することで得られる。第一ひずみセンサとしては、例えば、埋込型のひずみ計を利用することができる。工程（c）において、第一ひずみセンサの計測値の経時的な変化を取得することによって、測定対象であるコンクリートの無拘束ひずみの経時的な変化が得られる。
- [0048] 拘束試験体は、第二ひずみセンサが取り付けられた状態で、拘束鋼材によって拘束された枠体にコンクリートが打設されて得られた試験体である。より詳細には、拘束試験体は、第二ひずみセンサを拘束鋼材に固定的に取り付けた状態で、拘束鋼材を埋設するようにコンクリートを打設することで得られる。
- [0049] 拘束鋼材としては、熱膨張係数が極めて低い材料が好適に利用され、好ましくは、熱膨張係数が $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 未満である。このような拘束鋼材としては、例えばインバー鋼材（熱膨張係数が $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度）を利用することができる。
- [0050] 詳細な例としては、拘束鋼材の一部のねじ切り部を切削加工した上で、第二ひずみセンサが固定設置される。例えば、第二ひずみセンサとしてひずみゲージを利用できる。工程（d）において、第二ひずみセンサの計測値の経時的な変化を取得することによって、測定対象であるコンクリートの拘束下におけるひずみの経時的な変化が得られる。
- [0051] 無拘束試験体及び拘束試験体は、断熱性の収容容器内において、同一の温度履歴の下に置かれる。
- [0052] 第一ひずみセンサの計測値は、温度履歴に伴うひずみと自己収縮ひずみと

が反映された、自由ひずみの値に対応する。一方、拘束鋼材に設置された第二ひずみセンサの計測値は、鋼材ひずみであって、温度履歴に伴うひずみと自己収縮ひずみとが反映された、拘束状態におけるひずみの値に対応する。このため、工程（e）において、第一ひずみセンサの計測値と第二ひずみセンサの計測値とに基づいて、拘束ひずみの値を得ることができる。工程（e）の具体的な方法としては、第一ひずみセンサの計測値と第二ひずみセンサの計測値との差分値を算出する方法を利用することができる。この工程（e）により、測定対象であるコンクリートの、拘束ひずみの経時的な変化が得られる。

[0053] 工程（f）では、拘束鋼材とコンクリートとの間の力のつり合いと、ひずみの適合条件に係る関係を利用することで、工程（d）で得られた第二ひずみ値、すなわち、拘束状態におけるひずみの値から、コンクリートに生じる拘束応力が算出される。より具体的には、コンクリートに生じる拘束応力は、拘束試験体内の拘束鋼材の比率（鋼材比）と、拘束鋼材のヤング係数と、拘束状態におけるひずみの値とに基づく演算によって算出できる。拘束鋼材のヤング係数は、拘束鋼材として利用した鋼材の物性値を利用できる。鋼材比は、例えば、拘束試験体を構成する枠体の、拘束鋼材の延在方向に係る端部の面積と、拘束鋼材の横断面積との比率の値を利用できる。

[0054] このようにして、測定対象となるコンクリートの拘束ひずみの経時的な変化態様と、拘束応力の経時的な変化態様とが得られると、工程（g）では、両者の相関関係に基づいて、昇温時及び降温時のそれぞれにおける、見かけヤング係数が算出される。拘束応力と拘束ひずみとは、昇温時、降温時のそれぞれにおいて、ほぼ直線的な相関性を示す。このため、それぞれの相関関係を例えば最小二乗法に基づいて直線的に近似して、その傾きを導出することによって、昇温時、降温時のそれぞれにおける、測定対象となるコンクリートの見かけヤング係数とすることができる。この見かけヤング係数は、時々刻々と変化する拘束応力の下での弾性ひずみとクリープひずみの双方が考慮されたヤング係数と見なすことができる。

[0055] 上述したように、工程（b）では、材齢の異なる複数の強度試験体に対して、それぞれヤング係数測定試験が実行されることにより、測定対象となるコンクリートの、実際のヤング係数の経時的な変化が得られる。制御指針によれば、クリープの影響はヤング係数に低減係数を乗じた有効ヤング係数による剛性低下として考慮される。このことから、工程（h）において、ヤング係数測定試験によって得られた実際のヤング係数と、（昇温時、降温時それぞれの）見かけヤング係数との比率に基づいて、測定対象となるコンクリートの、（昇温時、降温時のそれぞれの）ヤング係数の低減係数が算出される。このように算出されたヤング係数の低減係数は、測定対象となるコンクリートに特有の性状が反映された値である。よって、例えば、この値を数値解析に利用することで、マスコンクリートの温度ひび割れのリスクを、より精度よく評価することが可能となる。

[0056] 前記工程（a）は、複数の前記強度試験体と、1以上の前記無拘束試験体と、1以上の前記拘束試験体とを、同一の前記収容容器内に設置する工程であり、

前記温度履歴は、前記収容容器内に設置された複数の前記強度試験体からの発熱に基づいて得られるものとしても構わない。

[0057] この場合、無拘束試験体及び拘束試験体は、複数の強度試験体と共に、同一の断熱性の収容容器内に収容される。これらの試験体は、材齢が経過すると共に水和反応が進展することで発熱するため、この発熱に起因して収容容器内の温度が上昇する。その後、水和反応の進展が飽和状態に達すると、収容容器内の温度上昇の速度は緩和し、更に期間が経過するとやがて外気温と同等の温度まで低下する。つまり、無拘束試験体及び拘束試験体は、断熱性の収容容器内において、同一の温度履歴の下に置かれる。

[0058] よって、上記方法によれば、それぞれに同一の温度履歴が設定された、複数の収容容器を予め準備する必要がなく、推定のための準備工程が簡素化される。

発明の効果

[0059] 本発明の評価装置によれば、現場で利用されるコンクリートと同材料のコンクリートを利用しながらも、簡易な方法によって、多様なコンクリートの物性値を取得することができる。

図面の簡単な説明

[0060] [図1]本発明に係る評価装置の一実施形態の構成外観を模式的に示す斜視図である。

[図2]図1に示す評価装置の模式的な断面図である。

[図3]図1に示す評価装置から蓋部を取り外した状態の模式的な平面図である。

[図4]図3に示す状態から強度試験体を取り外した状態の模式的な平面図である。

[図5]強度試験体の構成を模式的に示す斜視図である。

[図6]無拘束試験体の構成を模式的に示す平面図である。

[図7]拘束試験体の構成を模式的に示す平面図である。

[図8]経過日数とヤング係数の相関性を模式的に示すグラフである。

[図9]実施例1のコンクリートを用いて計測された、有効材齢とヤング係数の相関性を示すグラフである。

[図10]実施例1のコンクリートを用いて計測された、有効材齢と圧縮強度の相関性を示すグラフである。

[図11]実施例1のコンクリートを用いて計測された、圧縮強度とヤング係数の相関性を示すグラフである。

[図12]実施例1のコンクリートを用いて計測された、圧縮強度と割裂引張強度の相関性を示すグラフである。

[図13]第一ひずみセンサ及び第二ひずみセンサの計測値の経時的な変化の態様を模式的に示すグラフである。

[図14]実施例1のコンクリートを用いたときの、第一ひずみセンサ及び第二ひずみセンサの計測値の経時的な変化の態様を示すグラフである。

[図15]拘束応力の経時的な変化の態様を模式的に示すグラフである。

[図16]拘束応力と拘束ひずみとの相関性を模式的に示すグラフである。

[図17]実施例1のコンクリートを用いたときの、第一ひずみセンサ及び第二ひずみセンサの計測値に基づいて算出された、拘束応力と拘束ひずみとの相関性を示すグラフである。

[図18]実施例1のコンクリートを用いて計測された拘束応力と拘束ひずみとの相関性と、有効材齢とヤング係数の相関性とに基づいて導出された、ヤング係数の低減係数と有効材齢との相関性を示すグラフである。

[図19]実施例1のコンクリートに対する断熱試験が実施されたときの、第一ひずみセンサの計測値と温度との関係を示すグラフである。

[図20]実施例1のコンクリートを用いた計測値に基づいて導出された、自己収縮ひずみと有効材齢との関係を示すグラフである。

[図21]収容容器内に設置された測定対象のコンクリートの材齢と温度上昇量との関係を模式的に示すグラフである。

[図22]図21に示す結果を逆解析することで得られる、測定対象のコンクリートの断熱温度上昇特性を模式的に示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0061] <第一実施形態>

本発明に係る評価装置は、測定対象であるコンクリートの特性評価を行うための装置である。詳細には、所定領域に測定対象となるコンクリートが打ち込まれてなる複数の試験体が内部に収容された状態で利用される。

[0062] 以下において、本発明に係る評価装置及びその利用方法の実施形態について、適宜図面を参照して説明する。ただし、以下の図面は模式的に示されたものであり、図面上の寸法比は実際の寸法比と一致していない。また、各図面間においても、寸法比は必ずしも一致していない。

[0063] [評価装置の構成]

図1は、評価装置の外観を模式的に示す斜視図である。評価装置1は、蓋部2と収容容器3を含む。蓋部2及び収容容器3は、いずれも断熱材からなり、例えば発泡スチロールで形成されている。蓋部2は、収容容器3から取

り外し可能である。

- [0064] 以下の説明においては、図 1 に併記された X-Y-Z 座標系が参照される。また、以下の説明では、方向を表現する際に正負の向きを区別する場合には、「+Z 方向」、「-Z 方向」のように、正負の符号を付して記載される。また、正負の向きを区別せずに方向を表現する場合には、単に「Z 方向」と記載される。すなわち、本明細書において、単に「Z 方向」と記載されている場合には、「+Z 方向」と「-Z 方向」の双方が含まれる。典型的には、+Z 方向が鉛直上向き方向である。
- [0065] 図 2 は、図 1 に示す評価装置 1 を、所定の Y 座標の位置で X-Z 平面で切断したときの模式的な断面図である。図 3 は、図 1 に示す評価装置 1 から蓋部 2 を取り外し、+Z 側から-Z 方向に評価装置 1 を見たときの模式的な平面図である。
- [0066] 図 2～図 3 に示すように、収容容器 3 は、蓋部 2 に対して Z 方向に対向する位置に設置された底部 3 b と、四方から底部 3 b の上方を覆う側部 3 a とを有し、側部 3 a 及び底部 3 b で囲まれた領域の内側に、各試験体（10, 20, 30）が設置される。
- [0067] 評価装置 1 は、収容容器 3 内に、強度試験体 10、無拘束試験体 20、及び拘束試験体 30 が設置された状態で利用される。図 2～図 3 に示すように、本実施形態の評価装置 1 では、複数の強度試験体 10 が、無拘束試験体 20 及び拘束試験体 30 よりも蓋部 2 に近い側に設置されている。図 3 には、30 本の強度試験体 10 が評価装置 1 内に設置されている例が図示されている。
- [0068] 図 4 は、図 2 の状態から複数の強度試験体 10 を取り外して、+Z 側から-Z 方向に評価装置 1 を見たときの模式的な平面図である。図 2 及び図 4 に示すように、本実施形態の評価装置 1 では、無拘束試験体 20 及び拘束試験体 30 が、底部 3 b 側に位置して、底部 3 b の面（X-Y 平面）に沿って配列されている。図 4 には、2 本の無拘束試験体 20 と 2 本の拘束試験体 30 とが評価装置 1 内に設置されている例が図示されている。

- [0069] 図5は、強度試験体10の構成を模式的に示す斜視図である。強度試験体10は、例えば、ブリキ製又はプラスチック製の円筒状の筒体11を有し、筒体11の内部空間12に、測定対象となるコンクリートが打ち込まれることで形成される。筒体11の寸法は任意であるが、一例として、直径が10cm、高さが20cmである。図3には、同一寸法の筒体11の内部空間12に、測定対象となる同材料のコンクリートが打ち込まれてなる30本の強度試験体10が、收容容器3内に設置された状態が示されている。筒体11が「第一筒状体」に対応する。
- [0070] 図2～図3に示すように、複数の強度試験体10の間には、筒体11の内部空間12の断熱性を確保する目的で、発泡ビーズ、内部空間12の形状に成型した発泡スチロール、スプレー式の発泡ウレタン、ロックウール、グラスウール等からなる断熱性の充填材6が充填されている。
- [0071] 図6は、無拘束試験体20の構成を模式的に示す平面図である。無拘束試験体20は、木製又は合板製等の有底矩形状の枠体21を有し、枠体21の内部空間23には、第一ひずみセンサ25が設置されている。そして、この枠体21の内部空間23内に、第一ひずみセンサ25を埋め込むようにして、測定対象となるコンクリートが打ち込まれることで、無拘束試験体20が形成される。第一ひずみセンサ25としては、例えば、埋込型のひずみ計を利用することができる。枠体21が「第一矩形枠状体」に対応する。
- [0072] 枠体21の寸法は任意であるが、一例として、10cm×10cm×80cmの直方体形状である。
- [0073] 枠体21によってコンクリートが変形するのを抑制する観点から、枠体21の長手方向に係る側面にポリスチレン等からなる緩衝ボードが取り付けられ、短手方向に係る側面及び底面にポリエステル等からなる緩衝フィルムが取り付けられるものとしても構わない。
- [0074] 図6の例では、第一ひずみセンサ25には信号線27が取り付けられており、第一ひずみセンサ25の計測値を、連続的又は断続的に読み出し可能に構成されている。ただし、第一ひずみセンサ25の計測値が、連続的又は断

続的に読み出し可能な態様であれば、有線接続には限定されず、無線接続であっても構わない。

[0075] 第一ひずみセンサ 25 は、好ましくは測温機能が搭載された埋込型のひずみ計で構成される。第一ひずみセンサ 25 が測温機能を有しない場合、枠体 21 に熱電対（不図示）が搭載されることで、無拘束試験体 20 の温度が計測可能に構成されているものとしても構わない。

[0076] 図 7 は、拘束試験体 30 の構成を模式的に示す平面図である。拘束試験体 30 は、短手方向に対向して配置された一对の側板 31 と、長手方向に対向して配置された一对の端板 32 と、図示しない底板とによって、有底矩形状の枠体が形成される。この枠体が「第二矩形枠状体」に対応する。

[0077] 一对の端板 32 同士は、拘束鋼材 34 によって固定的に連結されている。端板 32 と拘束鋼材 34 とは、例えば溶接によって固定されている。側板 31 及び底板は、例えば木又は合板等からなる。また、端板 32 及び拘束鋼材 34 は、熱膨張係数が $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 未満の、極めて低い鋼材からなる。具体的な一例として、端板 32 及び拘束鋼材 34 は、インバー鋼、タングステン等からなり、好ましくはインバー鋼からなる。

[0078] 拘束試験体 30 において、拘束鋼材 34 の鋼材比は好ましくは 0.5%～6% である。ここで、拘束鋼材 34 の鋼材比は、端板 32 の面積に対する拘束鋼材 34 の横断面積との比率の値とすることができる。

[0079] 拘束鋼材 34 には、第二ひずみセンサ 35 が設置されている。第二ひずみセンサ 35 としては、例えばひずみゲージを利用できる。また、図 7 の例では、拘束鋼材 34 に熱電対からなる温度計 36 が取り付けられている。ただし、拘束試験体 30 が温度計 36 を有するか否かは任意である。

[0080] 側板 31、端板 32、及び底板によって形成される有底枠体の外形寸法は任意であるが、例えば、 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 80\text{ cm}$ の直方体形状である。この有底枠体の内部空間 33 内に、拘束鋼材 34 を埋め込むようにして測定対象となるコンクリートが打ち込まれることで、拘束試験体 30 が形成される。

- [0081] 側板 3 1 及び底板には、ポリエステル等からなる緩衝フィルムが取り付けられているものとしても構わない。端板 3 2 は、コンクリートが打ち込まれてから初期の時点で、発熱に伴ってコンクリートが膨張した場合に、端板 3 2 によって膨張力を受け止めて、膨張応力を精度よく測定する目的で設けられている。
- [0082] 図 7 の例では、第二ひずみセンサ 3 5 には信号線 3 7 が取り付けられており、第二ひずみセンサ 3 5 の計測値を、連続的又は断続的に読み出し可能に構成されている。ただし、第二ひずみセンサ 3 5 の計測値が、連続的又は断続的に読み出し可能な態様であれば、有線接続には限定されず、無線接続であっても構わない。なお、温度計 3 6 で計測された温度情報についても、第二ひずみセンサ 3 5 の計測値と同様に、連続的又は断続的に読み出し可能に構成されているものとして構わない。
- [0083] 以上説明したように、評価装置 1 は、コンクリートが打ち込まれる前の状態においては、断熱性の収容容器を構成する収容容器 3 の内部に、複数の筒体 1 1 と、第一ひずみセンサ 2 5 が内部空間 2 3 に設置された枠体 2 1 と、第二ひずみセンサ 3 5 が取り付けられた拘束鋼材 3 4 が内部空間 3 3 に固定された枠体（3 1， 3 2）とが配置されている。
- [0084] 筒体 1 1 は、強度試験部を構成し、筒体 1 1 の内部空間 1 2 に評価対象となるコンクリートが打ち込まれることで、強度試験体 1 0 を形成する。枠体 2 1 及び第一ひずみセンサ 2 5 は、無拘束試験部を構成し、枠体 2 1 の内部空間 2 3 に評価対象となるコンクリートが打ち込まれることで、無拘束試験体 2 0 を形成する。枠体（3 1， 3 2）、拘束鋼材 3 4、及び第二ひずみセンサ 3 5 は、拘束試験部を構成し、枠体（3 1， 3 2）、の内部空間 3 3 に評価対象となるコンクリートが打ち込まれることで、拘束試験体 3 0 を形成する。
- [0085] 図 4 では、X-Y 平面方向に、無拘束試験体 2 0 及び拘束試験体 3 0 を配列することで、収容容器 3 の側面で囲まれた内部空間をほぼ閉塞するように図示されている。無拘束試験体 2 0 を構成する枠体 2 1 の外形寸法、及び拘

束試験体 30 を構成する枠体 (31, 32) の外形寸法に応じて、収容容器 3 の外形寸法が適宜設定されるものとして構わない。ただし、X-Y 平面方向に、無拘束試験体 20 及び拘束試験体 30 を隙間なく配列したときに、収容容器 3 の側部 3a と、各試験体 (20, 30) との間に隙間が生じる場合には、当該隙間に、断熱性の充填材 6 を充填するものとしても構わない。

[0086] [評価装置の利用方法]

評価装置 1 を利用するに際しては、それぞれの試験部に評価対象となるコンクリートが打ち込まれて形成された各試験体 (強度試験体 10、無拘束試験体 20、拘束試験体 30) が、評価装置 1 の収容容器 3 の内側空間に設置される。そして、蓋部 2 が収容容器 3 の上方を覆うように配置される。

[0087] より具体的には、無拘束試験体 20 及び拘束試験体 30 が、底部 3b の面上に、設置される。そして、これらの試験体 (20, 30) の上面に、複数の強度試験体 10 が、X-Y 平面方向に沿って配列される。無拘束試験体 20 及び拘束試験体 30 は、+Z 側の開放面に、例えば、ポリエステル等からなる緩衝フィルムが取り付けられていてもよい。

[0088] 各試験体 (10, 20, 30) を評価装置 1 内に設置した後、所定の材齢タイミングが到来するたびに、強度試験体 10 が取り出される。強度試験体 10 が取り出された後には、強度試験体 10 が取り出されたことで生じた隙間を埋めるように、断熱性の充填材 6 を収容容器 3 内に設置するのが好適である。

[0089] 例えば、材齢 1 日、3 日、7 日、14 日、28 日が経過するたびに、収容容器から強度試験体 10 が取り出される。取り出された各材齢の強度試験体 10 を用いて、ヤング係数測定試験が行われることで、測定対象のコンクリートに関する、ヤング係数と材齢との関係が得られる (例えば、図 8 参照)。なお、ヤング係数測定試験は、例えば、JIS A 1149:2017「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した方法で行うことができる。

[0090] 上述したように、収容容器 3 内に設置された、無拘束試験体 20 及び拘束試験体 30 のうち、少なくとも一方には、測温機能 (温度計) が搭載されて

いる。収容容器 3 の内部空間は、断熱部材で覆われているため、例えば、無拘束試験体 20 に搭載された、測温機能が搭載された埋込型のひずみ計からなる第一ひずみセンサ 25 から読み取られた温度履歴は、収容容器 3 内の温度履歴とみなすことができる。また、例えば、拘束試験体 30 に搭載された温度計 36 から読み取られた温度履歴は、収容容器 3 内の温度履歴とみなすことができる。別の例として、収容容器 3 内に、別途の温度計が搭載されているものとしてもよく、この場合、当該温度計から読み取られた温度履歴は、収容容器 3 内の温度履歴とみなすことができる。

[0091] つまり、評価装置 1 によれば、収容容器 3 内の温度履歴に関する情報が得られる。この温度履歴に関する情報に基づけば、収容容器 3 内に設置された試験体の設置期間（実材齢）と、有効材齢との関係を得ることができる。一例として、マスコンクリートのひび割れ制御指針で規定された、下記（１）式のアレニウス則に基づいて、有効材齢 t_e が算出される。

[0092] [数1]

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left\{ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} \right\} \quad (1)$$

[0093] なお、（１）式において、 Δt_i は所定のコンクリートの温度が継続する期間（日）を指し、 $T(\Delta t_i)$ は、 Δt_i の間にわたって継続するコンクリートの温度（℃）を指す。

[0094] 実施例として、以下の表 1 に示す使用材料を表 2 に示す配合で含むコンクリートを評価対象のコンクリートとして各試験部に打ち込んで、試験体（10, 20, 30）を生成し、評価装置 1 内に設置した。

[0095]

[表1]

使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm ³ 比表面積：3310 cm ² /g
膨張材	EX	石灰系膨張材 密度：3.14 g/cm ³
細骨材	S	御前崎産陸砂 表乾密度：2.59 g/cm ³ 吸水率：1.63%
粗骨材	G	岩瀬産碎石 最大寸法：20mm 表乾密度：2.64 g/cm ³ 吸水率：0.84%
AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系 密度：1.09 g/cm ³

[0096] [表2]

コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	EX	S	G	SP
15±2.5	4.5±1.5	55	47	175	288	30	830	951	0.636

[0097] 実施例1のコンクリートを用いて評価装置1内に各試験体を設置し、温度計から計測された温度履歴に基づいて、評価装置1内における材齢（設置期間）と有効材齢との関係を取得した。そして、所定の材齢が到来する毎に収容容器3から取り出された強度試験体10に対してヤング係数測定試験を行って測定されたヤング係数と、有効材齢との相関関係を取得した。図9に、ヤング係数と有効材齢の相関関係を示す。

[0098] ヤング係数測定試験と圧縮強度試験とは並行して行うことができる。このため、材齢毎に取り出された強度試験体10に対して、圧縮強度試験が行われることで、測定対象のコンクリートに関する、圧縮強度と材齢との関係が

得られる。圧縮強度試験は、例えば、JIS A 1108 : 2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した方法で行われる。更に、材齢と有効材齢との関係が上記のとおり得られるため、圧縮強度と有効材齢との関係を得ることができる。図10は、実施例1のコンクリートを用いて計測された、圧縮強度と有効材齢の相関関係を示すグラフである。また、図9及び図10に示した結果に基づいて、ヤング係数と圧縮強度との相関関係を導出しても構わない。図11は、実施例1のコンクリートを用いて計測された、圧縮強度とヤング係数の相関関係を示すグラフである。

[0099] 圧縮強度試験を行う材齢と同じ材齢で、収容容器3から強度試験体10を取り出し、各材齢の強度試験体10を用いて、割裂引張強度試験を行うものとしても構わない。この場合、同一材齢の強度試験体10に対して、割裂引張強度試験とヤング係数測定試験（及び圧縮強度試験）とを実施する観点から、試験を行う材齢の種類数の2倍以上の本数の強度試験体10を評価装置1内に設置するのが好適である。

[0100] 割裂引張強度試験は、例えば、JIS A 1113 : 2018「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠した方法で行われる。上述したように、材齢と有効材齢との関係が得られるため、割裂引張強度と有効材齢との関係を得ることができる。

[0101] よって、同一の有効材齢における圧縮強度と割裂引張強度とを対比することとで、圧縮強度と割裂引張強度との関係を得ることもできる。図12は、実施例1のコンクリートを用いて計測された、圧縮強度と割裂引張強度との相関関係を示すグラフである。

[0102] 収容容器3は、断熱性を有した状態で保持されており、内部には複数の試験体（10，20，30）が配置されている。これらの試験体（10，20，30）は、材齢が経過すると共に水和反応が進展することで発熱するため、この発熱に起因して収容容器3内の温度が上昇する。その後、水和反応の進展が飽和状態に達すると、収容容器3内の温度上昇の速度は緩和し、更に期間が経過すると、外気温と同等の温度まで低下する。つまり、無拘束試験

体 2 0 及び拘束試験体 3 0 は、断熱性の収容容器 3 内において、同一の温度履歴の下に置かれる。

[0103] 無拘束試験体 2 0 に搭載された第一ひずみセンサ 2 5 から読み取られたひずみ値の経時的な変化は、上記温度履歴に置かれた状態の下での、測定対象のコンクリートの無拘束ひずみの経時的な変化に対応する。拘束試験体 3 0 に搭載された第二ひずみセンサ 3 5 から読み取られたひずみ値の経時的な変化は、上記温度履歴に置かれた測定対象のコンクリートの、拘束下のひずみの経時的な変化に対応する。図 1 3 は、第一ひずみセンサ 2 5 の計測値の変化態様及び第二ひずみセンサ 3 5 の計測値の変化態様を模式的に示したグラフである。また、図 1 4 は、実施例 1 のコンクリートを用いた無拘束試験体 2 0 に搭載された第一ひずみセンサ 2 5 の計測値 S_1 の変化態様と、実施例 1 のコンクリートを用いた拘束試験体 3 0 に搭載された第二ひずみセンサ 3 5 の計測値 S_2 の変化態様を示すグラフである。

[0104] 第一ひずみセンサ 2 5 の計測値 S_1 は、上記の温度履歴に伴うひずみと自己収縮ひずみとが反映された自由ひずみの値に対応する。一方、第二ひずみセンサ 3 5 の計測値 S_2 は、温度履歴に伴うひずみと自己収縮ひずみとが反映された、拘束状態におけるひずみの値に対応する。よって、第一ひずみセンサ 2 5 の計測値 S_1 と第二ひずみセンサ 3 5 の計測値 S_2 との差分値 S_3 を算出することで、測定対象であるコンクリートの、拘束ひずみ ε_s の経時的な変化が得られる。

[0105] また、拘束鋼材 3 4 と拘束試験体 3 0 内に打設されたコンクリートとの力のつり合い関係により、拘束応力を求めることができる。例えば、拘束応力 F は、以下の (2) 式によって算出できる。(2) 式において、 E_s は拘束鋼材 3 4 のヤング係数に対応し、 p は拘束試験体 3 0 における拘束鋼材 3 4 の鋼材比に対応し、 s_2 は、拘束試験体 3 0 に搭載された第二ひずみセンサ 3 5 の計測値に対応する。なお、(2) 式では、引張応力を正の値とし、圧縮応力を負の値として表記している。

$$F = -E_s \cdot p \cdot s_2 \quad \cdots (2)$$

- [0106] 例えば上記（２）式の演算を行うことにより、拘束試験体３０内に打設されたコンクリートにおける拘束応力 F の経時的な変化態様を得ることができる。図１５は、拘束応力 F の変化態様を模式的に示したグラフである。
- [0107] このようにして得られた、拘束応力 F の変化態様と、拘束ひずみ ε_s の変化態様との間には、相関性が認められる。図１６は、拘束応力と拘束ひずみとの相関関係を模式的に示すグラフである。
- [0108] 図１６に模式的に示すように、拘束応力と拘束ひずみとは、昇温時（曲線 $Eca1$ ）、降温時（曲線 $Eca2$ ）のそれぞれにおいて、ほぼ直線的な相関性を示す。このため、それぞれの相関関係を例えば最小二乗法に基づいて直線的に近似して、その傾きを導出することによって、昇温時、降温時のそれぞれにおける、測定対象となるコンクリートの見かけヤング係数を求めることができる。この見かけヤング係数は、時々刻々と変化する拘束応力による弾性ひずみとクリープひずみの双方が考慮されたヤング係数と見なすことができるものである。
- [0109] 図１７は、図１４に示した結果に基づいて算出された、拘束応力と拘束ひずみとの相関性を示すグラフである。図１７の結果の場合、昇温時における測定対象のコンクリートの見かけヤング係数が 4.8 kN/mm^2 、降温時における測定対象のコンクリートの見かけヤング係数が 29.4 kN/mm^2 と、それぞれ求められる。
- [0110] 一方、図９を参照して上述したように、評価装置１から各材齢毎に取り出された強度試験体１０に対してヤング係数測定試験が実施されることで、測定対象のコンクリートのヤング係数の経時的な変化が得られる。この計測されたヤング係数と、上記方法にて演算で導出された見かけヤング係数の比率によって、測定対象のコンクリートのヤング係数の低減係数を求めることができる。図１８は、上記演算によって算出されたヤング係数の低減係数と、有効材齢との関係を示すグラフである。なお、実際には、昇温期間にわたるヤング係数の低減係数の平均値をもって、測定対象のコンクリートの昇温時におけるヤング係数の低減係数とすることができる。同様に、降温期間にわ

たるヤング係数の低減係数の平均値をもって、測定対象のコンクリートの降温時におけるヤング係数の低減係数とすることができる。図18の例では、測定対象のコンクリートのヤング係数の低減係数として、昇温時が0.28、降温時が1.00と、それぞれ求めることができる。

[0111] また、水和反応が十分進展したと考えられる期間を経過した後に、無拘束試験体20を収容容器3から取り出して、別途断熱試験を行うものとしても構わない。無拘束試験体20を収容容器3から取り出すタイミングとしては、収容容器3内に設置された温度計の指示値と、収容容器3が設置されている雰囲気との温度とがほぼ同程度になるまで、収容容器3の温度が低下したタイミングとされる。例えば、25日以上が経過したタイミングとすることができる。

[0112] 無拘束試験体20を、例えば、20℃～60℃の範囲内で設定された温度履歴が生じるようにプログラムされた恒温槽内に設置して、無拘束試験体20に取り付けられている第一ひずみセンサ25の計測値と温度との相関関係を取得する。

[0113] 温度履歴の一例は、以下の通りである。

20℃（3時間保持）→5℃/時昇温→30℃（3時間保持）→5℃/時昇温→40℃（3時間保持）→4℃/時昇温→50℃（3時間保持）→5℃/時昇温→60℃（3時間保持）→5℃/時降温→50℃（3時間保持）→5℃/時降温→40℃（3時間保持）→5℃/時降温→30℃（3時間保持）→5℃/時降温→20℃（3時間保持）

[0114] 上記の昇温及び降温を1サイクルとして、例えば2サイクルの温度変化が無拘束試験体20に対して与えられる。そして、上記温度履歴の下で、温度が保持されたそれぞれの時間帯（例えば20℃、30℃、40℃、50℃、60℃）において、無拘束試験体20に搭載された温度計の指示値が安定となった時点における、第一ひずみセンサ25の計測値が読み取られる。

[0115] 図19は、実施例1のコンクリートを用いた無拘束試験体20に対して、上記の断熱試験が実施されたときの、第一ひずみセンサ25の計測値と温度

との関係を示すグラフである。

[0116] 前述したように、この断熱試験は、水和反応が十分進展したと考えられる期間を経過した後の無拘束試験体 20 に対して行われたものである。このため、断熱試験で無拘束試験体 20 に対して温度変化を与えても、無拘束試験体 20 内に打ち込まれたコンクリートに対して、水和反応に伴う追加的な自己収縮ひずみが発生しないと考えられる。よって、図 19 に示す、第一ひずみセンサ 25 の計測値と温度との相関関係は、無拘束試験体 20 内に打ち込まれたコンクリートの温度ひずみが反映された情報であるといえる。図 19 に示すように、温度と第一ひずみセンサ 25 の計測値とは、ほぼ直線的な相関性を示すため、例えば最小二乗法に基づいて両者を直線的に近似し、その傾きを導出することによって、無拘束試験体 20 に打ち込まれたコンクリート、つまり、測定対象のコンクリートの、熱膨張係数を得ることができる。

[0117] 収容容器 3 内に設置された状態で計測された、無拘束試験体 20 の第一ひずみセンサ 25 の計測値 S1（図 13～図 14 参照）は、収容容器 3 内の温度履歴に基づく温度ひずみと自己収縮ひずみとが反映された値である。有効材齢を導出する箇所です述したように、評価装置 1 によれば、収容容器 3 内の温度履歴に関する情報が得られる。よって、温度履歴による温度変化値に、上記測定対象のコンクリートの熱膨張係数を乗じることによって、収容容器 3 内の温度履歴に基づく、測定対象のコンクリートの温度ひずみの値が得られる。この温度ひずみの値を、収容容器 3 内に設置された状態で計測された、無拘束試験体 20 の第一ひずみセンサ 25 の計測値 S1 から差し引くことで、無拘束試験体 20 の自己収縮ひずみの経時的な変化態様、すなわち、測定対象のコンクリートの自己収縮ひずみの経時的な変化態様を得ることができる。

[0118] そして、上述したように、収容容器 3 内における温度変化に基づいて、収容容器 3 内の材齢と有効材齢との相関性が得られている。よって、測定対象のコンクリートの自己収縮ひずみと、当該コンクリートの有効材齢との相関性を得ることができる。図 20 は、図 14 及び図 19 に示した結果に基づい

て導出された、実施例 1 のコンクリートの自己収縮ひずみと有効材齢との相関性を示すグラフである。上記の方法で得られた、コンクリートの有効材齢と自己収縮ひずみとの相関関係に関する情報は、当該コンクリートを用いて実際の構造物を建設した場合の温度ひび割れリスクを、3D-FEM解析で評価する際に、利用できる。

[0119] 更に、上述したように、収容容器 3 内における温度変化が得られているため、例えば、図 2 1 に模式的に示すように、測定対象のコンクリートの材齢と温度上昇量との関係 T_a が得られる。よって、この関係 T_a を逆解析することによって、図 2 2 に模式的に示すような、測定対象のコンクリートの断熱温度上昇特性 T_b を得ることができる。

[0120] 以上説明したように、本発明に係る評価装置 1 によれば、測定対象のコンクリートに関する多様な物性値を直接得ることができ、また、得られた物性値を用いて演算処理を行うことで、更に多くの物性値を得ることができる。このようにして得られた多くの物性値を用いて数値解析を行うことで、測定対象のコンクリートを用いた構造物（マスコンクリート）の温度ひび割れのリスクの評価を精度よく行うことができる。

[0121] <第二実施形態>

本実施形態は、測定対象であるコンクリートの特性評価を行うための、所定の評価装置を利用しつつ、コンクリートのヤング係数の低減係数を推定する実施形態に対応する。詳細には、所定領域に測定対象となるコンクリートが打ち込まれてなる複数の試験体が内部に収容された状態で利用される。この測定対象であるコンクリートの特性評価を行う際に、第一実施形態で上述した評価装置 1 を利用することができる。評価装置 1 の説明及び使用方法についての説明は重複するため割愛する。

[0122] 上述したように、評価装置 1 によれば、測定対象のコンクリートのヤング係数の低減係数を始めとする、多様な物性値を得ることができる。このようにして得られた多くの物性値を用いて数値解析を行うことで、測定対象のコンクリートを用いた構造物（マスコンクリート）の温度ひび割れのリスクの

評価を精度よく行うことができる。

[0123] なお、第一実施形態では、評価装置 1 を用いて、コンクリートのヤング係数の低減係数以外の、コンクリートの物性値を導出する場合についても、説明を行った。しかし、コンクリートのヤング係数の低減係数、及びこの低減係数を導出するのに必要な物性値以外の物性値については、必ずしも導出が不要である。

[0124] また、第一実施形態で上述した評価装置 1 の、収容容器 3 内における、強度試験体 10、無拘束試験体 20、及び拘束試験体 30 の設置方法はあくまで一例であり、本発明は、図示された配置態様には限定されない。例えば、強度試験体 10 と無拘束試験体 20 と拘束試験体 30 とが、すべて底部 3b の面に沿って配列されていても構わない。また、例えば、無拘束試験体 20 と拘束試験体 30 とが、鉛直方向に沿って配列されていても構わない。

[0125] また、上記の第一実施形態では、同一の収容容器 3 内に、強度試験体 10、無拘束試験体 20、及び拘束試験体 30 を設置した状態で、各物性値を計測する場合について説明を行った。これは、強度試験体 10、無拘束試験体 20、及び拘束試験体 30 を含む、複数の試験体を、同一の断熱性の収容容器 3 に収容することにより、これらの試験体から生じる水和反応に伴う発熱による温度上昇と、水和反応の進展が収束することによる温度低下とによって、同一の温度履歴を実現することを意図したものである。

[0126] 言い換えれば、各試験体（強度試験体 10、無拘束試験体 20、及び拘束試験体 30）を、断熱性の収容容器内において同一の温度履歴の下に設置できる限りにおいては、これらの試験体を必ずしも同一の収容容器 3 内に設置する必要はない。例えば、所定の温度履歴を生じるようにプログラムした恒温槽内に、それぞれの試験体を収容した状態で、第一実施形態に準じた方法によって、コンクリートのヤング係数の低減係数を導出するものとしても構わない。更に、この場合において、ヤング係数の低減係数以外の、コンクリートの物性値についても、第一実施形態で上述した方法に準じて導出するものとして構わない。

[0127] [別実施形態]

以下、別実施形態につき説明する。

[0128] 〈1〉上記実施形態では、所定の材齢タイミングが到来するたびに、蓋部2を開放して、強度試験体10を上方に取り出すものとした。しかし、強度試験体10の取り出す向きは、上方には限定されない。例えば、蓋部2の位置を側方とし、強度試験体10を側方から取り出してもよい。

[0129] 〈2〉収容容器3内において、材齢毎に取り出されて上記の試験を行う対象となる本数よりも多い本数の強度試験体10を設置しても構わない。この余分に設置される強度試験体10は、収容容器3内において水和反応を生じさせて、収容容器3内の温度を上昇させる目的で利用される。

[0130] 〈3〉収容容器3内において、複数の拘束試験体30が設置される場合、それぞれの拘束試験体30に搭載されている搭載された第二ひずみセンサ35の計測値に基づいて導出された、拘束試験体30毎の拘束応力の平均値をもって、拘束応力Fとしても構わない。

[0131] 更に、上記において、それぞれの拘束試験体30に搭載されている拘束鋼材34の鋼材比を相互に異ならせてもよい。この場合、拘束応力Fを算出する際には、それぞれの拘束試験体30に搭載された第二ひずみセンサ35の計測値と、対応する拘束試験体30に搭載されている拘束鋼材34の鋼材比に基づいて導出される。そして、このようにして導出された、各拘束試験体30毎の拘束応力の平均値をもって、拘束応力Fとしても構わない。

[0132] 〈4〉収容容器3内に設置される無拘束試験体20の本数は、1本であっても構わない。同様に、収容容器3内に設置される拘束試験体30の設置本数は、1本であっても構わない。

[0133] 〈5〉本発明は上記した実施形態に限定されるものではなく、様々な変形例が含まれる。例えば、上記した実施形態は本発明のより良い理解のために詳細に説明したものであり、必ずしも説明の全ての構成を備えるものに限定されるものではない。本発明の範囲は特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味及び範囲内での全ての変更が含まれることが意図さ

れる。

符号の説明

[0134]	1	: 評価装置
	2	: 蓋部
	3	: 収容容器
	3 a	: 収容容器の側部
	3 b	: 収容容器の底部
	6	: 充填材
	1 0	: 強度試験体
	1 1	: 筒体
	1 2	: 内部空間
	2 0	: 無拘束試験体
	2 1	: 枠体
	2 3	: 内部空間
	2 5	: 第一ひずみセンサ
	2 7	: 信号線
	3 0	: 拘束試験体
	3 1	: 側板
	3 2	: 端板
	3 3	: 内部空間
	3 4	: 拘束鋼材
	3 5	: 第二ひずみセンサ
	3 6	: 温度計
	3 7	: 信号線

請求の範囲

- [請求項1] 測定対象であるコンクリートの特性評価を行うための評価装置であって、
- 前記コンクリートが打設可能な複数の第一筒状体を含む強度試験部と、
- 前記コンクリートが打設可能な有底の第一矩形枠状体を含む無拘束試験部と、
- 前記コンクリートが打設可能な有底の第二矩形枠状体を含み、前記第二矩形枠状体の長手方向に係る両端が熱膨張係数 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 未満の拘束鋼材で拘束された、拘束試験部と、
- 前記強度試験部、前記無拘束試験部、及び前記無拘束試験部を覆う、断熱性の収容容器と、
- 前記収容容器内の温度変化を計測可能な温度計とを備え、
- 前記無拘束試験部は、前記第一矩形枠状体の内部に設置された第一ひずみセンサを有し、
- 前記拘束試験部は、前記拘束鋼材に設置された第二ひずみセンサを有することを特徴とする、評価装置。
- [請求項2] 前記収容容器は、断熱材からなり、取り外し可能な蓋部を有し、
- 前記強度試験部は、前記無拘束試験部及び前記拘束試験部よりも、前記蓋部に近い側に位置していることを特徴とする、請求項1に記載の評価装置。
- [請求項3] 前記収容容器は、前記蓋部に対向する位置に設置された底部と、
- 前記底部を四方から覆う側部とを有し、
- 前記無拘束試験部及び前記拘束試験部は、前記底部に沿った方向に配列され、
- 前記強度試験部に含まれる複数の前記第一筒状体は、前記無拘束試験部に含まれる前記第一矩形枠状体及び前記拘束試験部に含まれる前記第二矩形枠状体の直上に載置された状態で、前記底部に沿った方

向に配列されていることを特徴とする、請求項 2 に記載の評価装置。

[請求項4] 前記強度試験部は、前記コンクリートの強度試験の対象材齢の種類数の 2 倍以上の数の前記第一筒状体を含むことを特徴とする、請求項 1 又は 2 に記載の評価装置。

[請求項5] 複数の前記第一筒状体の離間部に充填された断熱性の充填材を備えたことを特徴とする、請求項 1 又は 2 に記載の評価装置。

[請求項6] 前記温度計は、前記無拘束試験部に取り付けられていることを特徴とする、請求項 1 又は 2 に記載の評価装置。

[請求項7] 請求項 1 に記載の評価装置を用いた、コンクリートの特性評価方法であって、

前記第一矩形枠状体に前記コンクリートを打設して得られた無拘束試験体と、前記第二矩形枠状体に前記コンクリートを打設して得られた拘束試験体と、複数の前記第一筒状体に前記コンクリートを打設して得られた複数の強度試験体とを、前記収容容器内に設置する工程（a）と、

所定の材齢タイミングが到来する毎に、複数の前記強度試験体に属する対象材齢強度試験体を前記収容容器から取り出して、前記対象材齢強度試験体に対してヤング係数測定試験を実行して、前記コンクリートのヤング係数の経時的な変化態様を算出する工程（b）と、

前記収容容器内に設置された状態の前記無拘束試験部が有する前記第一ひずみセンサの計測値である第一ひずみ値と、前記収容容器内に設置された状態の前記拘束試験部が有する前記第二ひずみセンサの計測値である第二ひずみ値とに基づいて、前記コンクリートの拘束ひずみ値の経時的な変化態様を算出する工程（c）と、

前記拘束試験体内の前記拘束鋼材の比率である鋼材比と、前記拘束鋼材のヤング係数と、前記第二ひずみ値とに基づいて、前記コンクリートの拘束応力の経時的な変化態様を算出する工程（d）と、

前記拘束ひずみ値と前記拘束応力との相関関係に基づいて、昇温

時及び降温時のそれぞれにおける見かけヤング係数を算出する工程（e）と、

前記工程（b）で得られた前記ヤング係数と、前記工程（e）で得られた前記見かけヤング係数との比率に基づいて、昇温時及び降温時のそれぞれにおけるヤング係数の低減係数を導出する工程（f）とを有することを特徴とする、コンクリートの特性評価方法。

[請求項8] 前記温度計による前記収容容器内の温度履歴に基づいて、前記材齢タイミングにおける前記対象材齢強度試験体の有効材齢を算出する工程（g）と、

前記材齢タイミングに対応する前記コンクリートの材齢と、前記工程（g）によって得られた前記有効材齢の対応関係を得る工程（h）とを有することを特徴とする、請求項7に記載の、コンクリートの特性評価方法。

[請求項9] 前記対象材齢強度試験体に対して圧縮強度試験を実行して、前記コンクリートの圧縮強度の経時的な変化態様を得る工程（i）と、

前記工程（h）及び前記工程（i）の結果に基づいて、前記コンクリートの前記有効材齢と前記圧縮強度との関係を得る工程（j）とを有することを特徴とする、請求項8に記載の、コンクリートの特性評価方法。

[請求項10] 前記工程（b）及び前記工程（i）の結果に基づいて、前記コンクリートの前記圧縮強度と前記ヤング係数との関係を得る工程（k）とを有することを特徴とする、請求項9に記載の、コンクリートの特性評価方法。

[請求項11] 前記対象材齢強度試験体に対して割裂引張強度試験を実行して、前記コンクリートの割裂引張強度の経時的な変化態様を得る工程（l）と、

前記工程（i）及び前記工程（l）の結果に基づいて、前記コンクリートの前記圧縮強度と前記割裂引張強度との関係を得る工程（m）

）とを有することを特徴とする、請求項 9 に記載の、コンクリートの特性評価方法。

[請求項12] 前記工程（a）から25日以上が経過した後に前記無拘束試験体を前記収容容器から取り出して、断熱環境下で温度変化を与えて、温度と前記第一ひずみセンサの計測値との関係から前記コンクリートの熱膨張係数を得る工程（n）と、

前記温度計で計測された温度の経時的な変化態様に前記熱膨張係数を乗じて得られた温度ひずみの変化態様と、前記工程（c）において得られた前記第一ひずみ値の変化態様とに基づいて、前記コンクリートの自己収縮ひずみの経時的な変化態様を算出する工程（o）と

前記工程（g）及び前記工程（o）の結果に基づいて、前記コンクリートの前記有効材齢と前記自己収縮ひずみとの関係を得る工程（p）とを有することを特徴とする、請求項 8 に記載の、コンクリートの特性評価方法。

[請求項13] 前記温度計は、前記無拘束試験部及び前記拘束試験部のうちの少なくとも一方に取り付けられており、

前記コンクリートの材齢と前記温度計の計測値との関係を逆解析して、前記コンクリートの断熱温度上昇特性を得る工程（q）を有することを特徴とする、請求項 7 に記載の、コンクリートの特性評価方法。

[請求項14] 前記収容容器は、断熱材からなり、取り外し可能な蓋部を有し、
前記強度試験部は、前記無拘束試験部及び前記拘束試験部よりも、前記蓋部に近い側に位置しており、
前記工程（b）は、前記材齢タイミングが到来する毎に、前記蓋部を開放して、前記対象材齢強度試験体を前記収容容器から取り出すと共に、取り出された前記対象材齢強度試験体の占有領域に対応した量の断熱性の充填材を前記収容容器内に設置する工程を含むことを特徴とする、請求項 7 に記載の、コンクリートの特性評価方法。