

明 細 書

発明の名称：

連続梁の評価方法、連続梁の評価プログラム、及び合成梁の評価方法

技術分野

[0001] 本発明は、連続梁の評価方法、連続梁の評価プログラム、及び合成梁の評価方法に関する。

本願は、2019年11月21日に、日本に出願された、特願2019-210798号、及び特願2019-210811号に基づき優先権を主張し、これらの内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 従来、複数本の梁を互いに半剛接合した連続梁が知られている（例えば、特許文献1及び2、非特許文献1参照）。

[0003] 一方で、従来、両端がそれぞれ半剛接合された合成梁において、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに異なる場合の合成梁の評価方法が知られている（例えば、特許文献3参照）。

特許文献3では、合成梁に2点集中荷重が作用する場合に、明細書に示された合成梁の曲げモーメント及びたわみについての方程式（陽関数）を解いている。そして、合成梁の端部曲げモーメント（合成梁の端に作用する曲げモーメント）及びたわみの最大値を算出している。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：日本国特開2015-068001号公報

特許文献2：日本国特開2005-282019号公報

特許文献3：日本国特開2018-09410号公報

非特許文献

[0005] 非特許文献1：“Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”, December

2004, Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかしながら、この種の連続梁では、連続梁に荷重が作用したときに生じる曲げモーメントやたわみ分布の実用的な評価方法が提供されていなかった。

両端が端支持部と剛接合された連続梁であっても、例えば端支持部が鉄骨の大梁の場合、剛接合と評価するには大梁のねじれ抵抗が不十分である。このため、剛接合を仮定してしまうと、連続梁の梁毎に大きさの異なる荷重が作用した際に、曲げモーメントやたわみ分布を過小評価する。それゆえに、連続梁を危険側に評価する恐れがある。

さらに、正曲げと負曲げの曲げ剛性が異なる連続梁については、これらの曲げ剛性と両端での接合状態を考慮して連続梁の曲げモーメントやたわみ分布を求める実用的な評価方法が提供されていなかった。

[0007] 連続梁を危険側に評価しないように、従来は、連続梁の両端がピン接合で支持されていると仮定して、連続梁を評価している。このため、連続梁の長手方向の中央に発生する曲げモーメントやたわみ分布を過大評価している。これにより、長手方向に直交する断面が大きい梁を連続梁に用いる必要があると判断され、必要以上に高価な連続梁を用いている。

[0008] このような問題点に鑑みると、両端での接合状態に応じて連続梁の曲げモーメントやたわみ分布をより適切に評価できる連続梁の評価方法及び連続梁の評価プログラムを提供するという第1課題がある。

[0009] 一方で、合成梁に全長にわたって等分布荷重が作用する場合について説明する。この場合、この方程式が陰関数であるため、合成梁の曲げモーメント及びたわみについての方程式から合成梁の曲げモーメント及びたわみを算出するには、収斂（収束）計算を行う必要がある。さらに、例えば複数の合成梁を有する構造体を動的解析するためには、これを陰解法で収斂計算によっ

て解く必要がある。合成梁と構造体の2重の収斂計算が必要となるため、多大な時間が必要である。

さらに、例えば合成梁の断面積を目的関数、たわみや曲げモーメント等の設計条件を制約条件とし、目的関数を最小化する最適化計算を行う場合について説明する。この場合、制約条件及び目的関数の最適化に対して2重の収斂計算が必要となるため、多大な時間が必要である。

[0010] このような問題点に鑑みると、合成梁の端部曲げモーメント及びたわみの最大値を収斂計算を行うことなく算出できる合成梁の評価方法を提供するという第2課題がある。

[0011] 本発明は、前記第1課題及び前記第2課題に鑑みてなされたものであって、たわみを適切に評価できる連続梁の評価方法、連続梁の評価プログラム、及び合成梁の評価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

[0012] 前記課題を解決するために、この発明は以下の手段を提案している。

(1) 本発明の第一の態様は、長手方向に並べて配置されるとともに、前記長手方向に隣り合う端部同士が互いに半剛接合されて中間支点とされた、2以上の自然数である n 本の梁を備える連続梁であって、前記連続梁全体の両端が一对の端支点とされた前記連続梁を評価する連続梁の評価方法であって、前記中間支点及び前記一对の端支点での複数の曲げモーメント、及び前記一对の端支点での複数の回転角を、与条件に基づいて求める解決定工程を有し、前記与条件が、前記 n 本の梁それぞれの長さ及び曲げ剛性と；前記中間支点及び前記一对の端支点での複数の回転剛性と；前記 n 本の梁に作用する鉛直荷重と；前記中間支点及び前記一对の端支点での複数の鉛直変位と；を含み、前記解決定工程では、前記複数の曲げモーメント及び前記複数の回転角を複数の未知数と規定し、前記複数の回転剛性、前記複数の曲げモーメント、及び前記複数の回転角の関係式と、前記複数の鉛直変位の関係式とを、前記複数の未知数の数と同数の複数の第1境界条件と規定したときに、前記複数の未知数が前記複数の第1境界条件を満たすように前記複数の未知数を

解いて、前記連続梁の曲げモーメント及びたわみ分布を評価する。

[0013] この態様によれば、複数の未知数の数と複数の第1境界条件の数とが同数である。このため、与条件として与えられた梁の長さ及び曲げ剛性、複数の回転剛性、鉛直荷重、乃至中間支点及び一対の端支点での複数の鉛直変位に基づいて、複数の第1境界条件を満たすように複数の未知数を解く。この方法により、複数の未知数に含まれる複数の曲げモーメント及び複数の回転角を求めることができる。

そして、求めた複数の曲げモーメント及び複数の回転角から、複数の鉛直変位の関係式に基づいて複数の鉛直変位を算出する。この方法により、例えば一対の端支点での接合状態に応じて、連続梁の曲げモーメントやたわみ分布をより適切に評価することができる。従って、たわみを適切に評価することができる。

[0014] (2) 前記(1)に記載の連続梁の評価方法では、前記解決定工程が、前記複数の鉛直変位を含む設計値を与える第1設計工程と；前記一対の端支点での接合状態に応じて前記一対の端支点に第2境界条件を与える第2設計工程と；前記一対の端支点での接合状態に応じて、前記一対の端支点及び前記中間支点に作用する前記曲げモーメントを含む仮設計値を与える仮設計工程と；前記仮設計値に基づいて、前記複数の第1境界条件及び前記第2境界条件を満たすように、前記中間支点での鉛直変位の計算結果を含む計算値を算出する解算出工程と；前記設計値と前記計算値との残差である変位残差を求める残差算出工程と；前記変位残差が、予め定められた閾値よりも小さいか否かを判定する判定工程と；を有してもよい。

この態様によれば、判定工程において変位残差が閾値よりも小さいか否かを判定することにより、仮設計値に基づいて算出された計算値を、設計値及び変位残差に基づいて評価することができる。

[0015] (3) 前記(2)に記載の連続梁の評価方法では、前記解決定工程が、前記仮設計工程の後で、前記仮設計値を記憶する記憶工程をさらに有し、前記判定工程において、前記変位残差が前記閾値以上であるときには、前記記憶工

程で記憶された前記仮設計値に代えて前記仮設計工程で他の新たな仮設計値を与えること、及び、この新たな仮設計値に基づいて前記解算出工程、前記残差算出工程、前記判定工程を行うこと、を組にして、前記判定工程において前記変位残差が前記閾値よりも小さいと判定されるまで繰り返し、前記判定工程において前記変位残差が前記閾値よりも小さいと判定されたときの前記仮設計値の前記曲げモーメントを、前記中間支点に作用する前記曲げモーメントと規定して、この曲げモーメントに基づいて前記複数の回転角を求めてもよい。

この態様によれば、判定工程において変位残差が閾値よりも小さいと判定されるまで、新たな仮設計値を与えること、及び、この新たな仮設計値に基づいて解算出工程、残差算出工程、判定工程を行うこと、を組にして繰り返す。この方法により、曲げモーメントを任意の精度で算出することができる。そして、この曲げモーメントに基づいて複数の回転角を求めることができる。

- [0016] (4) 前記(2)又は(3)に記載の連続梁の評価方法において、前記解算出工程では、前記 n 本の梁のうち、前記連続梁の一方の前記端支点である第1端支点から前記連続梁の他方の前記端支点である第2端支点に向かって、1以上 n 以下の自然数 i に対して、 i 本目の前記梁における前記第1端支点側の前記中間支点又は前記端支点での前記鉛直変位 $\delta_{0,i}$ (m) を前記与条件と規定し； i 本目の前記梁における前記第2端支点側の前記中間支点又は前記端支点での前記鉛直変位の計算結果 $\delta_{i,calc}$ (m) を、(1)式から(8)式に基づいて得られる(9)式により、前記計算値に含まれるとして算出し；1以上 $(n-1)$ 以下の i に対する、 $(i+1)$ 本目の前記梁における前記第1端支点側の前記中間支点での前記鉛直変位 $\delta_{0,(i+1)}$ と、 i 本目の前記梁における前記第2端支点側の前記中間支点での前記鉛直変位の計算結果 $\delta_{i,calc}$ と、の残差を第 i 残差と規定したときに、前記残差算出工程では、前記第1残差から前記第 $(n-1)$ 残差までの和である中間残差を算出し；前記与条件である前記第2端支点における前記鉛直変位 δ_n と、 n 本目の前記

梁における前記第2端支点での前記鉛直変位の計算結果 $\delta_{n, calc}$ と、の残差である第2端支点残差を算出し；前記中間残差と前記第2端支点残差との和である前記変位残差を算出してもよい。

[0017] [数1]

$$V_{jl,i} = \frac{M_{j,i-1} - M_{j,i}}{L_i} + \frac{w_i \cdot L_i}{2} \quad \cdot \cdot (1)$$

$$V_{jr,i} = w_i \cdot L_i - V_{jl,i} = \frac{w_i \cdot L_i}{2} - \frac{M_{j,i-1} - M_{j,i}}{L_i} \quad \cdot \cdot (2)$$

$$x_{h,i} = \frac{1}{w_i} \left\{ V_{jl,i} - \sqrt{V_{jl,i}^2 - 2w_i \cdot M_{j,i-1}} \right\} \quad \cdot \cdot (3)$$

$$x_{s,i} = \frac{1}{w_i} \left\{ V_{jl,i} + \sqrt{V_{jl,i}^2 - 2w_i \cdot M_{j,i-1}} \right\} \quad \cdot \cdot (4)$$

$$f_{(x_i)} = \left(\frac{M_{j,i-1} - M_{j,i}}{L_i} + \frac{w_i \cdot L_i}{2} \right) \cdot \frac{x_i^2}{2} - \frac{w_i \cdot x_i^3}{6} - M_{j,i-1} \cdot x_i \quad \cdot \cdot (5)$$

$$F_{(x_i)} = \left(\frac{M_{j,i-1} - M_{j,i}}{L_i} + \frac{w_i \cdot L_i}{2} \right) \cdot \frac{x_i^3}{6} - \frac{w_i \cdot x_i^4}{24} - \frac{M_{j,i-1}}{2} \cdot x_i^2 \quad \cdot \cdot (6)$$

$$\varphi_{c(x_i)}|_{x_i=L_i} = - \left(\frac{1}{EI_{h,i}} - \frac{1}{EI_{s,i}} \right) \left(f_{(x_i)}|_{x_i=x_{h,i}} - f_{(x_i)}|_{x_i=x_{s,i}} \right) - \frac{1}{EI_{h,i}} f_{(x_i)}|_{x_i=L_i} + \varphi_{0i} \quad \cdot \cdot (7)$$

$$\varphi_{0i} = \left(\frac{1}{S_{jr,i-1}} + \frac{1}{S_{jl,i}} \right) M_{j,i-1} + \varphi_{c(x_{i-1})}|_{x_{i-1}=L_{i-1}} \quad \cdot \cdot (8)$$

$$\begin{aligned} \delta_{i,calc} = & - \left(\frac{1}{EI_{h,i}} - \frac{1}{EI_{s,i}} \right) \left\{ F_{(x_i)}|_{x_i=x_{h,i}} - F_{(x_i)}|_{x_i=x_{s,i}} + f_{(x_i)}|_{x_i=x_{h,i}} (L_i - x_{h,i}) \right. \\ & \left. - f_{(x_i)}|_{x_i=x_{s,i}} (L_i - x_{s,i}) \right\} - \frac{1}{EI_{h,i}} F_{(x_i)}|_{x_i=L_i} + \varphi_{0i} \cdot L_i + \delta_{0i} \quad \cdot \cdot (9) \end{aligned}$$

[0018] ただし、1以上n以下の自然数iに対して、i本目の前記梁の長さを L_i (m)、i本目の前記梁において、前記第1端支点側の端を原点、前記第1端支点から前記第2端支点に向かう向きを正とした場合に規定される座標を x_i (m)、i本目の前記梁に作用する鉛直荷重を w_i (N/m)、i本目の前記梁における前記第1端支点側の端での回転剛性を $S_{jl,i}$ (Nm/rad)、i本目の前記梁における前記第2端支点側の端での回転剛性を $S_{jr,i}$ (Nm/rad)、i本目の前記梁における正曲げの曲げ剛性を $EI_{s,i}$ (Nm²)、i本目の前記梁における負曲げの曲げ剛性を $EI_{h,i}$ (Nm²)、i本目の前記梁における前記第2端支点側の前記中間支点又は前記端支点での曲げモーメントを $M_{j,i}$ (Nm)と規定する。前記第2境界条件に含まれる1本目の

前記梁における前記第1端支点での曲げモーメント $M_{j,0}$ (Nm) は、前記第1端支点がピン接合の場合は0、剛接合又は半剛接合の場合は未知数であり、1本目の前記梁における前記第1端支点での回転角 $\phi_{0,1}$ (rad) は、前記第1端支点が剛接合の場合は0、ピン接合または半剛接合の場合は未知数である。

この態様によれば、中間支点及び一对の端支点における複数の鉛直変位を、数式を用いて精度良く評価することができる。

[0019] (5) 本発明の第二の態様は、長手方向に並べて配置されるとともに、前記長手方向に隣り合う端部同士が互いに半剛接合されて中間支点とされた、2以上の自然数である n 本の梁を備える連続梁であって、前記連続梁全体の両端が一对の端支点とされた前記連続梁を評価する評価装置用の連続梁の評価プログラムであって、前記評価装置を、前記中間支点及び前記一对の端支点での複数の曲げモーメント、及び前記一对の端支点での複数の回転角を、与条件に基づいて求める解決定部として機能させ、前記与条件は、前記 n 本の梁それぞれの長さ及び曲げ剛性と；前記中間支点及び前記一对の端支点での複数の回転剛性と；前記 n 本の梁に作用する鉛直荷重と；前記中間支点及び前記一对の端支点での複数の鉛直変位と；を含み、前記解決定部は、前記複数の曲げモーメント及び前記複数の回転角を複数の未知数と規定し、前記複数の回転剛性、前記複数の曲げモーメント、及び前記複数の回転角の関係式と、前記複数の鉛直変位の関係式とを、前記複数の未知数の数と同数の複数の第1境界条件と規定したときに、前記複数の未知数が前記複数の第1境界条件を満たすように前記複数の未知数を解いて、前記連続梁の曲げモーメント及びたわみ分布を評価する。

[0020] この態様によれば、複数の未知数の数と複数の第1境界条件の数とが同数である。このため、与条件として与えられた梁の長さ及び曲げ剛性、複数の回転剛性、鉛直荷重、乃至中間支点及び一对の端支点での複数の鉛直変位に基づいて、複数の第1境界条件を満たすように複数の未知数を解く。この方法により、複数の未知数に含まれる複数の曲げモーメント及び複数の回転角

を求めることができる。

そして、求めた複数の曲げモーメント及び複数の回転角から、複数の鉛直変位の関係式に基づいて複数の鉛直変位を算出する。この方法により、例えば一对の端支点での接合状態に応じて、連続梁の曲げモーメントやたわみ分布をより適切に評価することができる。従って、たわみを適切に評価することができる。

[0021] (6) 本発明の第三の態様は、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに異なり、両端がそれぞれ半剛接合され全長にわたって等分布荷重が作用する合成梁の前記端に作用する曲げモーメントである端部曲げモーメント、及び前記合成梁に生じるたわみの最大値を算出する合成梁の評価方法であって、前記合成梁の前記端における回転剛性を、前記合成梁の単位長さ当たりの曲げ剛性で除した値を無次元化回転剛性と規定し、前記合成梁の正曲げの曲げ剛性及び前記合成梁の負曲げの曲げ剛性の比を無次元化曲げ剛性と規定したときに、

前記端部曲げモーメント及び前記たわみの最大値を、前記無次元化回転剛性及び前記無次元化曲げ剛性に基づいて陽関数により算出する。

[0022] この態様によれば、発明者らは無次元化された値である無次元化回転剛性及び無次元化曲げ剛性に基づいて端部曲げモーメント及びたわみの最大値を評価する。この方法により、合成梁の仕様によらずに端部曲げモーメント及びたわみの最大値を陽関数により汎用性高く、かつ精度良く算出できることを見出した。

無次元化回転剛性及び無次元化曲げ剛性に基づいて、陽関数により合成梁の端部曲げモーメント及びたわみの最大値を算出する。この方法により、合成梁の端部曲げモーメント及びたわみの最大値を収斂計算を行うことなく算出することができる。従って、たわみを適切に評価することができる。

[0023] (7) 前記(6)に記載の合成梁の評価方法では、前記両端がそれぞれ剛接合されて全長にわたって等分布荷重が作用すると仮定したときの前記合成梁の前記端に作用する曲げモーメントを剛接モーメントと規定し、前記両端が

それぞれピン接合されて全長にわたって等分布荷重が作用する仮定としたときの前記合成梁に作用する曲げモーメントの最大値をピン接モーメントと規定し、前記両端がそれぞれ半剛接合されて全長にわたって等分布荷重が作用する前記合成梁の前記端に作用する曲げモーメントを半剛接モーメントと規定し、前記半剛接モーメントを前記ピン接モーメントで除した値を無次元化接合部モーメントと規定し、前記剛接モーメントを前記ピン接モーメントで除した値を無次元化剛接モーメントと規定したときに、前記無次元化曲げ剛性に基づいて前記無次元化剛接モーメントを陽関数により算出し；算出した前記無次元化剛接モーメント、前記無次元化回転剛性、及び前記無次元化曲げ剛性に基づいて前記無次元化接合部モーメントを陽関数により算出し；算出した前記無次元化接合部モーメントに基づいて前記端部曲げモーメント及び前記たわみの最大値を陽関数により算出してもよい。

[0024] この態様によれば、無次元化曲げ剛性に基づいて無次元化剛接モーメントを陽関数により算出する。さらに、算出した無次元化剛接モーメント、無次元化回転剛性、及び無次元化曲げ剛性に基づいて無次元化接合部モーメントを算出し、算出した無次元化接合部モーメントに基づいて端部曲げモーメント及びたわみの最大値を、それぞれ陽関数により算出する。

こうして、合成梁の端部曲げモーメント及びたわみの最大値を収斂計算を行うことなく算出することができる。

[0025] (8) 前記(7)に記載の合成梁の評価方法では、前記無次元化剛接モーメントを $\beta_{Mj, rigid}$ 、前記無次元化回転剛性を α_j 、前記無次元化曲げ剛性を α_s と規定したときに、前記無次元化接合部モーメント β_{Mj} を、(10)式から(12)式を用いて(13)式により算出してもよい。

[0026]

[数2]

$$k = \frac{1}{5000}\alpha_s^6 - \frac{1}{250}\alpha_s^5 + \frac{196}{5000}\alpha_s^4 - \frac{1985}{10000}\alpha_s^3 + \frac{5549}{10000}\alpha_s^2 - \frac{4138}{5000}\alpha_s - \frac{18681}{10000} \quad \dots(10)$$

$$\alpha_{j,T} = \frac{7}{10000}\alpha_s^3 - \frac{1343}{10000}\alpha_s^2 + \frac{7614}{5000}\alpha_s + \frac{6217}{10000} \quad \dots(11)$$

$$\beta_{Mj,rigid} = -\frac{15}{48}\log_{10}\alpha_s + \frac{2}{3} \quad \dots(12)$$

$$\beta_{Mj} = \frac{\beta_{Mj,rigid}}{e^{\left\{k(\log_{10}\alpha_j - \log_{10}\alpha_{j,T})\right\}} + 1} \quad \dots(13)$$

[0027] この態様によれば、(10)式から(12)式を用いた(13)式により、無次元化接合部モーメント β_{Mj} を、収斂計算を行うことなく精度良く算出することができる。

[0028] (9)前記(8)に記載の合成梁の評価方法では、前記無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj,rigid}$ が0.4以下のときには、(13)式において、前記無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj,rigid}$ に代えて、前記無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj,rigid}$ に基づいて(14)式により算出される無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj,rigid,theo}$ を用いてもよい。

[0029] [数3]

$$\beta_{Mj,rigid,theo} = -\frac{781}{1000}\beta_{Mj,rigid}^3 + \frac{1702}{1250}\beta_{Mj,rigid}^2 + \frac{1189}{5000}\beta_{Mj,rigid} + \frac{1369}{10000} \quad \dots(14)$$

[0030] この態様によれば、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj,rigid}$ が0.4以下である場合には、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj,rigid}$ が厳密解に対して誤差が大きくなる。この場合であっても、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj,rigid}$ に代えて無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj,rigid,theo}$ を用いることにより、無次元化剛接モーメントをより精度良く算出することができる。

発明の効果

[0031] 本発明の前記各態様に係る連続梁の評価方法、連続梁の評価プログラム、及び合成梁の評価方法によれば、たわみを適切に評価することができる。

図面の簡単な説明

[0032] [図1]本発明の第1実施形態の連続梁の評価方法が適用される連続梁が用いられる建築物の平面図である。

[図2]図1中の切断線A1-A1の断面図である。

[図3]梁の諸元及び梁に作用する曲げモーメントを説明する模式図である。

[図4]梁に作用する外力及び荷重を説明する模式図である。

[図5]梁に作用するせん断力を説明する模式図である。

[図6]同連続梁及び作用する外力を説明する模式図である。

[図7]長手方向に隣接する一对の梁において、回転剛性が生じる位置間の距離を考慮した場合の梁の端における回転剛性及び回転角の関係を説明する図である。

[図8]長手方向に隣接する一对の梁において、回転剛性が生じる位置間の距離を無視した場合の梁の端における回転剛性及び回転角の関係を説明する図である。

[図9]同連続梁の評価方法を行うのに用いられる連続梁の評価装置のブロック図である。

[図10]同連続梁の評価方法を示すフローチャートである。

[図11]本発明の第1実施形態の連続梁の評価プログラムの入力シートの一例を示す図である。

[図12]本発明の第1実施形態の連続梁の評価プログラムを用いて評価した、第1端支点からの距離に対する連続梁に作用する曲げモーメント分布の関係を示す図である。

[図13]本発明の第1実施形態の連続梁の評価プログラムを用いて評価した、第1端支点からの距離に対する回転角分布の関係を示す図である。

[図14]本発明の第1実施形態の連続梁の評価プログラムを用いて評価した、

第1端支点からの距離に対するたわみ分布の関係を示す図である。

[図15]本発明の第2実施形態の合成梁の評価方法が適用される合成梁が用いられる建築物の縦断面図である。

[図16]同合成梁を境界条件とともに示す模式化した正面図である。

[図17]同合成梁における正曲げされる領域及び負曲げされる領域を模式化して示した正面図である。

[図18]ケース1からケース5における無次元化回転剛性と無次元化接合部モーメントとの関係を示す図である。

[図19]合成梁における無次元化曲げ剛性と無次元化剛接モーメントとの試算結果の関係を示す図である。

[図20]無次元化剛接モーメントの近似解と厳密解との関係を示す図である。

[図21]無次元化曲げ剛性と係数 k との関係を示す図である。

[図22]無次元化曲げ剛性と変数 α_j, τ との関係を示す図である。

[図23]無次元化接合部モーメントの近似解と厳密解との関係を示す図である。

[図24]たわみの最大値の近似解と厳密解との関係を示す図である。

発明を実施するための形態

[0033] (第1実施形態)

以下、本発明に係る連続梁の評価方法及び連続梁の評価プログラムの第1実施形態を、図1から図14を参照しながら説明する。

[0034] [1. 連続梁]

本実施形態の連続梁の評価方法（以下、単に評価方法とも言う）は、例えば、図1及び図2に示す建築物1を構成する連続梁11を評価するのに好適に用いられる。なお、図1では後述する床17を透過して示し、図2では後述する柱33を示していない。ここで言う連続梁11を評価するとは、連続梁11の曲げモーメント、回転角、及びたわみ分布等を求めて、例えば連続梁11の曲げ耐力が連続梁11の曲げモーメントに対してどの程度余裕があるかを評価することを意味する。

この例では、連続梁 1 1 は、長手方向に隣り合う端部同士が互いに半剛接合されて中間支点 1 2 a とされた n 本（この例では 2 本）の梁（小梁） 1 3 を備えている。なお、 n は 2 以上の自然数である。

この例では、梁 1 3 は、床 1 7 と、梁本体 1 8 と、を備えている。なお、梁 1 3 の構成はこの例に限定されない。

床 1 7 は、いわゆる合成スラブであり、梁本体 1 8 により下方から支持されている。床 1 7 は、デッキプレート 2 0 と、デッキプレート 2 0 上に配置された RC（Reinforced Concrete）スラブ 2 1 と、を備えている。

デッキプレート 2 0 の凹凸形状は、水平面に沿う方向であって、梁本体 1 8 が延びる方向とは直交する方向に延びている。

RCスラブ 2 1 は、コンクリート 2 2 と、鉄筋 2 3 と、を備えている。コンクリート 2 2 は、上下方向が厚さ方向となる板状に形成されている。コンクリート 2 2 は、デッキプレート 2 0 により下方から支持されている。

鉄筋 2 3 は、水平面に沿って延びていて、コンクリート 2 2 内に埋設されている。例えば、鉄筋 2 3 は、平面視で格子状に配置されている。

n 本の梁 1 3 は、梁 1 3 の長手方向に並べて配置されている。

[0035] 梁本体 1 8 は鉄骨の H 形鋼で形成され、水平面に沿って延びている。梁本体 1 8 の上フランジには、スタッド 2 6 の下端部が固定されている。スタッド 2 6 は、デッキプレート 2 0 を貫通している。スタッド 2 6 の上端部は、コンクリート 2 2 内に埋設されている。

梁本体 1 8 の端は、中間支点 1 2 a において、水平面に沿って延びる第 1 大梁（中間支持部） 2 7 にそれぞれ半剛接合されている。中間支点 1 2 a は、第 1 大梁 2 7 により上下方向に支持されている。第 1 大梁 2 7 は、梁本体 1 8 に直交する方向に延びている。梁本体 1 8 と第 1 大梁 2 7 との半剛接合は、例えばシアプレート 2 8 及びボルト 2 9 等により行われている。

[0036] 連続梁 1 1 全体の両端である一対の端支点 1 2 b は、一対の第 2 大梁（端支持部） 3 1 により上下方向に支持されている。第 1 大梁 2 7 及び第 2 大梁 3 1 は、水平面に沿う第 1 方向に沿って延びている。端支点 1 2 b における

梁本体 1 8 の端と第 2 大梁 3 1 との接合の状態は特に限定されず、ピン接合、半剛接合、及び剛接合のいずれでもよい。

建築物 1 は、水平面に沿うとともに第 1 方向に直交する第 2 方向に沿って延びる第 3 大梁 3 2 を備えている。第 1 大梁 2 7 及び第 2 大梁 3 1 と、第 3 大梁 3 2 と、の接続部分は、柱 3 3 により上下方向に支持されている。

[0037] 以下では、このように構成された連続梁 1 1 の評価方法について説明する。

[0038] [2. 連続梁のせん断力分布及びモーメント分布の導出]

[2. 1. 基本式]

n 本（スパン）の梁 1 3 を備える連続梁 1 1 において、連続梁 1 1 の一方の端支点 1 2 b から数えて任意の i 本目（ i は自然数で、 $1 \leq i \leq n$ ）の梁 1 3 の諸元、及び梁 1 3 に作用する曲げモーメント、外力、せん断力等を、図 3 から図 5 に示すように仮定する。

すなわち、図 3 に示すように、 i 本目の梁 1 3 _{i} が水平面に沿って延びるとし、梁 1 3 _{i} の長さが L_i (m) であるとする。なお、各梁 1 3 _{i} を区別しないと言うときには、梁 1 3 とも言う。

梁 1 3 _{i} では、正曲げ（下に凸）の曲げ剛性と負曲げ（上に凸）の曲げ剛性が互いに異なるとする。梁 1 3 _{i} の正曲げの曲げ剛性を $E I_{s,i}$ ($N m^2$) とし、梁 1 3 _{i} の負曲げの曲げ剛性を $E I_{h,i}$ ($N m^2$) とする。

[0039] 図 4 に示すように、梁 1 3 _{i} に沿って右向きを正とした場合の、座標 x_i (m) を規定する。梁 1 3 _{i} の左端の位置を、座標 x_i の原点 ($x_i = 0$ の位置) とする。梁 1 3 _{i} には、全長にわたって下方向きの等分布荷重（鉛直荷重） w_i (N/m) が作用すると仮定する。梁 1 3 _{i} の左端の回転剛性を $S_{j,l,i}$ ($N m/rad$) とし、梁 1 3 _{i} の右端の回転剛性を $S_{j,r,i}$ ($N m/rad$) と規定する。

図 3 に示すように、梁 1 3 _{i} の左端に作用する曲げモーメント（負曲げモーメント）の絶対値を $M_{j,l,i}$ ($N m$) とし、梁 1 3 _{i} の右端に作用する曲げモーメント（負曲げモーメント）の絶対値を $M_{j,r,i}$ ($N m$) と規定する。梁 1 3 _{i}

には、曲線 L 1 で示す曲げモーメントが作用する。なお、曲げモーメントは下に凸の曲げを生じる向きを正とする。梁 1 3_i において、曲げモーメントが 0 になる座標 x_i を、 $x_{h,i}$ (m)、 $x_{s,i}$ (m) ($0 \leq x_{h,i} < x_{s,i} \leq L_i$) と規定する。

図 5 に示すように、梁 1 3_i の左端が大梁 2 7、3 1 等により下方から支持されるせん断力（外力）を $V_{jl,i}$ (N) とし、梁 1 3_i の右端が大梁 2 7、3 1 等により下方から支持されるせん断力を $V_{jr,i}$ (N) とする。梁 1 3_i には、曲線 L 2 で示すせん断力が作用する。

[0040] このとき、梁 1 3_i に作用するせん断力分布 $V(x_i)$ (N) と曲げモーメント分布 $M(x_i)$ (Nm) は、(2 1) 式及び (2 2) 式で表せる。なお、せん断力 $V_{jl,i}$ 、 $V_{jr,i}$ 、及びせん断力分布 $V(x_i)$ は、時計回りの回転を生じる方向を正 (+) とする。

[0041] [数4]

$$V_{(x_i)} = V_{jl,i} - w_i \cdot x_i \quad \cdot \cdot (21)$$

$$M_{(x_i)} = \int V_{(x_i)} dx = V_{jl,i} \cdot x_i - \frac{w_i \cdot x_i^2}{2} - M_{jl,i} \quad \cdot \cdot (22)$$

[0042] (2 2) 式に、 $x_i = L_i$ における曲げモーメントの境界条件を用いると、(2 3) 式及び (2 4) 式が得られる。

[0043] [数5]

$$M_{(x_i)}|_{x_i=L_i} = V_{jl,i} \cdot L_i - \frac{w_i \cdot L_i^2}{2} - M_{jl,i} = -M_{jr,i} \quad \cdot \cdot (23)$$

$$V_{jl,i} = \frac{M_{jl,i} - M_{jr,i}}{L_i} + \frac{w_i \cdot L_i}{2} \quad \cdot \cdot (24)$$

[0044] ここで、(2 2) 式から (2 4) 式における曲げモーメントの絶対値 $M_{jl,i}$ 、 $M_{jr,i}$ は、負曲げモーメントの大きさを表し、(2 4-1) 及び (2 4-2) で定義される。

[0045] [数6]

$$M_{jl,i} = |M_{(x_i)}|_{x_i=0} \quad \cdot \cdot (24-1)$$

$$M_{jr,i} = |M_{(x_i)}|_{x_i=L_i} \quad \cdot \cdot (24-2)$$

[0046] (21) 式に (24) 式を代入し、 $x_i = L_i$ における力の釣り合い条件を用いると、(25) 式及び (26) 式が得られる。

[0047] [数7]

$$V_{jl,i} - V_{jr,i} = w_i \cdot L_i \quad \cdot \cdot (25)$$

$$V_{jr,i} = w_i \cdot L_i + V_{jl,i} = \frac{M_{jl,i} - M_{jr,i}}{L_i} - \frac{w_i \cdot L_i}{2} \quad \cdot \cdot (26)$$

[0048] (21) 式に (26) 式を代入すると、せん断力分布 $V(x_i)$ についての (27) 式が得られる。

[0049] [数8]

$$V_{(x_i)} = \frac{M_{jl,i} - M_{jr,i}}{L_i} + w_i \left(\frac{L_i}{2} - x_i \right) \quad \cdot \cdot (27)$$

[0050] (22) 式に (24) 式を代入すると、(28) 式が得られる。

[0051] [数9]

$$M_{(x_i)} = \left(\frac{M_{jl,i} - M_{jr,i}}{L_i} + \frac{w_i \cdot L_i}{2} \right) \cdot x_i - \frac{w_i \cdot x_i^2}{2} - M_{jl,i} \quad \cdot \cdot (28)$$

[0052] (22) 式を用いて、曲げモーメント分布 $M(x_i) = 0$ のときの座標 x_i ($x_{h,i}$, $x_{s,i}$) を求める。(29) 式を x_i について解く。 $(x_{h,i} < x_{s,i})$ であることを考慮すると、(30) 式及び (31) 式が得られる。

[0053] [数10]

$$M_{(x_i)} = \left(\frac{M_{jl,i} - M_{jr,i}}{L_i} + \frac{w_i \cdot L_i}{2} \right) \cdot x_i - \frac{w_i \cdot x_i^2}{2} - M_{jl,i} = 0 \quad \cdot \cdot (29)$$

$$x_{h,i} = \frac{1}{w_i} \left\{ V_{jl,i} - \sqrt{V_{jl,i}^2 - 2w_i \cdot M_{jl,i}} \right\} \quad \cdot \cdot (30)$$

$$x_{s,i} = \frac{1}{w_i} \left\{ V_{jl,i} + \sqrt{V_{jl,i}^2 - 2w_i \cdot M_{jl,i}} \right\} \quad \cdot \cdot (31)$$

[0054] [2. 2. 回転角分布]

梁 13_i の曲率分布を、下に凸の場合を正 (+) として、 $\rho(x_i)$ (1/m) と規定する。梁 13_i の上下方向のたわみ (変位) 分布を、鉛直下向きを正 (+) として $\delta(x_i)$ (m) と規定する。このとき、曲率分布 $\rho(x_i)$

は(34)式で表せる。

[0055] [数11]

$$\frac{d^2 \delta_{(x_i)}}{dx_i^2} = \rho_{(x_i)} = \begin{cases} \frac{M_{(x_i)}}{EI_{h,i}} & (x_i \leq x_{h,i}, x_{s,i} \leq x_i) \\ \frac{M_{(x_i)}}{EI_{s,i}} & (x_{h,i} \leq x_i \leq x_{s,i}) \end{cases} \quad \cdot \cdot (34)$$

[0056] [2. 2. 1. 区間 [a] = [0, x_{h,i}] の回転角分布]

座標 x_i が 0 以上 $x_{h,i}$ 以下のとき、梁 13_i の回転角分布を $\phi(x_i)$ (rad : ラジアン) と規定する。回転角分布 $\phi(x_i)$ は、水平線からの回転方向が時計回りの場合を正 (+) と規定する。回転角分布 $\phi(x_i)$ は、曲率分布 $\rho(x_i)$ を (28) 式及び (34) 式で表し、さらに曲率分布 $\rho(x_i)$ を区間 [0, x_i] で積分して、(35) 式を用いることで、(36) 式のように求められる。回転角分布 $\phi(x_i)$ を求めるときに、 $x_i = 0$ における境界条件である、回転角分布 $\phi(x_i = 0) = \phi_{0i}$ を考慮する。すなわち、梁 13_i における左側（後述する第 1 端支点 12b_i 側）の回転角は、 ϕ_{0i} である。

なお、区間 [a] での回転角分布 $\phi(x_i)$ を、回転角分布 $\phi_a(x_i)$ とも言う。

[0057] [数12]

$$f_{(x_i)} = \left(\frac{M_{jl,i} - M_{jr,i}}{L_i} + \frac{w_i \cdot L_i}{2} \right) \cdot \frac{x_i^2}{2} - \frac{w_i \cdot x_i^3}{6} - M_{jl,i} \cdot x_i \quad \cdot \cdot (35)$$

$$\phi_{a(x_i)} = \int_0^{x_i} \{-\rho_{(x_i)}\} dx_i = -\frac{1}{EI_{h,i}} f_{(x_i)} + \phi_{0i} \quad \cdot \cdot (36)$$

[0058] [2. 2. 2. 区間 [b] = [x_{h,i}, x_{s,i}] の回転角分布]

座標 x_i が $x_{h,i}$ 以上 $x_{s,i}$ 以下のとき、梁 13_i の回転角分布 $\phi(x_i)$ は、曲率分布 $\rho(x_i)$ を (28) 式及び (34) 式で表し、区間 [$x_{h,i}$, x_i] で積分して、(37) 式のように求められる。回転角分布 $\phi(x_i)$ を求めるときに、 $x_i = x_{h,i}$ における境界条件を考慮する。

なお、区間 [b] での回転角分布 $\phi(x_i)$ を、回転角分布 $\phi_b(x_i)$ とも

言う。

[0059] [数13]

$$\varphi_{b(x_i)} = \int_{x_{h,i}}^{x_i} \{-\rho(x_i)\} dx_i + \varphi_{a(x_i)}|_{x_i=x_{h,i}} = -\left(\frac{1}{EI_{h,i}} - \frac{1}{EI_{s,i}}\right) f(x_i)|_{x_i=x_{h,i}} - \frac{1}{EI_{s,i}} f(x_i) + \varphi_{0i} \quad \cdot \cdot (37)$$

[0060] [2. 2. 3. 区間 $[c] = [x_{s,i}, L_i]$ の回転角分布]

座標 x_i が $x_{s,i}$ 以上 L_i 以下のとき、梁 13_i の回転角分布 $\phi(x_i)$ は、曲率分布 $\rho(x_i)$ を (28) 式及び (34) 式で表し、区間 $[x_{s,i}, x_i]$ で積分して、(38) 式のように求められる。回転角分布 $\phi(x_i)$ を求めるときに、 $x_i = x_{s,i}$ における境界条件を考慮する。

なお、区間 $[c]$ での回転角分布 $\phi(x_i)$ を、回転角分布 $\phi_c(x_i)$ とも言う。

[0061] [数14]

$$\begin{aligned} \varphi_{c(x_i)} &= \int_{x_{s,i}}^{x_i} \{-\rho(x_i)\} dx_i + \varphi_{b(x_i)}|_{x_i=x_{s,i}} \\ &= -\left(\frac{1}{EI_{h,i}} - \frac{1}{EI_{s,i}}\right) (f(x_i)|_{x_i=x_{h,i}} - f(x_i)|_{x_i=x_{s,i}}) - \frac{1}{EI_{h,i}} f(x_i) + \varphi_{0i} \quad \cdot \cdot (38) \end{aligned}$$

[0062] [2. 3. たわみ分布]

[2. 3. 1. 区間 $[a] = [0, x_{h,i}]$ のたわみ分布]

座標 x_i が 0 以上 $x_{h,i}$ 以下のとき、梁 13_i のたわみ分布 $\delta(x_i)$ は、回転角分布 $\phi(x_i)$ を区間 $[0, x_i]$ で積分して、(41) 式を用いて (42) 式のように求められる。たわみ分布 $\delta(x_i)$ を求めるときに、 $x_i = 0$ における境界条件である、鉛直変位 $\delta(x_i = 0) = \delta_{0i}$ を考慮する。

なお、区間 $[a]$ でのたわみ分布 $\delta(x_i)$ を、たわみ分布 $\delta_a(x_i)$ とも言う。

[0063] [数15]

$$F(x_i) = \int \{f(x_i)\} dx_i = \left(\frac{M_{jL,i} - M_{jr,i}}{L_i} + \frac{w_i \cdot L_i}{2}\right) \cdot \frac{x_i^3}{6} - \frac{w_i \cdot x_i^4}{24} - \frac{M_{jL,i}}{2} \cdot x_i^2 \quad \cdot \cdot (41)$$

$$\delta_{a(x_i)} = \int_0^{x_i} \{\varphi(x_i)\} dx_i = -\frac{1}{EI_{h,i}} F(x_i) + \varphi_{0i} \cdot x_i + \delta_{0i} \quad \cdot \cdot (42)$$

[0064] [2. 3. 2. 区間 $[b] = [x_{h,i}, x_{s,i}]$ のたわみ分布]

座標 x_i が $x_{h,i}$ 以上 $x_{s,i}$ 以下のとき、たわみ分布 $\delta(x_i)$ は、回転角分布 $\phi(x_i)$ を区間 $[x_{h,i}, x_i]$ で積分して、(43) 式のように求められる。たわみ分布 $\delta(x_i)$ を求めるときに、 $x_i = x_{h,i}$ における境界条件を考慮する。

なお、区間 $[b]$ でのたわみ分布 $\delta(x_i)$ を、たわみ分布 $\delta_b(x_i)$ とも言う。

[0065] [数16]

$$\begin{aligned}\delta_b(x_i) &= \int_{x_{h,i}}^{x_i} \{\phi(x_i)\} dx_i + \delta_a(x_i)|_{x_i=x_{h,i}} \\ &= -\left(\frac{1}{EI_{h,i}} - \frac{1}{EI_{s,i}}\right) \left\{ F(x_i)|_{x_i=x_{h,i}} + f(x_i)|_{x_i=x_{h,i}} (x_i - x_{h,i}) \right\} - \frac{1}{EI_{s,i}} F(x_i) + \phi_{0i} \cdot x_i + \delta_{0i} \\ &\quad \cdot \cdot (43)\end{aligned}$$

[0066] [2. 3. 3. 区間 $[c] = [x_{s,i}, L_i]$ のたわみ分布]

座標 x_i が $x_{s,i}$ 以上 L_i 以下のとき、たわみ分布 $\delta(x_i)$ は、回転角分布 $\phi(x_i)$ を区間 $[x_{s,i}, x_i]$ で積分して、(44) 式のように求められる。たわみ分布 $\delta(x_i)$ を求めるときに、 $x_i = x_{s,i}$ における境界条件を考慮する。

なお、区間 $[c]$ でのたわみ分布 $\delta(x_i)$ を、たわみ分布 $\delta_c(x_i)$ とも言う。

[0067] [数17]

$$\begin{aligned}\delta_c(x_i) &= \int_{x_{s,i}}^{x_i} \{\phi(x_i)\} dx_i + \delta_b(x_i)|_{x_i=x_{s,i}} \\ &= -\left(\frac{1}{EI_{h,i}} - \frac{1}{EI_{s,i}}\right) \left\{ F(x_i)|_{x_i=x_{h,i}} - F(x_i)|_{x_i=x_{s,i}} + f(x_i)|_{x_i=x_{h,i}} (x_i - x_{h,i}) \right. \\ &\quad \left. - f(x_i)|_{x_i=x_{s,i}} (x_i + x_{s,i}) \right\} \\ &\quad - \frac{1}{EI_{h,i}} F(x_i) + \phi_{0i} \cdot x_i + \delta_{0i} \quad \cdot \cdot (44)\end{aligned}$$

[0068] [3. 連続梁の評価方法における計算手順]

評価方法では、中間支点 1 2 a 及び一対の端支点 1 2 b での複数の曲げモーメント $M_{j,i}$ 、及び一対の端支点 1 2 b での複数の回転角 ϕ_{01} 、 ϕ_c を、与

条件に基づいて求める。

ここで言う与条件を説明する前に、複数の鉛直変位、複数の回転剛性について説明する。

まず、図6に示すように、一对の端支点12bのうち、左側の端支点12b（一方の端支点）を第1端支点12b₁とも言う。一对の端支点12bのうち、右側の端支点12b（他方の端支点）を第2端支点12b₂とも言う。なお、図6中には、座標の一例として第i梁13_iの座標x_iを示す。

前記座標x_iは、梁13_iの第1端支点12b₁側の端を原点とし、第1端支点12b₁から第2端支点12b₂に向かう向きを正とする。以下では、n本の梁13_iのうち、第1端支点12b₁から第2端支点12b₂に向かってi本目の梁13_iを、第i梁13_iとも言う。例えば、n本の梁13のうち最も第1端支点12b₁側の梁13は、第1梁13₁である。

前記回転剛性S_{j_l, i}は第i梁13_iにおける第1端支点12b₁側の端（中間支点12a）での回転剛性である。前記回転剛性S_{j_r, i}は、第i梁13_iにおける第2端支点12b₂側の端（中間支点12a）での回転剛性である。

[0069] 第1梁13₁における第1端支点12b₁で上下方向のたわみを、鉛直下方を正（+）として、 δ_0 （m）とする。1以上（n-1）以下のiに対して、第i梁13_iにおける第2端支点12b₂側の中間支点12aでの鉛直変位を、 δ_i （m）とする。第n梁13_nにおける第2端支点12b₂での鉛直変位を、 δ_n （m）とする。与条件における複数の鉛直変位は、0以上n以下の自然数iに対する鉛直変位 δ_i である。

例えば、図1に示す連続梁11の中間支点12aでの鉛直変位 δ_i は、公知の方法により第1大梁27に作用すると規定される分布荷重の範囲Rから求めてもよい。そして、その範囲R内に作用する分布荷重、及び第1大梁27の曲げ剛性等から、中間支点12aでの鉛直変位 δ_i を求める。

[0070] 各支点12a、12bに、例えば大梁の回転抵抗等による曲げモーメントは作用せず、長手方向に隣接する梁13の端に作用する曲げモーメントは同じ値とする。すなわち、例えば、第i梁13_iの右端に作用する曲げモーメン

トの絶対値 $M_{j,r,i}$ と、第 $(i+1)$ 梁 13_{i+1} の左端に作用する曲げモーメントの絶対値 $M_{j,l,i+1}$ と、は等しい。その等しい値を、 $M_{j,i}$ (Nm) とする。曲げモーメント $M_{j,i}$ は、 1 以上 $(n-1)$ 以下の i に対して、第 i 梁 13_i における第 2 端支点 $12b_2$ 側の中間支点 $12a$ での曲げモーメントである。

なお、曲げモーメント $M_{j,0}$ は、第 1 梁 13_1 の左端に作用する曲げモーメントの絶対値 $M_{j,l,1}$ (第 1 梁 13_1 における第 1 端支点 $12b_1$ での曲げモーメント) と等しい。曲げモーメント $M_{j,n}$ は、第 n 梁 13_n の右端に作用する曲げモーメントの絶対値 $M_{j,r,n}$ (第 n 梁 13_n における第 2 端支点 $12b_2$ での曲げモーメント) と等しい。

[0071] このように、連続梁 11 における中間支点 $12a$ 及び一对の端支点 $12b$ での複数 $(n+1)$ の曲げモーメント $M_{j,0}, \dots, M_{j,n}$ が規定される。

[0072] 前記与条件は、前記複数の鉛直変位と、複数の回転剛性 $S_{j,i}$ と、 n 本の梁 13_i それぞれの長さ L_i と、 n 本の梁 13_i それぞれの曲げ剛性 (正曲げの曲げ剛性 $EI_{s,i}$ 及び負曲げの曲げ剛性 $EI_{h,i}$) と、 n 本の梁 13_i それぞれに作用する等分布荷重 w_i と、を含む。

[0073] このとき、各支点 $12a, 12b$ における梁 13_i の回転角は、各支点 $12a, 12b$ における梁 13_i の回転剛性と、曲げモーメントの絶対値 $M_{j,l,i}, M_{j,r,i}$ を用いて表せる。

ここで、第 1 梁 13_1 の左端の回転剛性 $S_{j,l,1}$ を $S_{j,0}$ 、中間支点 $12a$ の代表点における回転剛性を $S_{j,i}$ とする。

図6に示すように、連続梁 11 は、 n 本の梁 13_i を備えている。連続梁 11 の中間支点 $12a$ は、第 1 大梁 27 にそれぞれ半剛接合され、連続梁 11 の端支点 $12b$ は、第 2 大梁 31 により支持されている。

[0074] 図7に示すように、 $(i-1)$ 本目の第 $(i-1)$ 梁 13_{i-1} と、 i 本目の第 i 梁 13_i との接合部を考える。

第 i 梁 13_i の左端での回転角を $\phi_{j,l,i}$ (rad) とし、第 i 梁 13_i の右端での回転角を $\phi_{j,r,i}$ (rad) と規定する。この場合、 $(i-1)$ 本目の

第 $(i-1)$ 梁 13_{i-1} の右端での回転角は、 $\phi_{jr,i-1}$ (rad) となる。
 水平面に対する第 i 梁 13_i の左端での回転角を、 $\phi_{jl,i}$ (rad) と規定する。
 水平面に対する第 i 梁 13_i の右端での回転角を、 $\phi_{r,i}$ (rad) と規定する。
 この場合、水平面に対する第 $(i-1)$ 梁 13_{i-1} の右端での回転角は、 $\phi_{r,i-1}$ (rad) となる。

第 $(i-1)$ 梁 13_{i-1} の右端で回転剛性 $S_{jr,i-1}$ が生じる位置と、第 i 梁 13_i の左端で回転剛性 $S_{jl,i}$ が生じる位置との距離が、極小長さであるとする。

回転角分布の正負を考慮して、各変数の定義から (47) 式及び (48) 式が得られる。

[0075] [数18]

$$\phi_{jr,i-1} = -\frac{M_{jr,i-1}}{S_{jr,i-1}} \quad \cdot \cdot (47)$$

$$\phi_{jl,i} = \frac{M_{jl,i}}{S_{jl,i}} \quad \cdot \cdot (48)$$

[0076] 図7の変形状態の幾何学的関係から、(49)式が得られる。

[0077] [数19]

$$-\phi_{jr,i-1} + \phi_{jl,i} = -\phi_{r,i-1} + \phi_{l,i} = \frac{M_{j,i-1}}{S_{j,i-1}} \quad \cdot \cdot (49)$$

[0078] この場合、極小長さが無視できると仮定する。このとき、図8に示すように、第 $(i-1)$ 梁 13_{i-1} の回転剛性 $S_{jr,i-1}$ 及び第 i 梁 13_i の回転剛性 $S_{jl,i}$ が、回転剛性 $S_{j,i-1}$ で代表される。回転剛性 $S_{j,i-1}$ は、(47) 式及び (48) 式を (49) 式に代入した、(50) 式及び (51) 式から得られる。

[0079] [数20]

$$\frac{M_{jr,i-1}}{S_{jr,i-1}} + \frac{M_{jl,i}}{S_{jl,i}} = \left(\frac{1}{S_{jr,i-1}} + \frac{1}{S_{jl,i}} \right) M_{j,i-1} = \frac{M_{j,i-1}}{S_{j,i-1}} \quad \cdot \cdot (50)$$

$$S_{j,i-1} = \left(\frac{1}{S_{jr,i-1}} + \frac{1}{S_{jl,i}} \right)^{-1} \quad \cdot \cdot (51)$$

[0080] 従って、回転剛性 $S_{j, i-1}$ は、各中間支点 1 2 a を挟む左右の接合部の回転ばねの直列結合で表せる。

ここで、 $i = 2 \sim (n-1)$ に対し、(38) 式における ϕ_{0i} は、次のように求められる。図 8 から、第 i 梁 1 3 _{i} の左端の中間支点 1 2 a における回転角 $\phi_{0i} = \phi_{l, i}$ は、(49) 式を用いて右端の中間支点 1 2 a における回転角 $\phi_{r, i-1}$ と関係づけられる。(49) 式では、この中間支点 1 2 a におけるモーメントの絶対値 $M_{j, i-1}$ と回転剛性 $S_{j, i-1}$ が用いられる。

さらに、 $\phi_{r, i-1}$ は第 $(i-1)$ 梁 1 3 _{$i-1$} の右端における回転角なので、第 $(i-1)$ 梁 1 3 _{$i-1$} における (38) 式に $x_{i-1} = L_{i-1}$ を代入した値に等しい。

従って、(38) 式を (49) 式に代入し、(8) 式が導出される。第 1 端支点 1 2 b₁ の回転角初期値 ϕ_{01} 及び各中間支点 1 2 a と両端支点 1 2 b のモーメントが与えられると、 $i = 2 \sim (n-1)$ に対する ϕ_{0i} は (8) 式によって順に求められる。

連続梁 1 1 を評価するのに際し、曲げモーメントについては、0 以上 n 以下の自然数 i に対する曲げモーメント $M_{j, i}$ (複数の曲げモーメント) である $(n+1)$ 個の未知数が規定される。

[0081] 連続梁 1 1 の両端支点 1 2 b における接合状態にもよるが、一般的に以下のことが言える。

第 1 梁 1 3₁ の両端での曲げモーメント $M_{j, 0}$, $M_{j, 1}$ 、及び未知数である第 1 端支点 1 2 b₁ での第 1 梁 1 3₁ の回転角 ϕ_{01} ($\phi_{j, l, 1}$) にそれぞれ初期値を与える。すると、 $x_1 = L_1$ における (38) 式の回転角分布 $\phi(x_1)$ によって第 1 梁 1 3₁ の回転角 $\phi_{r, 1}$ が決まる。(49) 式によって、第 1 梁 1 3₁ に隣接する 2 本目の第 2 梁 1 3₂ の回転角 $\phi_{l, 2}$ が決まる。

回転角 $\phi_{l, 2}$ は、第 2 梁 1 3₂ に対して (38) 式を適用する際の回転角分布 $\phi(x_2)$ の $x_2 = 0$ における値である ϕ_{02} に相当する。

同様に、3 以上 n 以下である i に対して、第 $(i-1)$ 梁 1 3 _{$i-1$} の両端接合部の曲げモーメント $M_{j, i-2}$, $M_{j, i-1}$ を与えると、 $x_{i-1} = L_{i-1}$ にお

る(38)式の回転角分布 $\phi_0(x_{i-1})$ によって、第 $(i-1)$ 梁13 $_{i-1}$ の右端での回転角 $\phi_{r,i-1}$ が決まる。(49)式によって、第 $(i-1)$ 梁13 $_{i-1}$ に隣接する第 i 梁13 $_i$ の左端での回転角 $\phi_{l,i}$ が決まる。なお、第 i 梁13 $_i$ の左端での回転角 $\phi_{l,i}$ は、第 i 梁13 $_i$ に対して(38)式を適用する際の回転角分布 $\phi(x_i)$ の $x_i=0$ における値である $\phi_{0,i}$ に相当する。

[0082] こうして $i=1\sim n$ まで曲げモーメント $M_{j,i-1}$, $M_{j,i}$ を仮定し、順に対応する回転角 $\phi_{r,i-1}$ 及び回転角 $\phi_{l,i}$ を求める。すると、 $x_i=L_i$ における(44)式のたわみ分布 $\delta_0(x_i)$ から、各支点12a, 12bでの鉛直変位 $\delta_{0,i}$ が得られる。

なお、第2端支点12b $_2$ での第 n 梁13 $_n$ の回転角 $\phi_{r,n}$ も未知数として規定される。すなわち、回転角については、2個の回転角 $\phi_{0,1}$ 及び回転角 $\phi_{r,n}$ が未知数である。

こうして未知数の数は、例えば、各支点12a, 12bでの曲げモーメント $M_{j,i}$ 、及び両端支点12bでの回転角の $(n+3)$ である。

[0083] これに対し、複数の未知数を解くための複数の第1境界条件は、以下のよう規定される。

与条件である第1端支点12b $_1$ での鉛直変位 $\delta_{0,1}$ 、及び1以上 n 以下の i に対する $x_i=L_i$ における(44)式から、0以上 n 以下の i に対して、複数の第1境界条件である(54-1)式から(54-($n+1$))式の $(n+1)$ 個の関係式が得られる。これら $(n+1)$ 個の関係式は、複数の鉛直変位 δ_i の関係式である。

[0084]

[数21]

$$\begin{aligned}
\delta_0 &= \delta_{01} \quad \cdots (54-1) \\
\delta_1 &= -\left(\frac{1}{EI_{h,1}} - \frac{1}{EI_{s,1}}\right) \left\{ F_{(x_1)} \Big|_{x_1=x_{h,1}} - F_{(x_1)} \Big|_{x_1=x_{s,1}} + f_{(x_1)} \Big|_{x_1=x_{h,1}} (L_1 - x_{h,1}) \right. \\
&\quad \left. - f_{(x_1)} \Big|_{x_1=x_{s,1}} (L_1 + x_{s,1}) \right\} - \frac{1}{EI_{h,1}} F_{(x_1)} \Big|_{x_1=L_1} + \varphi_{01} \cdot L_1 + \delta_{01} \\
&= \delta_{02} \quad \cdots (54-2) \\
\delta_2 &= -\left(\frac{1}{EI_{h,2}} - \frac{1}{EI_{s,2}}\right) \left\{ F_{(x_2)} \Big|_{x_2=x_{h,2}} - F_{(x_2)} \Big|_{x_2=x_{s,2}} + f_{(x_2)} \Big|_{x_2=x_{h,2}} (L_2 - x_{h,2}) \right. \\
&\quad \left. - f_{(x_2)} \Big|_{x_2=x_{s,2}} (L_2 + x_{s,2}) \right\} - \frac{1}{EI_{h,2}} F_{(x_2)} \Big|_{x_2=L_2} + \varphi_{02} \cdot L_2 + \delta_{02} \\
&= \delta_{03} \quad \cdots (54-3) \\
&\quad \vdots \\
\delta_n &= -\left(\frac{1}{EI_{h,n}} - \frac{1}{EI_{s,n}}\right) \left\{ F_{(x_n)} \Big|_{x_n=x_{h,n}} - F_{(x_n)} \Big|_{x_n=x_{s,n}} + f_{(x_n)} \Big|_{x_n=x_{h,n}} (L_n - x_{h,n}) \right. \\
&\quad \left. - f_{(x_n)} \Big|_{x_n=x_{s,n}} (L_n + x_{s,n}) \right\} - \frac{1}{EI_{h,n}} F_{(x_n)} \Big|_{x_n=L_n} + \varphi_{0n} \cdot L_n + \delta_{0n} \\
&\quad \cdots (54 - (n+1))
\end{aligned}$$

[0085] 例えば、(54-2)式は、曲げモーメント $M_{j,0}$ 、 $M_{j,1}$ についての方程式である。(54-3)式は、曲げモーメント $M_{j,0}$ 、 $M_{j,1}$ 、 $M_{j,2}$ についての方程式である。(54-(n+1))式は、曲げモーメント $M_{j,0}$ 、 $M_{j,1}$ 、 $M_{j,2}$ 、 $\cdots$ 、 $M_{j,n}$ についての方程式である。

[0086] 連続梁11の両端支点12bでの回転剛性、曲げモーメント、及び回転角の関係式から、(55-1)式及び(55-2)式の2個の関係式が得られる。

[0087] [数22]

$$\begin{aligned}
M_{j,0} &= S_{i,0} \cdot \varphi_{l,0} \quad \cdots (55-1) \\
M_{j,n} &= S_{i,n} \cdot \varphi_{r,n} \quad \cdots (55-2)
\end{aligned}$$

[0088] (55-1)式及び(55-2)式は、連続梁11の両端支点12bでの接合状態に応じて得られる。例えば、連続梁11の左側の端支点12b(第1端支点12b₁)がピン接合であれば、曲げモーメント $M_{j,0}$ は0である。

こうして第1境界条件の数は、(n+3)個の関係式の(n+3)である。すなわち、複数の第1境界条件の数は複数の未知数の数と同数になる。

従って、複数の未知数が複数の第1境界条件を満たすように複数の未知数

を解けば、 $(n+1)$ 個の曲げモーメント $M_{j,i}$ の組み合わせは一つに決まる。

[0089] ここで、全ての支点 1 2 a, 1 2 b での曲げモーメント $M_{j,i}$ の値を仮定する。仮定した曲げモーメント $M_{j,i}$ から得られた、各支点 1 2 a, 1 2 b での鉛直変位 δ_i に対応する鉛直変位の計算結果を、 $\delta_{i,calc}$ (m) とする。全ての支点 1 2 a, 1 2 b での曲げモーメント $M_{j,i}$ の値を仮定し、仮定した曲げモーメント $M_{j,i}$ から得られた鉛直変位の計算結果 $\delta_{i,calc}$ と、変形の適合条件から決まる鉛直変位 δ_i との差の 2 乗の、全ての支点 1 2 a, 1 2 b での和 ((57) 式による値、変位残差) を目的関数と規定する。すると、目的関数が最小となる曲げモーメント $M_{j,i}$ の組み合わせを探す最適化計算により、全ての支点 1 2 a, 1 2 b での曲げモーメント $M_{j,i}$ を同定することができる。

最適化計算には、公知の差分進化法 (Differential Evolution Method) 等を用いることができる。

なお、連続梁 1 1 の両端支点 1 2 b での接合状態に応じた連続梁の評価方法における計算手順については、後述する。

[0090] [数23]

$$\sum_{i=2}^{n+1} (\delta_{i-1,calc} - \delta_{i-1})^2 \quad \cdots (57)$$

[0091] [4. 連続梁の評価方法に用いられる評価装置]

連続梁の評価方法を行い連続梁 1 1 を評価するには、例えば図 9 に示す評価装置 1 0 1 が用いられる。評価装置 1 0 1 はコンピュータであり、CPU (Central Processing Unit) 1 1 1 と、主記憶装置 1 2 5 と、補助記憶装置 1 2 6 と、入出力インタフェース (I/O) 1 3 1 と、記録・再生装置 1 3 6 と、を備えている。

[0092] 主記憶装置 1 2 5 は、CPU 1 1 1 のワークエリア等になる RAM (Random Access Memory) 等である。

入出力インタフェース 1 3 1 は、キーボードやマウス等の入力装置 1 3 2

、及び表示装置 1 3 3 に接続される。

記録・再生装置 1 3 6 は、C D や D V D 等のディスク型等の記録媒体 1 3 7 に対するデータの記録や再生を行う。

[0093] 補助記憶装置 1 2 6 は、各種データやプログラム等が記憶されるハードディスクドライブ装置等である。補助記憶装置 1 2 6 には、前記コンピュータを評価装置 1 0 1 として機能させるための連続梁の評価プログラム（以下、単に評価プログラムと言う）1 2 7 や、O S プログラム等の各種プログラム、予め定められた閾値等が格納されている。評価プログラム 1 2 7 を含む各種プログラムは、記録・再生装置 1 3 6 を介して記録媒体 1 3 7 から補助記憶装置 1 2 6 に取り込まれる。評価プログラム等は、記録媒体 1 3 7 に格納される。

なお、これらのプログラムは、フラッシュメモリ等の携帯可能なメモリや、図示されていない通信装置を介して外部装置から補助記憶装置 1 2 6 に取り込まれてもよい。

[0094] この補助記憶装置 1 2 6 には、さらに、評価プログラム 1 2 7 の実行過程で、仮設定値ファイル 1 2 8 が設けられる。仮設定値ファイル 1 2 8 には、後述する仮設計値が格納される。

[0095] C P U 1 1 1 は、各種演算処理を実行する。

C P U 1 1 1 は、機能的に、複数の曲げモーメント、及び複数の回転角を、与条件に基づいて求める解決定部 1 1 2 を備えている。さらに、解決定部 1 1 2 は、機能的に、第 1 設計部 1 1 3 と、第 2 設計部 1 1 4 と、仮設計部 1 1 5 と、記憶部 1 1 6 と、解算出部 1 1 7 と、残差算出部 1 1 8 と、判定部 1 1 9 と、解設定部 1 2 0 と、を備えている。

これらの C P U 1 1 1 の機能構成要素である第 1 設計部 1 1 3、第 2 設計部 1 1 4、仮設計部 1 1 5、記憶部 1 1 6、解算出部 1 1 7、残差算出部 1 1 8、判定部 1 1 9、及び解設定部 1 2 0 は、いずれも、補助記憶装置 1 2 6 に格納されている評価プログラム 1 2 7 等を C P U 1 1 1 が実行することで機能する。評価プログラム 1 2 7 等は、評価装置 1 0 1 用のプログラムで

ある。評価プログラム 127 は、評価装置 101 を解決定部 112 として機能させる。

[0096] [5. 連続梁の評価方法]

次に、評価装置 101 の評価動作（評価方法）について説明する。なお、表 1 に示すように、第 1 端支点 $12b_1$ の接合状態は、ピン接合、半剛接合、及び剛接合の 3 通りある。第 2 端支点 $12b_2$ の接合状態は、ピン接合、半剛接合、及び剛接合の 3 通りある。従って、連続梁 11 の一对の端支点 $12b$ での接合状態は、全部で 9 通りある。

[0097] [表1]

		第2端支点での接合状態		
		ピン接合	半剛接合	剛接合
第1端支点 での接合状態	ピン接合	ケース1	ケース4A	ケース5A
	半剛接合	ケース4B	ケース2	ケース6B
	剛接合	ケース5B	ケース6A	ケース3

[0098] ただし、例えば、第 1 端支点 $12b_1$ がピン接合で第 2 端支点 $12b_2$ が半剛接合の場合と、第 1 端支点 $12b_1$ が半剛接合で第 2 端支点 $12b_2$ がピン接合の場合とでは、連続梁 11 の向きを反対にすれば同一の構成となる。このため、両端支点 $12b_1$ 、 $12b_2$ がピン接合の場合をケース 1 として説明する。両端支点 $12b_1$ 、 $12b_2$ が半剛接合の場合をケース 2、両端支点 $12b_1$ 、 $12b_2$ が剛接合の場合をケース 3 として説明する。第 1 端支点 $12b_1$ がピン接合で第 2 端支点 $12b_2$ が半剛接合の場合をケース 4 A、第 1 端支点 $12b_1$ がピン接合で第 2 端支点 $12b_2$ が剛接合の場合をケース 5 A として説明する。第 1 端支点 $12b_1$ が剛接合で第 2 端支点 $12b_2$ が半剛接合の場合をケース 6 A として説明する。

そして、第 1 端支点 $12b_1$ が半剛接合で第 2 端支点 $12b_2$ がピン接合の場合のケース 4 B は、連続梁 11 がケース 4 A と同様の構成なので説明を省略する。第 1 端支点 $12b_1$ が剛接合で第 2 端支点 $12b_2$ がピン接合の場合のケース 5 B も、同様に省略する。第 1 端支点 $12b_1$ が半剛接合で第 2 端支

点 $1\ 2\ b_2$ が剛接合の場合のケース 6 B も、同様に省略する。

[0099] [5 . 1 . ケース 1 (一対の端支点がピン接合) の場合の連続梁の評価方法]

図 10 は、連続梁 11 がケース 1 の場合の本実施形態の評価方法 S 11 を示すフローチャートである。評価方法 S 11 は、複数の曲げモーメント及び複数の回転角を与条件に基づいて求める解決定工程 (図 10 に示すステップ S 12) を有する。

解決定工程 S 12 では、まず、第 1 設計部 113 は第 1 設計工程 (ステップ S 14) を行う (解決定工程 S 12 は、第 1 設計工程 S 14 を有する) 。第 1 設計工程 S 14 では、連続梁 11 の一対の端支点 $1\ 2\ b$ 及び中間支点 $1\ 2\ a$ での複数の鉛直変位 δ_i を含む設計値を与える。複数の鉛直変位 δ_i は、前記与条件として与えられる。第 1 設計工程 S 14 では、前記設計値には、前記複数の回転剛性と、 n 本の梁 $1\ 3_i$ それぞれの長さ L_i と、 n 本の梁 $1\ 3_i$ それぞれの曲げ剛性と、 n 本の梁 $1\ 3_i$ それぞれに作用する等分布荷重 w_i と、を含む。

第 1 設計工程 S 14 が終了すると、ステップ S 16 に移行する。

[0100] 次に、第 2 設計工程 S 16 において、第 2 設計部 114 は一対の端支点 $1\ 2\ b$ での接合状態に応じて一対の端支点 $1\ 2\ b$ に第 2 境界条件を与える。ケース 1 の場合には、第 2 境界条件は、曲げモーメント $M_{j,0}$ 、 $M_{j,n}$ がそれぞれ $0\ N\ m$ であることである。すなわち、第 2 境界条件には回転角 $\phi_{0,1}$ が未知数であることが含まれる。

第 2 設計工程 S 16 が終了すると、ステップ S 18 に移行する。

次に、仮設計工程 S 18 において、仮設計部 115 は一対の端支点 $1\ 2\ b$ での接合状態に応じて、一対の端支点 $1\ 2\ b$ 及び中間支点 $1\ 2\ a$ に作用する曲げモーメント $M_{j,i}$ を含む仮設計値を与える。連続梁 11 がケース 1 の場合には、仮設計部 115 はさらに、仮設計値として第 1 端支点 $1\ 2\ b_1$ での梁 $1\ 3_1$ の回転角 $\phi_{0,1}$ を与える。

仮設計工程 S 18 が終了すると、ステップ S 20 に移行する。

[0101] 次に、記憶工程 S 2 0 において、記憶部 1 1 6 は仮設計工程 S 1 8 の後で、仮設定値ファイル 1 2 8 に仮設計値を記憶する。記憶工程 S 2 0 が終了すると、ステップ S 2 2 に移行する。

次に、解算出工程 S 2 2 において、解算出部 1 1 7 は、仮設定値ファイル 1 2 8 に記憶された仮設計値に基づいて、複数の第 1 境界条件及び第 2 境界条件を満たすように、中間支点 1 2 a での鉛直変位の計算結果 $\delta_{i, calc}$ を含む計算値を算出する。計算値は、第 2 端支点 1 2 b₂ での鉛直変位の計算結果である鉛直変位の計算結果 $\delta_{n, calc}$ を含む。鉛直変位の計算結果 $\delta_{i, calc}$ は、(54-2) 式から (54-(n+1)) 式における鉛直変位 δ_1 から鉛直変位 δ_n までの n 個の値に基づいて得られる。

鉛直変位の計算結果 $\delta_{0, calc}$ である鉛直変位 δ_{01} (鉛直変位 δ_0) は、与条件として与えられる複数の鉛直変位の 1 つの要素であるため、解算出工程 S 2 2 では値は新たに算出されない。鉛直変位の計算結果 $\delta_{i, calc}$ は、 $\delta_1, calc$ 、 $\delta_2, calc$ 、 $\dots$ 、 $\delta_n, calc$ の順に算出される。

解算出工程 S 2 2 が終了すると、ステップ S 2 4 に移行する。

[0102] 次に、残差算出工程 S 2 4 において、残差算出部 1 1 8 は設計値と計算値との残差である変位残差を求める。変位残差は、解算出工程 S 2 2 で算出された複数の鉛直変位の計算結果 $\delta_{i, calc}$ 、及び第 1 設計工程 S 1 4 で前記与条件として与えられた複数の鉛直変位 δ_i を用いて、(57) 式により求められる。

変位残差について、より詳しく説明する。ここで、1 以上 (n-1) 以下の i に対する、梁 1 3_(i+1) における第 1 端支点 1 2 b₁ 側の中間支点 1 2 a での鉛直変位 $\delta_{0(i+1)}$ と、梁 1 3_i における第 2 端支点 1 2 b₂ 側の中間支点 1 2 a での鉛直変位の計算結果 $\delta_{i, calc}$ との残差を、第 i 残差と規定する。

残差算出工程 S 2 4 では、第 1 残差から第 (n-1) 残差までの和である中間残差を算出する。与条件である第 2 端支点 1 2 b₂ における鉛直変位 δ_n と、梁 1 3_n における第 2 端支点 1 2 b₂ での鉛直変位の計算結果 $\delta_{n, calc}$ と、の残差である第 2 端支点残差を算出する。このとき、変位残差は、中間残

差と第2端支点残差との和になる。なお、残差は正負どちらの値となる場合もある。残差の和を誤差として適切に累加するため、各残差の絶対値の和、または各残差の二乗の和を、変位残差とする。

なお、残差算出工程S24では、回転角分布 $\phi(x_i)$ 、曲げモーメント分布 $M(x_i)$ 、曲げ剛性 EI_i 、曲げモーメント $M_{j,i}$ 、回転剛性 $S_{j,i}$ 、回転角 $\phi_{l,i}$ 、 $\phi_{r,i-1}$ に関する(60)式及び(61)式である適合条件が成り立つか否かを判定する。曲げモーメント分布 $M(x_i)$ は、(22)式から求められる。

[0103] [数24]

$$\phi(x_i) = \frac{M(x_i)}{EI_i} \quad \cdots (60)$$

$$M_{j,i-1} = S_{j,i-1}(\phi_{r,i-1} + \phi_{l,i}) \quad \cdots (61)$$

[0104] ただし、曲げ剛性 EI_i は、正曲げの場合には正曲げの曲げ剛性 $EI_{s,i}$ であり、負曲げの場合には負曲げの曲げ剛性 $EI_{h,i}$ である。

残差算出工程S24が終了すると、ステップS26に移行する。

[0105] 次に、判定工程S26において、判定部119は変位残差が閾値よりも小さいか否かを判定する。判定工程S26において、変位残差が閾値よりも小さい(Yes)と判定されたときには、ステップS28に移行する。一方で、判定工程S26において、変位残差が閾値以上である(No)と判定されたときには、ステップS18に移行する。

[0106] 解設定工程S28では、解設定部120は、仮設定値ファイル128に記憶された仮設計値の曲げモーメントを、中間支点12aに作用する曲げモーメントと規定する。そして、この曲げモーメントに基づいて複数の回転角とたわみ分布を求める。

以上で、評価方法S11における全ての工程を終了する。

[0107] 仮設計工程S18では、記憶工程S20で仮設定値ファイル128に記憶された仮設計値に代えて、他の新たな仮設計値を与える。仮設計工程S18から移行した記憶工程S20では、前記他の新たな仮設計値を仮設定値ファイル128に記憶する。そして、前記他の新たな仮設計値に基づいて、記憶

工程 S 2 0、解算出工程 S 2 2、残差算出工程 S 2 4、及び判定工程 S 2 6
を行う。

このように、判定工程 S 2 6において、変位残差が閾値以上である（N o）と判定されたときには、記憶工程 S 2 0で他の新たな仮設計値を与えること、及び、この他の新たな仮設計値に基づいて、記憶工程 S 2 0、解算出工程 S 2 2、残差算出工程 S 2 4、及び判定工程 S 2 6を行うこと、を組にする。そして、この組にした工程を、判定工程 S 2 6において変位残差が閾値よりも小さいと判定されるまで繰り返す。2回目以降の仮設計工程 S 1 8においては、例えば差分進化法に従って仮設計値を再設定し、仮設計工程 S 1 8～判定工程 S 2 6の計算を行うことで、効果的に変位残差の収斂計算を行うことができる。

[0108] [5. 2. ケース2（一对の端支点が半剛接合）の場合の連続梁の評価方法]

この場合の評価方法 S 3 6では、複数の曲げモーメント及び複数の回転角
を与条件に基づいて求める解決定工程 S 3 7を行う。

解決定工程 S 3 7では、まず、前記第1設計工程 S 1 4を行う。第1設計
工程 S 1 4が終了すると、ステップ S 3 9に移行する。

次に、第2設計工程 S 3 9において、第2設計部 1 1 4は一对の端支点 1
2 bでの接合状態に応じて第2境界条件を与える。ケース2の場合には、第
2境界条件は、連続梁 1 1の端支点 1 2 b₁、1 2 b₂における（6 4）式及
び（6 5）式である。すなわち、曲げモーメント $M_{j,0}$ 、 $M_{j,n}$ は、未知数で
ある。第2境界条件には、回転角 $\phi_{0,1}$ が未知数であることが含まれる。

[0109] [数25]

$$M_{j,0} = S_{j,0} \cdot \phi_{l,1} \quad \cdots (64)$$

$$M_{j,n} = S_{j,n} \cdot \phi_{r,n} \quad \cdots (65)$$

[0110] 回転剛性 $S_{j,0}$ 、 $S_{j,i}$ はそれぞれ定数であるため、例えば、（6 4）式に
おいて、曲げモーメント $M_{j,0}$ 及び回転角 $\phi_{j,1,1}$ の一方が求まれば、（6 4）
式から曲げモーメント $M_{j,0}$ 及び回転角 $\phi_{j,1,1}$ の他方が求まる。（6 5）

式についても、(64)式と同様である。第2設計工程S39が終了すると、ステップS41に移行する。

次に、仮設計工程S41において、仮設計部115は一对の端支点12bでの接合状態に応じて、中間支点12aに作用する曲げモーメント $M_{j,i}$ を含む仮設計値を与える。連続梁11がケース2の場合には、さらに曲げモーメント $M_{j,0}$ 及び回転角 $\phi_{j1,1}$ の一方を仮設計値として与える。

仮設計工程S41が終了すると、記憶工程S20、解算出工程S22、残差算出工程S24、判定工程S26を行い、判定工程S26での判定に基づいて解設定工程S28又は仮設計工程S41に移行する。

[0111] この場合の解設定工程S28では、算出した回転角 $\phi_{r,n}$ を用いて(65)式から曲げモーメント $M_{j,n}$ を算出する。

[0112] [5. 3. ケース3 (一对の端支点が剛接合) の場合の連続梁の評価方法]

この場合の評価方法S46では、複数の曲げモーメント及び複数の回転角を与条件に基づいて求める解決定工程S47を行う。

解決定工程S47では、まず、前記第1設計工程S14を行う。第1設計工程S14が終了すると、ステップS49に移行する。

次に、第2設計工程S49において、第2設計部114は一对の端支点12bでの接合状態に応じて第2境界条件を与える。ケース3の場合には、第2境界条件は、回転角 $\phi_{j1,1}$ ($\phi_{l,1}$ 、 ϕ_{01}) 及び回転角 $\phi_{jr,n}$ ($\phi_{r,n}$) がそれぞれ0radであることである。すなわち、曲げモーメント $M_{j,0}$ 、 $M_{j,n}$ は、未知数である。

第2設計工程S49が終了すると、ステップS51に移行する。

[0113] 次に、仮設計工程S51において、仮設計部115は一对の端支点12bでの接合状態に応じて、中間支点12aに作用する曲げモーメント $M_{j,i}$ を含む仮設計値を与える。連続梁11がケース3の場合には、仮設計値としてさらに一对の端支点12bに作用する曲げモーメント $M_{j,0}$ 、 $M_{j,n}$ を与える。

仮設計工程S51が終了すると、記憶工程S20、解算出工程S22、残差算出工程S24、判定工程S26を行い、判定工程S26での判定に基づ

いて解設定工程 S 2 8 又は仮設計工程 S 5 1 に移行する。

ただし、残差算出工程 S 2 4 では、鉛直変位の計算結果 $\delta_{0, calc}$ は新たに計算せずに、鉛直変位の計算結果 $\delta_{0, calc}$ として与条件で与えられる鉛直変位 δ_0 の値であるとする。回転角 $\phi_{1, 1}$ は、新たに計算せずに 0 rad であるとする。

連続梁 1 1 がケース 3 の場合には、残差算出工程 S 2 4 において、与条件である $\phi_{r, n} = 0$ を考慮して、(38) 式において $x_i = L_i$ とした (68) 式から回転角 $\phi_{r, n}$ を算出し、回転角 $\phi_{r, n}$ の二乗に適切な重み係数 (正の値) を乗じて、変位残差に加える。

[0114] [数26]

$$\begin{aligned} \phi_{jr, n} &= \phi_{c(x_i)} \Big|_{x_i=L_i} \\ &= - \left(\frac{1}{EI_{h,i}} - \frac{1}{EI_{s,i}} \right) \left(f_{(x_i)} \Big|_{x_i=x_{h,i}} - f_{(x_i)} \Big|_{x_i=x_{s,i}} \right) - \frac{1}{EI_{h,i}} f_{(x_i)} \Big|_{x_i=L_i} + \phi_{0i} \quad \cdots (68) \end{aligned}$$

[0115] [5. 4. ケース 4 A (第 1 端支点がピン接合で第 2 端支点が半剛接合) の場合の連続梁の評価方法]

この場合の評価方法 S 5 6 では、複数の曲げモーメント及び複数の回転角を与条件に基づいて求める解決定工程 S 5 7 を行う。

解決定工程 S 5 7 では、まず、前記第 1 設計工程 S 1 4 を行う。第 1 設計工程 S 1 4 が終了すると、ステップ S 5 9 に移行する。

次に、第 2 設計工程 S 5 9 において、第 2 設計部 1 1 4 は一对の端支点 1 2 b での接合状態に応じて第 2 境界条件を与える。ケース 4 A の場合には、第 2 境界条件は、曲げモーメント $M_{j, 0}$ が 0 Nm であることと、(65) 式である。すなわち、第 2 境界条件には回転角 $\phi_{0, 1}$ が未知数であることが含まれる。

第 2 設計工程 S 5 9 が終了すると、ステップ S 6 1 に移行する。

[0116] 次に、仮設計工程 S 6 1 において、仮設計部 1 1 5 は一对の端支点 1 2 b での接合状態に応じて、中間支点 1 2 a に作用する曲げモーメント $M_{j, i}$ を含む仮設計値を与える。連続梁 1 1 がケース 4 A の場合には、仮設計値として

さらに第1端支点 $1\ 2\ b_1$ での回転角 $\phi_{1,1}$ 、第2端支点 $1\ 2\ b_2$ に作用する曲げモーメント $M_{j,n}$ を与える。

仮設計工程S 6 1が終了すると、記憶工程S 2 0、解算出工程S 2 2、残差算出工程S 2 4、判定工程S 2 6を行い、判定工程S 2 6での判定に基づいて解設定工程S 2 8又は仮設計工程S 6 1に移行する。

[0117] [5. 5. ケース5 A (第1端支点がピン接合で第2端支点が剛接合)の場合の連続梁の評価方法]

この場合の評価方法S 6 6では、複数の曲げモーメント及び複数の回転角を与条件に基づいて求める解決定工程S 6 7を行う。

解決定工程S 6 7では、まず、前記第1設計工程S 1 4を行う。第1設計工程S 1 4が終了すると、ステップS 6 9に移行する。

次に、第2設計工程S 6 9において、第2設計部1 1 4は一对の端支点 $1\ 2\ b$ での接合状態に応じて第2境界条件を与える。ケース5 Aの場合には、第2境界条件は、曲げモーメント $M_{j,0}$ が0 Nmであることと、回転角 $\phi_{r,n}$ が0 radであることである。すなわち、第2境界条件には回転角 $\phi_{0,1}$ が未知数であることが含まれる。第2設計工程S 6 9が終了すると、前記仮設計工程S 6 1を行う。

これ以降は、一对の端支点 $1\ 2\ b$ での接合状態がケース4 Aの場合と同一なので、説明を省略する。ただし、連続梁1 1がケース5 Aの場合には、残差算出工程S 2 4では、前記適合条件が成り立つか否かを判定する際に、以下の工程を行う。すなわち、残差算出工程S 2 4において、与条件である $\phi_{r,n}=0$ を考慮して、(38)式において $x_i=L_i$ とした(68)式から回転角 $\phi_{r,n}$ を算出する。そして、回転角 $\phi_{r,n}$ の二乗に適切な重み係数(正の値)を乗じて、変位残差に加える。

[0118] [5. 6. ケース6 A (第1端支点が剛接合で第2端支点が半剛接合)の場合の連続梁の評価方法]

この場合の評価方法S 7 6では、複数の曲げモーメント及び複数の回転角を与条件に基づいて求める解決定工程S 7 7を行う。

解決定工程 S 7 7 では、まず、前記第 1 設計工程 S 1 4 を行う。第 1 設計工程 S 1 4 が終了すると、ステップ S 7 9 に移行する。

次に、第 2 設計工程 S 7 9 において、第 2 設計部 1 1 4 は一对の端支点 1 2 b での接合状態に応じて第 2 境界条件を与える。ケース 6 A の場合には、第 2 境界条件は、回転角 $\phi_{1,1}$ が 0 rad であることと、(65) 式である。すなわち、曲げモーメント $M_{j,0}$ は、未知数である。第 2 設計工程 S 7 9 が終了すると、ステップ S 8 1 に移行する。

[0119] 次に、仮設計工程 S 8 1 において、仮設計部 1 1 5 は一对の端支点 1 2 b での接合状態に応じて、中間支点 1 2 a に作用する曲げモーメント $M_{j,i}$ を含む仮設計値を与える。連続梁 1 1 がケース 6 A の場合には、仮設計値としてさらに一对の端支点 1 2 b に作用する曲げモーメント $M_{j,0}$ 、 $M_{j,n}$ をそれぞれ与える。

仮設計工程 S 8 1 が終了すると、記憶工程 S 2 0、解算出工程 S 2 2、残差算出工程 S 2 4、判定工程 S 2 6 を行い、判定工程 S 2 6 での判定に基づいて解設定工程 S 2 8 又は仮設計工程 S 8 1 に移行する。ただし、連続梁 1 1 がケース 6 A の場合には、残差算出工程 S 2 4 では、前記適合条件が成り立つか否かを判定する際に、以下の工程を行う。すなわち、解算出工程 S 2 2 で得られた回転角 $\phi_{r,n}$ と、前記第 2 境界条件に含まれる (65) 式と仮設計値の $M_{j,n}$ によって計算される回転角 $\phi_{r,n}$ との差の二乗に適切な重み係数 (正の値) を乗じて、変位残差に加える。

[0120] 以上説明したように、 n 本の梁 1 3 を備える連続梁 1 1 において、連続梁 1 1 が備える支点 (中間支点 1 2 a 及び端支点 1 2 b) の数は $(n+1)$ である。各支点において、モーメント及び回転角が未知であることから、 $(n+1) \times 2$ の式により $2(n+1)$ の未知数がある。すなわち、複数の未知数の数は、 $2(n+1)$ である。

一方で、複数の回転剛性、複数の曲げモーメント、及び複数の回転角の関係式として、 $(n+1)$ の条件式が与えられる。

[0121] 第 2 境界条件を与える場合には、以下のようになる。

(1) 連続梁 1 1 の端支点 1 2 b の少なくとも一方がピン接合の場合

ピン接合されている端支点 1 2 b での曲げモーメントが 0 であるため、ピン接合されている端支点 1 2 b の数 (0 以上 2 以下) だけ未知数が減る。これにより、ピン接合における回転角と曲げモーメントと回転剛性の式も、 $M_j = S_j \times \phi_j$ の式において、 $M_j = S_j = 0$ となる。このため回転角 ϕ_j は不定となり、ピン接合されている端支点 1 2 b の数だけ、第 1 境界条件による条件式が減る。

(2) 連続梁 1 1 の端支点 1 2 b の少なくとも一方が剛接合の場合

剛接合されている端支点 1 2 b での回転角が 0 であるため、剛接合されている端支点 1 2 b の数 (0 以上 2 以下) だけ未知数が減る。これにより、剛接合における回転角と曲げモーメントと回転剛性の式も、 $M_j = S_j \times \phi_j$ の式において $\phi_j = 0$ 、 $S_j = \infty$ (無限大) となる。このため曲げモーメント M_j は不定となり、剛接合されている端支点 1 2 b の数だけ第 1 境界条件による条件式が減る。

[0122] また、各支点の鉛直変位の与条件として、 $(n + 1)$ の条件式が与えられる。

端支点 1 2 b がピン接合又は剛接合であるという第 2 境界条件を与えることで、第 2 境界条件の数だけ、複数の未知数が減る。しかし、条件式が不定になり、第 1 境界条件の数が減る。

この結果、複数の未知数の数と、複数の第 1 条件式の数と複数の第 2 条件式の数との和とは同数 (一定) である、という条件が保たれる。

[0123] 以上説明した、連続梁 1 1 がケース 1 からケース 6 の場合の評価方法を行うことにより、連続梁 1 1 の一対の端支点 1 2 b での接合状態によらず、複数の曲げモーメント及び複数の回転角を与条件に基づいて求めることができる。

なお、連続梁 1 1 の曲げモーメントは、(22) 式において、(24) 式で求めたせん断力 $V_{j, i}$ 、曲げモーメント $M_{j, i}$ 等から、(70) 式により得られる。

[0124] [数27]

$$M_{(x_i)} = \left(\frac{M_{j,i-1} - M_{j,i}}{L_i} + \frac{w_i \cdot L_i}{2} \right) x_i - \frac{w_i \cdot x_i^2}{2} - M_{j,i-1} \quad \cdots (70)$$

[0125] 連続梁 1 1 のたわみ分布は、座標 x_i の区間に応じて (4 2) 式から (4 4) 式により得られる。

また、本実施形態の評価方法を用いて、連続梁 1 1 を設計する連続梁の設計方法を行ってもよい。

[0126] [6. 評価例 1]

発明者らは、前記差分進化法を用いて評価方法を行い、複数の曲げモーメント及び複数の回転角を与条件に基づいて求める評価プログラムを作成した。評価プログラムの入力シート C を図 1 1 に示す。入力シート C に入力する、主な連続梁 1 1 の諸元等について説明する。

入力シート C において、連続梁 1 1 の梁 1 3 の本数 (Number of continuous beam span) n を、セル C 1 に入力する。この例では、 n を 5 とした。収斂計算に用いる閾値 (Threshold for ending convergence) を、セル C 2 に入力する。この例では、閾値を $1.38 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ とした。

梁 1 3₁ から梁 1 3₅ の長さ (Span) L_i を、それぞれセル C 3 に入力する。この例では、梁 1 3₁ から梁 1 3₅ の長さ L_i を、それぞれ 13800 mm (13.8 m) とした。

[0127] 梁 1 3₁ から梁 1 3₅ に作用する等分布荷重 (Composite stage load) w_i を、それぞれセル C 6 に入力する。この例では、梁 1 3₁ から梁 1 3₅ に作用する等分布荷重 w_i は互いに等しく、28.56 kN/m とした。

各中間支点 1 2 a での鉛直変位 δ_i は、それぞれ 0 m とした。

この例では、スラブコンクリート及び鉄骨の自重 (構造質量 $\times$ 重力加速度、 w_{w_SW}) を、両端支点 1 2 b 及び中間支点 1 2 a においてピン接合された純鉄骨架構の梁 1 3 で支持すると仮定した。この値を、セル C 7 に入力した。

そして、連続梁 1 1 の供用開始後に梁 1 3 に積載された荷重は、コンクリ

ート硬化後に半剛接合として挙動する接合部（中間支点 1 2 a）、及び両端支点 1 2 b においてピン接合で支持された合成梁（梁本体 1 8 と床 1 7 が一体で挙動する梁 1 3）が支えるものと仮定した。

- [0128] 図 1 2 に、本評価プログラムを用いて評価した、第 1 端支点 1 2 b₁ からの距離に対する連続梁 1 1 に作用する曲げモーメント分布の関係を示す。図 1 2 において、横軸は連続梁 1 1 における第 1 端支点 1 2 b₁ から第 2 端支点 1 2 b₂ に向かって移動した距離（mm）を表す。縦軸は、連続梁 1 1 に作用する曲げモーメント分布（kNm）を表す。

実線で示した曲線 L 4 は、コンクリート硬化後の積載荷重（等分布荷重）に対する曲げモーメント分布を表す。点線で示した曲線 L 5 は、曲線 L 4 で示した値に加えて、スラブコンクリート（コンクリート 2 2）及び鉄骨（梁本体 1 8）の自重による曲げモーメント分布を考慮した値を示す。すなわち、曲線 L 4 は、構造体である連続梁 1 1 の質量を考慮しない場合の曲げモーメント分布を表す。

- [0129] 上方の部分が尖った白抜きの三角印（△）、及び下方の部分が尖った白抜きの三角印（▽）は、梁 1 3 の弾性限曲げ耐力を表す。白抜きの四角印（□）は、接合部（中間支点 1 2 a 及び端支点 1 2 b）の弾性限曲げ耐力を表す。

いずれの曲げモーメント分布も、梁 1 3 及び接合部の弾性限曲げ耐力以下であることが分かった。

- [0130] 図 1 3 に、本評価プログラムを用いて評価した、第 1 端支点 1 2 b₁ からの距離に対する連続梁 1 1 の回転角分布の関係を示す。図 1 3 において、横軸は連続梁 1 1 における第 1 端支点 1 2 b₁ から第 2 端支点 1 2 b₂ に向かって移動した距離（mm）を表す。縦軸は、連続梁 1 1 の回転角分布（rad）を表す。

連続梁 1 1 では、半剛接合されている中間支点 1 2 a において回転剛性に応じた回転角が生じる。このため、回転角分布は、中間支点 1 2 a において不連続である。例えば、図 1 3 中に、第 3 梁 1 3₃ の右端での回転角 $\phi_{r, 3}$ 、

及び第4梁 13_4 の左端での回転角 $\phi_{l,4}$ を示す。回転角 $\phi_{r,3}$ と回転角 $\phi_{l,4}$ とは、不連続である。

なお、中間支点 $12a$ における隣接する梁 13 同士の回転角の絶対値の差は、接合部の曲げモーメントの回転剛性に対する比により生じる。具体的には、回転剛性が小さく、曲げモーメントが大きいほど、中間支点 $12a$ における隣接する梁 13 同士の回転角の絶対値の和が大きくなる。

[0131] 図14に、本評価プログラムを用いて評価した、第1端支点 $12b_1$ からの距離に対する連続梁 11 のたわみ分布の関係を示す。図14において、横軸は連続梁 11 における第1端支点 $12b_1$ から第2端支点 $12b_2$ に向かって移動した距離(mm)を表す。縦軸は、連続梁 11 のたわみ分布(mm)を表す。片端がピン接合となる第1梁 13_1 及び第5梁 13_5 の最大たわみは、第2梁 13_2 、第3梁 13_3 、及び第4梁 13_4 の最大たわみよりも大きい。

[0132] [7. 評価例2]

表2から表8に示す比較例、及び実施例1から3の連続梁に対して、連続梁の評価方法を行った。

[0133]

[表2]

連続梁の特性												
	梁の数	梁の長さ				梁本体の断面寸法						梁の鋼材 降伏強度
		第1梁	第2梁	第3梁	第4梁	梁せい	フランジ 幅	ウェブ 厚	フランジ 厚	強軸回りの断面 2次モーメント	梁の単位長さ あたり質量	
	n	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	H	B	t _w	t _f	I	G	f _y
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ⁴	kg/m	N/mm ²
	4	15500	15500	15500	15500	617	230	13.1	22.1	1120000000	140	345
	4	15500	15500	15500	15500	617	230	13.1	22.1	1120000000	140	345
	4	15500	15500	15500	15500	600	250	9.0	16.0	831000000	104	355
実施例3	4	13000	15500	14000	13000	600	250	9.0	16.0	831000000	104	355

[表3]

	スラブの特性								
	スラブ寸法		配筋			有効幅			
	スラブ 厚さ	デッキプレート 高さ	負曲げ部 補強筋	接合部 補強筋	鉄筋の鋼材 降伏強度	第1梁	第2梁	第3梁	第4梁
	Ds mm	Dp mm	[径@ピッチ]	[径@ピッチ]	fsd N/mm ²	Beff, 1 mm	Beff, 2 mm	Beff, 3 mm	Beff, 4 mm
比較例	130	52	D10@100	-	435	3294	3294	3294	3294
実施例1	130	52	D10@100	D10@100	435	3294	2713	2713	3294
実施例2	130	52	D16@100	D16@100	435	3294	2713	2713	3294
実施例3	130	52	D10@100	D10@100	435	2763	2713	2450	2763

[表4]

	各支点での支持条件									
	第1端支点		第1中間支点		第2中間支点		第3中間支点		第2端支点	
	接合 状態	回転剛性	接合 状態	回転剛性	接合 状態	回転剛性	接合 状態	回転剛性	接合 状態	回転剛性
		S_j		S_j		S_j		S_j		S_j
		kNm/mrad		kNm/mrad		kNm/mrad		kNm/mrad		kNm/mrad
比較例	ピン	0	ピン	0	ピン	0	ピン	0	ピン	0
実施例1	ピン	0	半剛	108	半剛	116	半剛	108	ピン	0
実施例2	ピン	0	半剛	192	半剛	242	半剛	192	ピン	0
実施例3	ピン	0	半剛	103	半剛	116	半剛	102	ピン	0

[0136]

[表5]

	梁の曲げ剛性							
	第1梁		第2梁		第3梁		第4梁	
	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ
	EI _{s, i}	Ei _{h, i}	EI _{s, i}	Ei _{h, i}	EI _{s, i}	Ei _{h, i}	EI _{s, i}	Ei _{h, i}
	kNm ²	kNm ²	kNm ²	kNm ²	kNm ²	kNm ²	kNm ²	kNm ²
比較例	555000	308000	555000	308000	555000	308000	555000	308000
実施例1	555000	308000	525000	292000	525000	292000	555000	308000
実施例2	433594	241305	413095	232307	413095	232307	433594	241305
実施例3	415000	232000	413000	232000	402000	227000	415000	232000

[0137]

[表6]

	梁及び接合部の降伏曲げ耐力												積載荷重		
	第1端 支点	第1梁		第1 中間支 点	第2梁		第2 中間支 点	第3梁		第3 中間支 点	第4梁		第2端 支点	SDL (構造体 を除く死 荷重)	LL (活荷重)
		梁正 曲げ	梁負 曲げ		梁正 曲げ	梁負 曲げ		梁正 曲げ	梁負 曲げ		梁正 曲げ	梁負 曲げ			
	接合部 負曲げ			接合部 負曲げ			接合部 負曲げ			接合部 負曲げ			接合部 負曲げ		
	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kN/m ²	kN/m ²
比較例	-	1750	1415	-	1750	1415	-	1750	1415	-	1750	1415	-	1.0	4.5
実施例1	-	1750	1415	474	1721	1395	474	1721	1395	474	1750	1415	-	1.0	4.5
実施例2	-	1368	1127	830	1349	1111	830	1349	1111	830	1368	1127	-	1.0	4.5
実施例3	-	1351	1111	464	1349	1111	464	1339	1100	464	1351	1111	-	1.0	4.5

[0138] 表2に示すように、連続梁の特性として、比較例、及び実施例1から3の連続梁が備える梁の数nは、それぞれ4とした。以下では、第1端支点側から数えてi本目の梁を第i梁とも言う。第1端支点側から数えてi番目の中間支点を第i中間支点とも言う。

梁の長さは、比較例、実施例 1 及び 2 では、いずれの梁も 15500 mm (15.5 m) とした。実施例 3 では、第 1 梁から第 4 梁の長さは、それぞれ 13000 mm、15500 mm、14000 mm、13000 mm とした。

比較例及び実施例 1 では、梁せいは 617 mm と仮定した。フランジ幅は 230 mm、ウェブ厚は 13.1 mm、フランジ厚は 22.1 mm、強軸回りの断面 2 次モーメントは 1120000000 mm^4 (0.00112 m^4)、梁の単位長さ当たりの質量は 140 kg/m 、梁の鋼材の降伏強度は 345 N/mm^2 と仮定した。

実施例 2 及び 3 では、梁せいは 600 mm と仮定した。フランジ幅は 250 mm、ウェブ厚は 9.0 mm、フランジ厚は 16.0 mm、強軸回りの断面 2 次モーメントは 831000000 mm^4 、梁の単位長さ当たりの質量は 104 kg/m 、梁の鋼材の降伏強度は 355 N/mm^2 と仮定した。

[0139] 表 3 に示すように、スラブ (RC スラブ) の特性として、比較例、及び実施例 1 から 3 の連続梁のいずれにおいても、スラブ厚さは 130 mm、デッキプレート高さは 52 mm と仮定した。

梁が負曲げされる部分 (梁の両端部) の補強筋として、比較例、実施例 1 及び 3 では、径が D10 の鉄筋を 100 mm ピッチで配置した。実施例 2 では、径が D16 の鉄筋を 100 mm ピッチで配置した。

梁同士が接合される接合部の補強筋として、実施例 1 及び 3 では、径が D10 の鉄筋を 100 mm ピッチで配置した。実施例 2 では、径が D16 の鉄筋を 100 mm ピッチで配置した。比較例では、接合部に補強筋を配置しなかった。

比較例、及び実施例 1 から 3 で用いた鉄筋の鋼材の降伏強度は、 435 N/mm^2 とした。

[0140] スラブの有効幅は、British Standards "Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings" に基づいて定めた。なお、スラブの有効幅の定義はこれに限

定されず、例えば「各種合成構造設計指針・同解説」、日本建築学会等に基づいて定めてもよい。

この例では、例えば比較例の連続梁では、第1梁から第4梁に対するスラブの有効幅は、それぞれ3294mmとした。実施例1の連続梁では、第1梁から第4梁に対するスラブの有効幅は、3294mm、2713mm、2713mm、3294mm、とした。

[0141] 表4に示すように、連続梁の各支点での支持条件として、比較例の連続梁では、各端支点及び各中間支点でそれぞれピン接合とした。なお、ピン接合の場合の各支点での回転剛性は0になる。

実施例1から3の連続梁では、各端支点でそれぞれピン接合とし、各中間支点でそれぞれ半剛接合とした。半剛接合の回転剛性は、表3の配筋及び有効幅に基づき、British Standards "Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings"に記載された方法を用いて次の通り算出した。実施例1の連続梁では、第1中間支点から第3中間支点での回転剛性はそれぞれ108kNm/mrad、116kNm/mrad、108kNm/mradと算出した。実施例2の連続梁では、第1中間支点から第3中間支点での回転剛性はそれぞれ192kNm/mrad、242kNm/mrad、192kNm/mradと算出した。実施例3の連続梁では、第1中間支点から第3中間支点での回転剛性はそれぞれ103kNm/mrad、116kNm/mrad、102kNm/mradと算出した。

[0142] 表5に示すように、梁の曲げ剛性として、表2の梁本体の断面寸法及び表3の有効幅に基づき、合成梁の正曲げと負曲げの曲げ剛性をそれぞれ下記の通り算出した。

比較例の連続梁では、第1梁から第4梁のいずれにおいても、正曲げの曲げ剛性は555000kNm²、負曲げの曲げ剛性は308000kNm²と仮定した。

実施例1の連続梁では、第1梁及び第4梁において、正曲げの曲げ剛性は

555000 kNm²、負曲げの曲げ剛性は308000 kNm²と算出した。第2梁及び第3梁において、正曲げの曲げ剛性は525000 kNm²、負曲げの曲げ剛性は292000 kNm²と算出した。

実施例2の連続梁では、第1梁及び第4梁において、正曲げの曲げ剛性は433594 kNm²、負曲げの曲げ剛性は241305 kNm²と算出した。第2梁及び第3梁において、正曲げの曲げ剛性は413095 kNm²、負曲げの曲げ剛性は232307 kNm²と算出した。

実施例3の連続梁では、第1梁及び第4梁において、正曲げの曲げ剛性は415000 kNm²、負曲げの曲げ剛性は232000 kNm²と算出した。第2梁において、正曲げの曲げ剛性は413000 kNm²、負曲げの曲げ剛性は232000 kNm²と算出した。第3梁において、正曲げの曲げ剛性は402000 kNm²、負曲げの曲げ剛性は227000 kNm²と算出した。

[0143] 表6に示すように、梁及び接合部の降伏曲げ耐力を設定した。例えば、比較例の連続梁では、第1梁の正曲げの降伏曲げ耐力は1750 kNm、負曲げの降伏曲げ耐力は1415 kNmと算出した。実施例1の連続梁では、第1梁の正曲げの降伏曲げ耐力は1750 kNm、負曲げの降伏曲げ耐力は1415 kNmと算出した。第1中間支点での負曲げの降伏曲げ耐力は、474 kNmと算出した。

積載荷重として、比較例、及び実施例1から3の連続梁のSDL（構造体を除く死荷重）はそれぞれ1.0 kN/m²と算出した。LL（活荷重）は、それぞれ4.5 kN/m²と算出した。

[0144] 比較例、及び実施例1から3の連続梁に対して連続梁の評価方法を行った結果、表7及び表8に示す結果が得られた。

[0145]

[表7]

	最大発生曲げモーメント														最大たわみ	
	第1端 支点		第1梁		第1 中間支 点	第2梁		第2 中間支 点	第3梁		第3 中間支 点	第4梁		第2端 支点		
	梁正 曲げ	梁負 曲げ	梁正 曲げ	梁負 曲げ	梁正 曲げ	梁負 曲げ	梁正 曲げ	梁負 曲げ	梁正 曲げ	梁負 曲げ	梁正 曲げ	梁負 曲げ	梁正 曲げ	梁負 曲げ		
比較例	0	1400	0	0	0	1400	0	0	0	1400	0	0	1400	0	0	95
実施例1	0	1174	471	471	471	963	471	403	403	963	471	471	1174	471	0	82
実施例2	0	1126	545	545	545	889	545	545	449	889	545	545	1126	545	0	104
実施例3	0	781	409	409	409	981	409	400	400	755	400	351	807	351	0	96

[0146]

[表8]

	発生曲げモーメント/曲げ耐力			梁の 最大たわみ比 (比較例基準)	梁(鋼)の 質量比 (比較例基準)	設定した条件の概要	効果
	梁正 曲げ	梁負 曲げ	接合部 負曲げ				
	-	-	-				
比較例	80%	-	-	-	-	4本の梁を備える連続梁の 両端をピン接合した場合	比較対象
実施例1	68%	34%	99%	86%	100%	比較例に対して梁の長さは 同じで、連続梁の両端をピ ン接合し、中間支点をすべ て半剛とした場合。	比較例に対し、連続梁の最 大たわみが14%減る。梁 (鋼)の質量は、同じ。
実施例2	83%	49%	66%	110%	74%	比較例に対して梁の長さは 同じで、連続梁の両端をピ ン接合し、中間支点をすべ て半剛とした場合。	比較例に対し、連続梁の最 大たわみが10%増える。梁 の正曲げモーメント/曲げ 耐力が同等で、梁(鋼)の質 量は26%減少する。
実施例3	58%	37%	88%	101%	74%	比較例に対して梁の長さの 最大値は同じ(15.5m)で、 連続梁の両端をピン接合 し、中間支点をすべて半剛 とした場合。	比較例に対し、連続梁の最 大たわみが同等。梁(鋼)の 質量は、26%減少。

[0147] 表7に示すように、最大発生曲げモーメントは、例えば比較例の連続梁では、第1梁から第4梁のいずれにおいても、正曲げで1400kNmであり

、負曲げで0 k N mであった。各中間支点には、負曲げの曲げモーメントは作用しなかった。

実施例1の連続梁では、第1梁に正曲げで1174 k N mの曲げモーメントが作用し、負曲げで471 k N mの曲げモーメントが作用した。第1中間支点には、負曲げで471 k N mの曲げモーメントが作用した。

連続梁の最大たわみは、比較例の連続梁では95 mmであった。実施例1から3の連続梁では、それぞれ82 mm、104 mm、96 mmであった。

[0148] 表8に示す曲げ耐力に対する発生曲げモーメントの割合は、値が0%から100%に近づくほど曲げ耐力に対して余裕が無いことを意味する。この割合は、比較例の連続梁では、梁の正曲げで80%であった。実施例1の連続梁では、梁の正曲げで68%、梁の負曲げで34%、梁同士の接合部の負曲げで99%であった。実施例2の連続梁では、梁の正曲げで83%、梁の負曲げで49%、梁同士の接合部の負曲げで66%であった。実施例3の連続梁では、梁の正曲げで58%、梁の負曲げで37%、梁同士の接合部の負曲げで88%であった。

比較例の連続梁を基準とした梁の最大たわみ比は、値が100%から0%に近づくほど比較例の連続梁に対して最大たわみが小さいことを意味する。この比は、実施例1の連続梁では86%であった。実施例2の連続梁では110%であり、実施例3の連続梁では101%であった。

比較例の連続梁を基準とした梁（鋼）の質量比は、値が100%から0%に近づくほど比較例の連続梁に対して梁を形成するのに必要な鋼材の質量が小さい、すなわち経済的な設計であることを意味する。

この比は、実施例1の連続梁では100%であった。実施例2及び3の連続梁では、74%であった。

[0149] 本評価プログラムを用いて連続梁を評価した結果、比較例の連続梁に比べて実施例1の連続梁では、梁の質量は変わらないが、連続梁の最大たわみが $(82 - 95) / 95$ の式から14%減ることが分かった。

比較例の連続梁に比べて実施例2の連続梁では、連続梁の最大たわみが（

104-95) / 95 の式から 10% 増え、曲げ耐力に対する発生曲げモーメントの割合が 80~83% で同等であるが、梁の質量は (104-140) / 140 の式から 26% 減ることが分かった。

比較例の連続梁に比べて実施例 3 の連続梁では、連続梁の最大たわみが 95~96 mm で同等であるが、梁の質量は (104-140) / 140 の式から 26% 減ることが分かった。

[0150] 鉄骨梁とコンクリートスラブ等の異種材料が接合された梁（合成梁）は、曲げられる方向によって剛性と耐力が異なる。この理由は、コンクリートと鋼材の応力ひずみ関係が異なること、コンクリートが圧縮耐力に比べ引張耐力が小さく、材料特性が力の方向に依存するためである。このような梁の剛性を考慮して曲げモーメント分布と耐力を評価する場合、陽な解が得られず、収斂計算によって求める必要があった。さらに、連続梁の端が半剛接合によって支持される場合、解を同定するための式がより複雑になる。従って、設計実務で用いるには煩雑すぎるという問題があった。

従って、多くの連続梁の評価では、端支点での接合状態がピン接合あるいは剛接合と仮定している。そして、梁の剛性（スラブの合成効果）を考慮しないか、考慮したとしても精度の良い評価式がない。このため、連続梁の設計において安全率を大きくとり、連続梁の設計をする際の経済効果が得られにくい課題があった。

[0151] これに対して、本実施形態の評価方法及び評価プログラム 127 によれば、複数の未知数の数と複数の第 1 境界条件の数とが同数である。このため、与条件として与えられた梁 13 の長さ及び曲げ剛性、複数の回転剛性、鉛直荷重、及び複数の鉛直変位に基づいて複数の第 1 境界条件を満たすように複数の未知数を解く。この方法により、複数の未知数に含まれる複数の曲げモーメント及び複数の回転角を求めることができる。

そして、求めた複数の曲げモーメント及び複数の回転角から、複数の鉛直変位の関係式に基づいて複数の鉛直変位を算出する。この方法により、一对の端支点 12b での接合状態に応じて、連続梁 11 の曲げモーメントやたわ

み分布をより適切に評価することができる。従って、たわみを適切に評価することができる。

以上の工程により、連続梁 1 1 の評価が過大評価及び過小評価になることを避けることができる。

[0152] 本実施形態では、コンクリートスラブと鉄骨梁からなり正曲げと負曲げの曲げ剛性が異なる梁で構成される連続梁 1 1 が中間支点 1 2 a に有限な回転剛性を持つ接合部（半剛接合）を有する場合（半剛連続梁）の評価方法を提案した。この評価方法によれば、任意の位置における曲げモーメント分布、回転角分布、及びたわみ分布を、接合部の曲げモーメントの値を用いて表す。そして、第 1 境界条件を考慮した最適化計算によって、接合部の曲げモーメントの値を同定し、設計における必要性能（設計用曲げモーメント分布、接合部の回転角）、及び梁のたわみ分布を導出することができる。

[0153] 解決定工程では、第 1 設計工程 S 1 4、第 2 設計工程、仮設計工程、解算出工程 S 2 2、残差算出工程 S 2 4、及び判定工程 S 2 6 を行う。判定工程 S 2 6 において変位残差が閾値よりも小さいか否かを判定することにより、仮設計値に基づいて算出された計算値を、設計値及び変位残差に基づいて評価することができる。

判定工程 S 2 6 において、変位残差が閾値以上であるときには、記憶工程 S 2 0 で記憶された仮設計値に代えて仮設計工程で他の新たな仮設計値を与えること、及び、この新たな仮設計値に基づいて解算出工程 S 2 2、残差算出工程 S 2 4、判定工程 S 2 6 を行うこと、を組にする。そして、この組を、判定工程 S 2 6 において変位残差が閾値よりも小さいと判定されるまで繰り返す。従って、曲げモーメントを精度良く算出することができ、この曲げモーメントに基づいて複数の回転角を求めることができる。

[0154] 鉛直変位の計算結果 $\delta_{i, calc}$ を、(24) 式等を用いて、(44) 式において $x_i = L_i$ とした式により算出する。これにより、中間支点 1 2 a 及び一対の端支点 1 2 b における複数の鉛直変位を、数式を用いて精度良く評価することができる。

[0155] 以上、本発明の第1実施形態について図面を参照して詳述したが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲の構成の変更、組み合わせ、削除等も含まれる。さらに、各実施形態で示した構成のそれぞれを適宜組み合わせて利用できることは、言うまでもない。

例えば、前記実施形態の評価方法では、判定工程S26における判定に基づいて、解設定工程S28又は仮設計工程に移行しなくてもよい。この場合、評価方法で記憶工程S20は行われない。

[0156] 梁13では、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに等しいとしてもよい。

端支持部は第2大梁31であるとしたが、端支持部は他の建築物等の剛体でもよい。

[0157] (第2実施形態)

次に、本発明の第2実施形態に係る合成梁の評価方法について図15から図24を参照しながら説明するが、前記実施形態と同一の部位には同一の符号を付してその説明は省略し、異なる点についてのみ説明する。

[0158] [1. 両端が半剛接合された合成梁]

本実施形態の合成梁の評価方法は、例えば、図15に示す建築物201を構成する合成梁211を評価するのに用いられる。

この例では、合成梁211は、床212と、梁(小梁)213と、を備えている。なお、合成梁211の構成はこの例に限定されない。

床212は、いわゆる合成スラブであり、梁13により下方から支持されている。床212は、デッキプレート216と、デッキプレート216上に配置されたRC(Reinforced Concrete)スラブ217と、を備えている。

デッキプレート216の凹凸形状は、水平面に沿う方向であって、梁213が延びる方向とは直交する方向に延びている。

RCスラブ217は、コンクリート218と、鉄筋219と、を備えている。コンクリート218は、上下方向が厚さ方向となる板状に形成されてい

る。コンクリート 218 は、デッキプレート 216 により下方から支持されている。

鉄筋 219 は、水平面に沿って延びていて、コンクリート 218 内に埋設されている。例えば、鉄筋 219 は、平面視で格子状に配置されている。

[0159] 梁 213 は H 形鋼で形成され、水平面に沿って延びている。梁 213 の上フランジには、スタッド 221 の下端部が固定されている。スタッド 221 は、デッキプレート 216 を貫通している。スタッド 221 の上端部は、コンクリート 218 内に埋設されている。

梁 213 の両端は、水平面に沿って延びる大梁 224 にそれぞれ半剛接合されている。大梁 224 は、梁 213 に直交する方向に延びている。梁 213 と大梁 224 との半剛接合は、例えばシアプレート 225 及びボルト 226 等により行われている。

大梁 224 の端部は、柱 228 により下方から支持されている。

[0160] 以下では、このように構成された合成梁 211 の評価方法について説明する。

[0161] [2. 両端が半剛接合された合成梁のたわみの微分方程式（厳密解）]

以下の検討は、全て合成梁の弾性範囲に限定する。

図 16 に示すように、合成梁を模式化する。

合成梁に沿って右向きに座標 x (mm) を規定する。合成梁の左端の位置を、座標 x の原点と規定する。合成梁の長さが、 L (mm) であると仮定する。境界条件（前提条件）として、合成梁は、両端がそれぞれ半剛接合されていると仮定する。合成梁には、全長にわたって下方向きの等分布荷重 w (N/mm : ニュートン・パー・ミリメートル) が作用すると仮定する。

合成梁の両端の接合部の回転剛性を S_j (Nmm/rad : ニュートンミリメートル・パー・ラジアン)、合成梁の端における回転角を、図 16 に示す正面視における時計回りを正として θ_j (rad : ラジアン) とする。

このとき、合成梁の端における曲げモーメントの絶対値（端部の半剛接合部のモーメント。以下、半剛接モーメントという。） M_j (Nmm) は、(1

11) 式で表される。

[0162] [数28]

$$M_j = S_j |\theta_j| \quad \dots(111)$$

[0163] 合成梁の座標 x に沿う曲げモーメントの分布 $M(x)$ (Nm) は、合成梁の梁の下フランジに引張応力が作用するときの曲げモーメントを正とすると、力の釣り合い条件から (112) 式で表される。

[0164] [数29]

$$M(x) = \frac{wL}{2}x - \frac{w}{2}x^2 - M_j \quad \dots(112)$$

[0165] 合成梁の曲率 ϕ (rad/mm) は、合成梁に作用する曲げモーメント M (Nm) と、合成梁の曲げ剛性 EI (Nm²) と、を用いて表せる。合成梁は、コンクリートの作用により、正曲げ（下に凸）の曲げ剛性と負曲げ（上に凸）の曲げ剛性とが互いに異なる。このため、合成梁の正曲げの曲げ剛性を EI_s (Nm²) とし、合成梁の負曲げの曲げ剛性を EI_h (Nm²) とする。そして、図17に示すように、座標 x が0以上 L_1 以下の範囲、及び L_2 以上 L 以下の範囲で合成梁が負曲げされたとする。ただし、 L_1 は0よりも大きく、 L_2 は L_1 よりも大きく L よりも小さい。座標 x が L_1 以上 L_2 以下の範囲で、合成梁が正曲げされたとする。

このとき、(112) 式が0となる時の x の解が、 L_1 及び L_2 である。

合成梁の曲率 ϕ は、合成梁が正曲げされる領域と、合成梁が負曲げされる領域と、に分けて、(113) 式及び (114) 式で表される。

[0166] [数30]

$$\phi(x) = \frac{1}{EI_s} \left(\frac{wL}{2}x - \frac{w}{2}x^2 - M_j \right) \quad (L_1 \leq x \leq L_2) \quad \dots(113)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{EI_h} \left(\frac{wL}{2}x - \frac{w}{2}x^2 - M_j \right) \quad (0 \leq x \leq L_1, L_2 \leq x \leq L) \quad \dots(114)$$

[0167] (112) 式の右辺が0に等しいとした式を x について解くと、 L_1 及び L

$_2$ が(115)式及び(116)式の通り求まる。

[0168] [数31]

$$L_1 = \frac{L}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8M_j}{xL^2}} \right) \quad \dots(115)$$

$$L_2 = \frac{L}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{8M_j}{xL^2}} \right) \quad \dots(116)$$

[0169] 次に、合成梁の回転角 $\theta(x)$ (rad) を、水平面に対し時計回りの回転を正(+)として説明する。回転角 $\theta(x)$ は、(113)式及び(114)式の曲率 ϕ を座標 x で積分すること等により得られる。さらに、回転角 $\theta(x)$ は、座標 x が0のときに回転角 θ_j になる境界条件を考慮して、(119)式を用いて、(120)式から(122)式のように表される。

[0170] [数32]

$$A(x) = \frac{w}{6} x^3 - \frac{wL}{4} x^2 + M_j x \quad \dots(119)$$

$$\theta(x) = \frac{1}{EI_h} A(x) \Big|_{x=x} + \theta_j \quad (0 \leq x \leq L_1) \quad \dots(120)$$

$$\theta(x) = \frac{1}{EI_s} A(x) \Big|_{x=x} + \left(\frac{1}{EI_h} - \frac{1}{EI_s} \right) A(x) \Big|_{x=L_1} + \theta_j \quad (L_1 \leq x \leq L_2) \quad \dots(121)$$

$$\theta(x) = \frac{1}{EI_h} A(x) \Big|_{x=x} + \left(\frac{1}{EI_h} - \frac{1}{EI_s} \right) \left\{ A(x) \Big|_{x=L_1} - A(x) \Big|_{x=L_2} \right\} + \theta_j \quad (L_2 \leq x \leq L) \quad \dots(122)$$

[0171] 次に、合成梁に生じるたわみ $\delta(x)$ (mm) を、鉛直下向きを正(+)として説明する。たわみ $\delta(x)$ は、(120)式から(122)式の回転角 θ を座標 x で積分すること等により得られる。さらに、たわみ $\delta(x)$ は、座標 x が0のときにたわみ $\delta(x)$ が0になる境界条件を考慮して、(125)式及び(126)式を用いて、(127)式から(129)式のよう

に表される。

[0172] [数33]

$$B(x) = \frac{w}{24}x^4 - \frac{wL}{12}x^3 + \frac{M_j}{2}x^2 \quad \dots(125)$$

$$C(x) = \frac{w}{8}x^4 - \frac{wL}{6}x^3 + \frac{M_j}{2}x^2 \quad \dots(126)$$

$$\delta(x) = \frac{1}{EI_h}B(x)\Big|_{x=x} + \theta_j x \quad (0 \leq x \leq L_1) \quad \dots(127)$$

$$\delta(x) = \frac{1}{EI_s}B(x)\Big|_{x=x} + \left(\frac{1}{EI_h} - \frac{1}{EI_s}\right)\left\{\left(A(x)\Big|_{x=L_1}\right)x - C(x)\Big|_{x=L_1}\right\} + \theta_j x$$

$$(L_1 \leq x \leq L_2) \quad \dots(128)$$

$$\delta(x) = \frac{1}{EI_s}B(x)\Big|_{x=x}$$

$$+ \left(\frac{1}{EI_h} - \frac{1}{EI_s}\right)\left\{\left(A(x)\Big|_{x=L_1} - A(x)\Big|_{x=L_2}\right)x - C(x)\Big|_{x=L_1} + C(x)\Big|_{x=L_2}\right\} + \theta_j x$$

$$(L_2 \leq x \leq L) \quad \dots(129)$$

[0173] 以上で求めた(127)式から(129)式は、半剛接モーメント M_j 及び回転角 θ_j を含む形で表されている。しかし、このままでは、任意の回転剛性 S_j に対して、半剛接モーメント M_j 及び回転角 θ_j が一義的に決まらない。ここでさらに、座標 x が $(L/2)$ のときに回転角 θ が0radになるという変形の適合条件を用いると、(111)式及び(121)式から、回転剛性 S_j と回転角 θ_j との関係が、(130)式のように表される。

[0174] [数34]

$$\theta(x)\Big|_{x=\frac{L}{2}} = \left(\frac{1}{EI_h} - \frac{1}{EI_s}\right)\left(\frac{wL^3}{24} - \frac{L}{3}S_j\theta_j\right)\sqrt{1 - \frac{8S_j\theta_j}{wL^2}}$$

$$- \frac{1}{EI_h}\left(\frac{wL^3}{24} - \frac{L}{2}S_j\theta_j\right) + \theta_j = 0 \quad \dots(130)$$

[0175] また、座標 x が L のときにたわみ $\delta(x)$ が0になるという、変形の適合

条件を用いる。すると、(111)式及び(129)式から、回転剛性 S_j と回転角 θ_j との関係が、(131)式のように表される。

なお、(130)式は(131)式と等価である。

[0176] [数35]

$$\left(\frac{1}{EI_h} - \frac{1}{EI_s} \right) \left(\frac{2L^2}{3} S_j \theta_j - \frac{wL^4}{24} - \frac{8}{3w} S_j^2 \theta_j^2 \right) + \frac{1}{EI_h} \sqrt{1 - \frac{8S_j \theta_j}{wL^2}} \left(\frac{wL^4}{24} - \frac{L^2}{3} S_j \theta_j \right) - \theta_j L \sqrt{1 - \frac{8S_j \theta_j}{wL^2}} = 0 \quad \dots(131)$$

[0177] 合成梁に生じるたわみの最大値 δ_{max} は、(128)式における座標 x が($L/2$)のときの値となる。

前記(130)式又は(131)式を用いてたわみの最大値 δ_{max} を算出するためには、(130)式又は(131)式を用いて収斂計算を行って回転角 θ_j を算出する必要がある。さらに(128)式を用いて、座標 x が($L/2$)のときのたわみ $\delta(x)$ を算出する必要がある。

[0178] [3. 両端が半剛接合された合成梁のたわみの近似式]

発明者らは無次元化された値である無次元化回転剛性及び無次元化曲げ剛性に基づいてたわみの最大値 δ_{max} を評価することにより、以下のようになることを見出した。すなわち、合成梁の仕様によらずに、端部曲げモーメント及びたわみの最大値 δ_{max} を汎用性高く、かつ収斂計算を行わずに精度良く算出できる。

以下では、端部曲げモーメント及びたわみの最大値を陽関数により算出できる近似式について説明する。

[0179] (135)式及び(136)式のように、無次元化曲げ剛性 α_s 及び無次元化回転剛性 α_j を規定した。

[0180]

[数36]

$$\alpha_s = \frac{\left(\frac{EI_s}{L}\right)}{\left(\frac{EI_h}{L}\right)} = \frac{EI_s}{EI_h} \quad \dots(135)$$

$$\alpha_j = \frac{S_j}{\left(\frac{EI_h}{L}\right)} = \frac{S_j L}{EI_h} \quad \dots(136)$$

[0181] すなわち、無次元化曲げ剛性 α_s は、合成梁の正曲げの曲げ剛性及び合成梁の負曲げの曲げ剛性の比であると規定される。この例では、無次元化曲げ剛性 α_s は、合成梁の負曲げの曲げ剛性 $E I_h$ に対する、合成梁の正曲げの曲げ剛性 $E I_s$ の比であると規定される。この場合、無次元化曲げ剛性 α_s は、一般に1以上の値をとる。これは、通常床は梁の鉛直方向上方にあり、床のコンクリートは引張抵抗より圧縮抵抗が大きい。このため、床のコンクリートが引張られる負曲げに比べ、圧縮される正曲げに対して床の抵抗が大きくなるからである。一般的な合成梁の仕様では、無次元化曲げ剛性 α_s は10以下であり、より一般的に用いられる合成梁では無次元化曲げ剛性 α_s は3以下である。

なお、無次元化曲げ剛性 α_s は、合成梁の正曲げの曲げ剛性 $E I_s$ に対する、合成梁の負曲げの曲げ剛性 $E I_h$ の比であると規定してもよい。

無次元化回転剛性 α_j は、合成梁の端における回転剛性を、合成梁の単位長さ当たりの曲げ剛性で除した値である。

[0182] さらに、ピン接モーメント M_o 、半剛接モーメント M_j 、剛接モーメント M_{j_r} 、無次元化接合部モーメント β_{M_j} 、及び無次元化剛接モーメント $\beta_{M_{j_r}}$ を規定した。

ピン接モーメント M_o は、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに異なる合成梁において、両端がそれぞれピン接合されて全長にわたって等分布荷重が作用すると仮定したときに規定される。ピン接モーメント M_o は、合成梁に作用する曲げモーメントの最大値のことを意味する。ピン接モーメン

ト M_0 は、(137) 式で表される。

なお、ピン接モーメント M_0 は、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに等しい梁における以下の値に等しい。ピン接モーメント M_0 は、両端がそれぞれピン接合されて全長にわたって等分布荷重が作用するとしたときの前記梁の端に作用する曲げモーメントに等しい。具体的には、ピン接モーメント M_0 は、 $(wL^2/8)$ の式による値である。

[0183] [数37]

$$M_0 = \frac{wL^2}{8} \quad \dots(137)$$

[0184] 半剛接モーメント M_j は、上述のように、合成梁の端における曲げモーメントの絶対値である。半剛接モーメント M_j は、より具体的には、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに異なる合成梁において、両端がそれぞれ半剛接合されて全長にわたって等分布荷重が作用する合成梁の端に作用する曲げモーメントのことを意味する。半剛接モーメント M_j は、(130) 式又は (131) 式を用いて収斂計算を行って算出した回転角 θ_j を用い、(138) 式で表される。

[0185] [数38]

$$M_j = S_j |\theta_j| \quad \dots(138)$$

[0186] 剛接モーメント M_{jr} は、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに異なる合成梁における以下の値のことを意味する。剛接モーメント M_{jr} は、両端がそれぞれ剛接合されて全長にわたって等分布荷重が作用するとしたときの合成梁の端に作用する曲げモーメントのことを意味する。

なお、本実施形態の合成梁は、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに異なる梁である。説明の便宜上、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに等しい比較例の梁を仮定する。その比較例の梁において、両端がそれぞれ剛接合されて全長にわたって等分布荷重が作用するとしたとき、剛接モーメント M_{jr} は $(wL^2/12)$ の式による値である。

無次元化接合部モーメント β_{Mj} は、半剛接モーメント M_j をピン接モーメント M_0 で除した値であり、（１３９）式で表される。

[0187] [数39]

$$\beta_{Mj} = \frac{M_j}{M_0} \quad \cdots (139)$$

[0188] 無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ は、剛接モーメント M_{jr} をピン接モーメント M_0 で除した値であり、（１４０）式で表される。

[0189] [数40]

$$\beta_{Mj, rigid} = \frac{M_{jr}}{M_0} \quad \cdots (140)$$

[0190] ここで、前記無次元化回転剛性 α_j 、無次元化曲げ剛性 α_s 等の指標を評価した。そのために、表 9 に示すケース 1 からケース 6 の仕様の合成梁に対して、無次元化回転剛性 α_j 、無次元化曲げ剛性 α_s を変化させて無次元化接合部モーメント β_{Mj} を試算した。

なお、ケース 1 からケース 5 では合成梁の両端が半剛接合され、ケース 6 では合成梁の両端が剛接合される。

[0191]

[表9]

ケース	合成梁 の長さ	負曲げの 曲げ剛性	等分布 荷重	ピン接 モーメント	無次元化回転剛性			無次元化曲げ剛性		
	L	$E I_h$	w	M_o	α_j			α_s		
	m	kNm^2	kN/m	kNm	最小値	最大値	刻み	最小値	最大値	刻み
1	10.0	229397	28.6	357	0.00	50.00	1.00	1.00	6.00	0.10
2	15.0	229397	28.6	803	0.00	50.00	1.00	1.00	6.00	0.10
3	15.0	229397	28.6	803	0.00	50.00	0.01	1.00	1.06	0.01
4	8.4	214311	28.6	252	0.00	100.00	0.50	1.00	1.30	0.05
5	13.8	229397	28.6	680	0.00	100.00	0.50	1.00	4.00	0.50
6	15.0	229397	28.6	803	∞	∞	—	1.00	51.00	0.10

[0192] ケース1では、合成梁の長さLを10.0m(10000mm)と仮定した。負曲げの曲げ剛性 $E I_h$ を229397 kNm^2 、等分布荷重wを28.6 kN/m (28.6 N/mm)と仮定すると、ピン接モーメント M_o は(137)式から357 kNm と算出された。ケース1では、無次元化回転剛性 α_j を、最小値0.00から最大値50.00まで1.00刻みで、51種類

の値に変化させた。すなわち、無次元化回転剛性 α_j を、0.00、1.00、2.00、 $\dots$ 、50.00の値とした。無次元化曲げ剛性 α_s を、最小値1.00から最大値6.00まで0.10刻みで、51種類の値に変化させた。すなわち、無次元化曲げ剛性 α_s を、1.00、1.10、1.20、 $\dots$ 、6.00の値とした。ケース1では、無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s の値を変化させた、 (51×51) の式による2601通りの場合を試算した。

[0193] ケース2では、ケース1を基準に、合成梁の長さ L を15.0mと変化させた。ピン接モーメント M_0 は、(137)式から803kNmと算出された。ケース2では、ケース1と同様に無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s を変化させ、2601通りの場合を試算した。

ケース3では、ケース2において、無次元化回転剛性 α_j の刻み、及び無次元化曲げ剛性 α_s の最大値及び刻みを変化させた。すなわち、ケース3では、無次元化回転剛性 α_j を、最小値0.00から最大値50.00まで0.01刻みで、5001種類の値に変化させた。すなわち、無次元化回転剛性 α_j を、0.00、0.01、0.02、 $\dots$ 、50.00の値とした。無次元化曲げ剛性 α_s を、最小値1.00から最大値1.06まで0.01刻みで、7種類の値に変化させた。すなわち、無次元化曲げ剛性 α_s を、1.00、1.01、1.02、 $\dots$ 、1.06の値とした。ケース3では、無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s の値を変化させた、 (5001×7) の式による35007通りの場合を試算した。ケース3では、ケース2における無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s の一部の範囲に対して、より詳細に試算した。

[0194] ケース4では、ケース1を基準に、合成梁の長さ L を8.4mと変化させた。負曲げの曲げ剛性 $E I_h$ を214311kNm²と仮定すると、ピン接モーメント M_0 は(137)式から252kNmと算出された。ケース4では、無次元化回転剛性 α_j を、最小値0.00から最大値100.00まで0.50刻みで、201種類の値に変化させた。すなわち、無次元化回転剛性 α_j を

、0.00、0.50、1.00、 $\cdots$ 、100.00の値とした。無次元化曲げ剛性 α_s を、最小値1.00から最大値1.30まで0.05刻みで、7種類の値に変化させた。すなわち、無次元化曲げ剛性 α_s を、1.00、1.05、1.10、 $\cdots$ 、1.30の値とした。ケース4では、無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s の値を変化させた、(201 $\times$ 7)の式による1407通りの場合を試算した。

[0195] ケース5では、ケース1を基準に、合成梁の長さ L を13.8mと変化させた。ピン接モーメント M_0 は、(137)式から680kNmと算出された。ケース5では、無次元化回転剛性 α_j の値はケース4と同様に変化させた。無次元化曲げ剛性 α_s を、最小値1.00から最大値4.00まで0.50刻みで、7種類の値に変化させた。すなわち、無次元化曲げ剛性 α_s を、1.00、1.50、2.00、 $\cdots$ 、4.00の値とした。ケース5では、無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s の値を変化させた、(201 $\times$ 7)の式による1407通りの場合を試算した。

ケース1からケース5では、合計で43023通りの場合を試算した。

[0196] ケース6では、ケース2において、無次元化回転剛性 α_j 、及び無次元化曲げ剛性 α_s の最大値を変化させた。ケース6では、無次元化回転剛性 α_j を無限大(∞)、すなわち回転剛性 S_j を無限大にして、合成梁の両端が剛接合されるとした。無次元化曲げ剛性 α_s を、最小値1.00から最大値51.00まで0.10刻みで、501種類の値に変化させた。すなわち、無次元化曲げ剛性 α_s を、1.00、1.10、1.20、 $\cdots$ 、51.00の値とした。

[0197] 図18に、ケース1からケース5における無次元化回転剛性 α_j と無次元化接合部モーメント β_{Mj} との関係を示す。図18において、横軸は無次元化回転剛性 α_j を表し、縦軸は無次元化接合部モーメント β_{Mj} を表す。

直線L11は、正曲げの曲げ剛性と負曲げの曲げ剛性とが互いに等しい通常の梁における無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, u}$ である。通常の梁において、長さを L (mm)、等分布荷重を w (N/mm)とする。この場合、通常の梁において、剛接モーメント M_{jr} は($wL^2/12$)、ピン接モーメン

ト M_0 は $(wL^2/8)$ であるため、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, u}$ は $\{(wL^2/12)/(wL^2/8)\}$ の式により、 $2/3$ (約 0.667) の値になる。

[0198] ケース1の試算結果を、白抜きの正方形印で表す。同様に、ケース2の試算結果を白抜きの三角形印で表し、ケース3の試算結果を白抜きの丸形印で表す。ケース4の試算結果を白抜きの菱形印で表し、ケース5の試算結果をバツ印で表す。

横軸の無次元化回転剛性 α_j が大きくなるのに従い、合成梁の両端の接合が剛接合に近づく。無次元化曲げ剛性 α_s が1に近づくに従い、無次元化接合部モーメント β_{Mj} は、ケース1からケース5の上限の包絡線である曲線L12に近づく。

さらに、無次元化回転剛性 α_j が大きくなるのに従い、合成梁の両端の接合が剛接合に近づく。すると、無次元化接合部モーメント β_{Mj} は上限値である、直線L11が表す無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の値に収束する。

曲線L12により表される無次元化接合部モーメント β_{Mj} は、関数の形状と、無次元化回転剛性 α_j が0及び無限大となるときは無次元化接合部モーメント β_{Mj} の極限を考慮して、(142)式で近似できると考えられる。ただし、 e はネイピア数(2.718...)である。

[0199] [数41]

$$\beta_{Mj} = \frac{\beta_{Mj, rigid}}{e^{\{k(\log_{10} \alpha_j - \log_{10} \alpha_{j,T})\}} + 1} \quad \cdots (142)$$

[0200] (142)式において、 k は係数である。変数 $\alpha_{j,T}$ は、無次元化接合部モーメント β_{Mj} が無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の半分の値をとるときの無次元化回転剛性 α_j である。以下では、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ 、係数 k 、変数 $\alpha_{j,T}$ の同定方法を提案する。

[0201] [4. 近似式の同定]

[4. 1. 無次元化剛接モーメントの支配変数]

(130)式において、合成梁の両端が剛接合される場合、回転剛性 S_j を

無限大（無次元化回転剛性 α_j を無限大）と仮定する。さらに方程式を無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ 、無次元化曲げ剛性 α_s 、ピン接モーメント M_0 を用いて式を表すと、（１４６）式ようになる。

[0202] [数42]

$$\frac{L}{EI_h} \left(1 - \frac{1}{\alpha_s}\right) \left(\frac{M_0}{3} - \frac{\beta_{Mj, rigid} M_0}{3}\right) \sqrt{1 - \beta_{Mj, rigid}} - \frac{L}{EI_h} \left(\frac{M_0}{3} - \frac{\beta_{Mj, rigid} M_0}{2}\right) = 0 \quad \cdots (146)$$

[0203] （１４６）式は、（１４７）式及び（１４８）式のように変形される。さらに、（１４７）式及び（１４８）式は、（１４９）式を用いて、（１５０）式のように変形される。

[0204] [数43]

$$\left(1 - \frac{1}{\alpha_s}\right) (1 - \beta_{Mj, rigid}) \sqrt{1 - \beta_{Mj, rigid}} = \left(1 - \frac{3}{2} \beta_{Mj, rigid}\right) \quad \cdots (147)$$

$$\overline{\alpha_s}^2 (1 - \beta_{Mj, rigid})^3 = \left(1 - \frac{3}{2} \beta_{Mj, rigid}\right)^2 \quad \cdots (148)$$

$$\overline{\alpha_s} = \left(1 - \frac{1}{\alpha_s}\right) \quad \cdots (149)$$

$$\beta_{Mj, rigid}^3 + 3 \left(\frac{3}{4\overline{\alpha_s}^2} - 1\right) \beta_{Mj, rigid}^2 - 3 \left(\frac{1}{\overline{\alpha_s}^2} - 1\right) \beta_{Mj, rigid} + \left(\frac{1}{\overline{\alpha_s}^2} - 1\right) = 0 \quad \cdots (150)$$

[0205] 以上から、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ は厳密には、（１５０）式による３次方程式の解であることが分かった。さらに、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の解は、無次元化曲げ剛性 α_s にのみ依存し、合成梁の長さ L 、等分布荷重 w 等には依存しないことがわかった。従って、３次方程式の解法であるカルダノの公式を用いて（５０）式の解を求め、そのうちの実数解により、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の厳密解を得ることができる。

なお、前記ケース６についての無次元化曲げ剛性 α_s と無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ との試算結果の関係は、図１９に示すようになる。図１９において、横軸は無次元化曲げ剛性 α_s を表す。縦軸は、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ を表す。

[0206] [４．２．無次元化剛接モーメントの近似式]

無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ は、厳密には (150) 式による 3 次方程式の実数解として得ることができる。しかし、図 19 に示すように、無次元化曲げ剛性 α_s が約 10 以下の範囲では、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ は、無次元化曲げ剛性 α_s の常用対数の線形式で近似できると考えられる。

前述のように、一般的な合成梁のスラブの厚さであれば無次元化曲げ剛性 α_s は 10 以下である。このため、図 19 において、無次元化曲げ剛性 α_s が 10 以下の範囲を線形式で近似して、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ を (153) 式で近似する。

[0207] [数44]

$$\beta_{Mj, rigid} = -\frac{15}{48} \log_{10} \alpha_s + \frac{2}{3} \quad \cdots (153)$$

[0208] (153) 式では、無次元化曲げ剛性 α_s に基づいて無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ を陽関数により算出している。

(153) 式を、図 19 中に直線 L14 で示す。無次元化曲げ剛性 α_s が 10 以下の範囲では、直線 L14 は試算結果と重なっている。

なお、ケース 6 について、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の (153) 式による近似解と、(150) 式による厳密解を比較して図 20 に示す。図 20 において、横軸は (153) 式による無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の近似解を表し、縦軸は (150) 式による無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の厳密解（無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, Theo}$ ）を表す。無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の近似解及び厳密解が互いに一致していれば、試算結果のプロットは、直線 L16 上に配置される。

無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の近似解と厳密解とは、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の近似解が 0.4 を超えるときには、概ね一致する。しかし、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の近似解が 0.4 以下のときには、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ を (154) 式で補正してもよい。(154) 式を、図 20 中に無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ を横軸、無次元

化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, Theo}$ を縦軸にとり、曲線 L 17 で示す。無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, Theo}$ は、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の厳密解と重なっている。

[0209] [数45]

$$\beta_{Mj, rigid, Theo} = -\frac{781}{1000}\beta_{Mj, rigid}^3 + \frac{1702}{1250}\beta_{Mj, rigid}^2 + \frac{1189}{5000}\beta_{Mj, rigid} + \frac{1369}{10000} \dots (154)$$

[0210] すなわち、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ の近似解が 0.4 以下のときには、(142) 式において、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ に代えて、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ に基づいて (154) 式により算出される無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, Theo}$ を用いてもよい。

次に、係数 k 及び変数 $\alpha_{j, T}$ の近似式を求める。

各無次元化曲げ剛性 α_s について、係数 k を差分進化法で求めた。求めた係数 k と無次元化曲げ剛性 α_s との関係を、図 21 に示す。係数 k は、無次元化曲げ剛性 α_s に高次で依存しており、(155) 式で近似した。

同様に、各無次元化曲げ剛性 α_s について、変数 $\alpha_{j, T}$ を差分進化法で求めた。求めた変数 $\alpha_{j, T}$ と無次元化曲げ剛性 α_s との関係を、図 22 に示す。変数 $\alpha_{j, T}$ は、無次元化曲げ剛性 α_s に高次で依存しており、(156) 式で近似した。

[0211] [数46]

$$k = \frac{1}{5000}\alpha_s^6 - \frac{1}{250}\alpha_s^5 + \frac{196}{5000}\alpha_s^4 - \frac{1985}{10000}\alpha_s^3 + \frac{5549}{10000}\alpha_s^2 - \frac{4138}{5000}\alpha_s - \frac{18681}{10000} \dots (155)$$

$$\alpha_{j, T} = \frac{7}{1000}\alpha_s^3 - \frac{1343}{10000}\alpha_s^2 + \frac{7614}{5000}\alpha_s + \frac{6217}{10000} \dots (156)$$

[0212] (155) 式を、図 21 中に曲線 L 18 で示す。検討範囲において、曲線 L 18 は試算結果をよく近似している。同様に、(156) 式を、図 22 中に曲線 L 19 で示す。検討範囲において、曲線 L 19 は試算結果をよく近似している。

前述のように無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ 、係数 k 、変数 $\alpha_{j, T}$ が

無次元化曲げ剛性 α_s により算出されると、(142)式により無次元化接合部モーメント β_{Mj} が算出される。すなわち、算出した無次元化曲げ剛性 α_s 、無次元化回転剛性 α_j 、及び無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ に基づいて、無次元化接合部モーメント β_{Mj} を(142)式の陽関数により算出する。より詳しく説明すると、無次元化接合部モーメント β_{Mj} を、(153)式、(155)式、(156)式を用いて(142)式により算出する。または、(153)式の代わりに、(153)式及び(154)式を用いて算出した無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, Theo}$ を(142)式の無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ に代入して無次元化接合部モーメント β_{Mj} を算出してもよい。

[0213] [5. 近似式を用いたたわみの最大値の計算式]

次に、導出したたわみ関数を用いて、合成梁の中央における最大たわみ(たわみの最大値) δ_{max} を、無次元化接合部モーメント β_{Mj} 及びピン接モーメント M_0 の式に変換する。

まず、合成梁の中央を含む正曲げ領域のたわみ関数は、前記(128)式である。たわみの最大値 δ_{max} は、(128)式における $x = (L/2)$ のときの値である。

ここで、(115)式及び(116)式における L_1 及び L_2 は、(160)式及び(161)式のように、無次元化接合部モーメント β_{Mj} 、ピン接モーメント M_0 、及び半剛接モーメント M_j の式で表せる。ただし、 L_1 及び L_2 は、合成梁の曲げモーメントがゼロとなる点であり、(162)式を満たす。

[0214] [数47]

$$L_1 = \frac{L}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8M_j}{wL^2}} \right) = \frac{L}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{M_j}{M_0}} \right) = \frac{L}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}} \right) \quad \cdots (160)$$

$$L_2 = \frac{L}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{8M_j}{wL^2}} \right) = \frac{L}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{M_j}{M_0}} \right) = \frac{L}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \beta_{Mj}} \right) \quad \cdots (161)$$

$$0 \leq L_1 < L_2 \leq L \quad \cdots (162)$$

[0215] (128) 式を無次元化曲げ剛性 α_s 、無次元化回転剛性 α_j 、及び無次元化接合部モーメント β_{Mj} で表すと、(164) 式ようになる。

[0216] [数48]

$$\delta_{(x)} = \frac{1}{\alpha_s EI_h} B_{(x)} + \frac{1}{EI_h} \left(1 - \frac{1}{\alpha_s}\right) \left\{ \left(A_{(x)} \Big|_{x=L_1} \right) x - C_{(x)} \Big|_{x=L_1} \right\} + \frac{\beta_{Mj} M_0 L}{\alpha_j EI_h} x \quad \cdots (164)$$

[0217] (160) 式を (119) 式及び (126) 式に代入すると、(166) 式及び (167) 式が得られる。 $x = (L/2)$ を (125) 式に代入すると、(168) 式が得られる。

[0218] [数49]

$$\begin{aligned} A_{(x)} \Big|_{x=L_1} &= \frac{wL^3}{48} \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^3 - \frac{wL^3}{16} \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^2 + \frac{L}{2} M_j \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right) \\ &= \frac{M_0 L}{2} \left\{ \frac{\left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^3}{3} - \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^2 + \beta_{Mj} \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right) \right\} \quad \cdots (166) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{(x)} \Big|_{x=L_1} &= \frac{wL^4}{128} \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^4 - \frac{wL^4}{48} \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^3 + \frac{L^2}{8} M_j \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^2 \\ &= \frac{M_0 L^2}{2} \left\{ \frac{\left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^4}{8} - \frac{\left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^3}{3} + \frac{\beta_{Mj} \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^2}{4} \right\} \quad \cdots (167) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{(x)} \Big|_{x=\frac{L}{2}} &= \frac{wL^4}{384} - \frac{wL^4}{96} + \frac{L^2}{8} M_j \\ &= \frac{M_0 L^2}{8} \left(\beta_{Mj} - \frac{1}{2} \right) \quad \cdots (168) \end{aligned}$$

[0219] (164) 式において $x = (L/2)$ とし、(166) 式から (168) 式を用いることで、たわみの最大値 δ_{max} は (170) 式で求めることができる。

[0220] [数50]

$$\begin{aligned} \delta_{max} &= \frac{M_0 L^2}{2 EI_h} \left[\frac{2\beta_{Mj} - 1}{8\alpha_s} \right. \\ &\quad - \left(1 - \frac{1}{\alpha_s}\right) \left\{ \frac{\left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^4}{4} - \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^3 \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(1 + \frac{\beta_{Mj}}{2}\right) \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right)^2 - \beta_{Mj} \left(1 - \sqrt{1 - \beta_{Mj}}\right) \right\} + \frac{\beta_{Mj}}{\alpha_j} \right] \quad \cdots (170) \end{aligned}$$

[0221] (170) 式を用いると、算出した無次元化曲げ剛性 α_s 、無次元化回転剛性 α_j 、無次元化接合部モーメント β_{Mj} 等に基づいてたわみの最大値 δ_{max} を

陽関数により算出することができる。

一方で、前記（１１２）式に、求めた合成梁の端における曲げモーメント M_j （半剛接モーメント M_j ）を代入すると、合成梁のモーメント分布の関数が求まる。

合成梁の端に作用する曲げモーメントである端部曲げモーメントは、合成梁のモーメント分布の関数において、 $x=0$ 、 L を代入した時の値である。具体的には、前記（１３９）式を変形した（１７１）式から曲げモーメント M_j を直接求めることができる。

[0222] [数51]

$$M_j = \beta_{Mj} \times M_0 \quad \dots(171)$$

[0223] なお、無次元化接合部モーメント β_{Mj} 及びピン接モーメント M_0 は、与条件である無次元化回転剛性 α_j 、無次元化曲げ剛性 α_s 、設計の要求値（与条件）である合成梁の長さ L 、及び等分布荷重 w を用いて、前記（１４２）式及び（１３７）式等の陽関数により算出できる。

さらに、（１４２）式における係数 k 、変数 $\alpha_{j,T}$ 、及び無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ は、前記（１５５）式、（１５６）式、及び（１５３）式の陽関数により算出できる。

なお、（１５３）式によって計算した無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ が 0.4 以下のときには、（１４２）式において、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ に代えて、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ に基づいて（１５４）式により算出される無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, Theo}$ を用いてもよい。

合成梁の中央における最大たわみであるたわみの最大値 δ_{max} は、（１４２）式により算出した無次元化接合部モーメント β_{Mj} 、及び与条件を（１７０）式に代入して陽に求めることができる。

[0224] 以上のように、本実施形態の合成梁の評価方法では、端部曲げモーメント及びたわみの最大値 δ_{max} を、無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s に基づいて陽関数により算出する。

[0225] [6. 近似式の精度検証]

表9のケース1からケース5について、(142)式による無次元化接合部モーメント β_{Mj} の近似解、(153)式、(155)式、(156)式による無次元化接合部モーメント β_{Mj} の厳密解を比較して図23に示す。図23において、横軸は無次元化接合部モーメント β_{Mj} の厳密解を表す。縦軸は、無次元化接合部モーメント β_{Mj} の近似解を表す。無次元化接合部モーメント β_{Mj} の近似解及び厳密解が互いに一致していれば、試算結果のプロットは、直線L21上に配置される。図23に示された結果から、無次元化接合部モーメント β_{Mj} の近似解及び厳密解が、実用上十分な精度で一致していることが分かる。

また、たわみの最大値 δ_{max} について、無次元化接合部モーメント β_{Mj} の近似解を用いた(170)式による近似解と、厳密解とを比較して図24に示す。図24では、ケース6の試算結果も併せて示す。ケース6の試算結果を、白抜きの長方形印で表す。図24に示された結果から、たわみの最大値 δ_{max} の近似解及び厳密解が、実用上十分な精度で一致していることが分かる。

以上説明したように、無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s に基づいて、たわみの最大値 δ_{max} を評価した。その結果、合成梁211の仕様によらずに、たわみの最大値 δ_{max} を汎用性高く、かつ精度良く算出できることが分かった。

[0226] なお、本実施形態の合成梁の評価方法で算出した端部曲げモーメント及びたわみの最大値に基づいて、新たな合成梁を設計してもよい。すなわち、本実施形態の合成梁の評価方法を用いて合成梁の設計方法を行ってもよい。

[0227] 以上説明したように、本実施形態の合成梁の評価方法では、発明者らは無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s に基づいて端部曲げモーメント及びたわみの最大値 δ_{max} を評価した。その結果、合成梁211の仕様によらずに端部曲げモーメント及びたわみの最大値 δ_{max} を陽関数により汎用性高く、かつ精度良く算出できることを見出した。

無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s に基づいて陽関数により合

成梁 2 1 1 の端部曲げモーメント及びたわみの最大値 $\delta_{\max}$ を算出することにより、合成梁 2 1 1 の端部曲げモーメント及びたわみの最大値 $\delta_{\max}$ を収斂計算を行うことなく算出することができる。

- [0228] また、無次元化曲げ剛性 α_s 及び (1 5 3) 式に基づいて無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ を陽関数により算出し、算出した無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ 、無次元化回転剛性 α_j 、無次元化曲げ剛性 α_s 及び (1 4 2) 式に基づいて前記無次元化接合部モーメント β_{Mj} を陽関数により算出する。さらに、算出した無次元化接合部モーメント β_{Mj} 及び (1 7 0) 式等に基づいて端部曲げモーメント及びたわみの最大値 $\delta_{\max}$ を陽関数により算出する。こうして、合成梁 2 1 1 の端部曲げモーメント及びたわみの最大値 $\delta_{\max}$ を収斂計算を行うことなく算出することができる。

無次元化接合部モーメント β_{Mj} を、(1 5 3) 式、(1 5 5) 式、(1 5 6) 式を用いて (1 4 2) 式により算出する。このため、これらの式により無次元化接合部モーメント β_{Mj} を、収斂計算を行うことなく精度良く算出することができる。従って、たわみを適切に評価することができる。

- [0229] 無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ が 0.4 以下のときには、(1 4 2) 式において、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ に代えて、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ に基づいて (1 5 4) 式により算出される無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, Theo}$ を用いる。無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ が 0.4 以下である場合には、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ が厳密解に対して誤差が大きくなる。この場合であっても、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ に代えて無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid, Theo}$ を用いることにより、無次元化剛接モーメントをより精度良く算出することができる。

さらに、例えば複数の合成梁を有する構造体の動的解析の収斂計算において、構造体を構成する部材である合成梁の曲げモーメントの算出のための収斂計算が不要となる。このため、構造体の動的解析に 2 重の収斂計算を行う必要がなくなり、計算時間を大幅に短縮できる。さらに、例えば合成梁の断

面積を目的関数、たわみや曲げモーメント等の設計条件を制約条件とし、目的関数を最小化する最適化計算を行う場合に、以下の利点がある。すなわち、制約条件であるたわみや曲げモーメントの算出のための収斂計算が不要となるため、目的関数の最適化に対して2重の収斂計算を行う必要がなくなり、計算時間を大幅に短縮できる。

[0230] 以上、本発明の第2実施形態について図面を参照して詳述したが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲の構成の変更、組み合わせ、削除等も含まれる。

例えば、前記実施形態の合成梁の評価方法では、曲げモーメント M_j 及びたわみの最大値 δ_{max} を、無次元化回転剛性 α_j 及び無次元化曲げ剛性 α_s に基づいて陽関数により算出すればよい。

また、その際に、以下のような手順を行ってもよい。すなわち、無次元化曲げ剛性 α_s に基づいて、無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ を陽関数により算出する。算出した無次元化剛接モーメント $\beta_{Mj, rigid}$ 、無次元化回転剛性 α_j 、及び無次元化曲げ剛性 α_s に基づいて、無次元化接合部モーメント β_{Mj} を陽関数により算出する。そして、算出した無次元化接合部モーメント β_{Mj} に基づいて、曲げモーメント M_j 及びたわみの最大値 δ_{max} を陽関数により算出する。

[0231] 以上、本発明の第1実施形態及び第2実施形態について図面を参照して詳述したが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲の構成の変更、組み合わせ、削除等も含まれる。さらに、各実施形態で示した構成のそれぞれを適宜組み合わせて利用できることは、言うまでもない。

産業上の利用可能性

[0232] 本発明によれば、連続梁の評価方法、連続梁の評価プログラム、及び合成梁の評価方法を提供できる。よって、産業上の利用可能性は大である。

符号の説明

[0233] 11 連続梁

1 2 a 中間支点

1 2 b 端支点

1 3 梁 (小梁)

2 7 第 1 大梁 (中間支持部)

3 1 第 2 大梁 (端支持部)

1 0 1 評価装置

1 1 2 解決部

2 1 1 合成梁

M_j 半剛接モーメント

$M_{j,r}$ 剛接モーメント

M_o ピン接モーメント

S 1 1, S 3 6, S 4 6, S 5 6, S 6 6, S 7 6 評価方法 (連続梁の
評価方法)

S 1 2, S 3 7, S 4 7, S 5 7, S 6 7, S 7 7 解決定工程

S 1 4 第 1 設計工程

S 1 6, S 3 9, S 4 9, S 5 9, S 6 9, S 7 9 第 2 設計工程

S 1 8, S 4 1, S 5 1, S 6 1, S 8 1 仮設計工程

S 2 0 記憶工程

S 2 2 解算出工程

S 2 4 残差算出工程

S 2 6 判定工程

α_j 無次元化回転剛性

α_s 無次元化曲げ剛性

β_{Mj} 無次元化接合部モーメント

$\beta_{Mj, rigid}, \beta_{Mj, rigid, Theo}$ 無次元化剛接モーメント