

## 木桁の腐朽による耐力の低下について

Strength reduction of timber beams subjected to decay

函館工業高等専門学校 ○学生員 工藤恭大(Kudo Yasuhiro)

函館工業高等専門学校 正員 平沢秀之(Hirasawa Hideyuki)

## 1. まえがき

近年、二酸化炭素などによる地球温暖化が大きな社会問題となっており、あらゆる分野において地球温暖化を改善しようとする試みや取り組みなどが積極的に行われている。橋梁建設の分野でも同様の取り組みがなされている。地球環境負荷が少ない建設材料を考えた場合、木材は繰り返し生産することが可能であり、さらに、二酸化炭素を吸収し蓄えることが出来るので、地球温暖化の面から見ても非常に優良な材料であるといえる。このようなことから、我が国でも地球環境に対して優れた特徴を持つ木材が使用された近代木橋が建設されるようになってきている。<sup>1)</sup>

国内で生産される樹種のうち、カラマツは信越地方の高原地帯や東北地方、および北海道に広く植林されている木材であり、スギ・ヒノキに次いで日本の主要林業樹種となっている。

しかし、木材は腐朽しやすく、強度が劣化してしまう。木材を腐朽させる条件としては、適度な酸素、水分、温度、栄養が必要となり、高温多湿の気候風土を持った我が国では、これら要素を兼ね備えているため、木材は腐朽し易い傾向がある。

そこで本研究では、木材が腐朽により強度が低下してしまう現象を腐朽位置及び腐朽の度合いによる破壊確率の増加、信頼性指標の低減を明らかにすることで、木橋の設計、補修に関する基礎資料を提示することを目的としている。対象とする樹種をカラマツとし、腐朽による強度低下をシミュレーションにより検討した。

## 2. 解析手法

## 2.1 解析モデルの概要

本研究で計算に用いたモデルは、一本の梁に活荷重を想定した変動荷重を支間中央に載荷させた。断面は一樣断面と仮定し、断面形状は高さ 160mm、幅 120mm の長方形断面であり、スパンは 3m とした。

## 2.2 材料強度

本研究で検討を行っている材料は木材であり、木材は自然から得られる天然の建設材料であるため、材料強度にバラツキが生じ易い傾向がある。そこで本研究では、正規分布に従う乱数を用いて、これらの要素にバラツキを与えた。材料強度は、指針から得たカラマツの強度の小数点以下を切り上げ 30[N/mm<sup>2</sup>]を平均値とし、標準偏差は平均値の 5,10,20%の 3 ケースで検討を行い 10%を採用し、計算を行った。<sup>2) 3)</sup>

## 2.3 設計荷重

活荷重は木材に載荷する外力であり、本研究ではスパン中央に集中荷重として載荷することとし、変動荷重と仮定している。ここで、活荷重を未知数として支間中央に発生する最大曲げモーメント  $M$  及び断面二次モーメント  $I$  を算出し、以下に示す式(2.1)を用いて発生する最大応力を算出した。

$$\sigma = \frac{M}{I} y \quad (2.1)$$

ここで算出した応力が材料強度  $\sigma_f = 30[\text{N/mm}^2]$  を上回る時の活荷重が梁を破壊させると考えられる。これを踏まえて計算すると 20[kN]が作用したときに破壊することが分かった。本研究では、木材の腐朽による耐力の低下を調べることを目的としているので、算出された荷重と異なる値を用いることとし、15.5[kN]を採用する。

また、本研究では、変動荷重を想定しているため、正規分布に従う乱数を用いてバラツキを再現し、乱数の平均値は、15.5[kN]とし、標準偏差は平均値の 5.8%の 2 ケースで検討を行い 5%を採用し、計算を行った。

## 2.4 シミュレーション条件

本研究では、コンピュータ上に仮想的に作成したモデルに荷重を載荷させ、スパン中央の断面の上縁及び下縁で発生する最大応力を式(2.1)を用いて算出する。これと木材の材料強度を比較し、発生する応力が材料強度を上回ったときに破壊と判断し、破壊確率を算出する。

また、本研究で行うような乱数を用いたシミュレーションでは、モデルの個数を増やすことで精度が上がると考えられている。しかし、検討個数を増やすことで計算

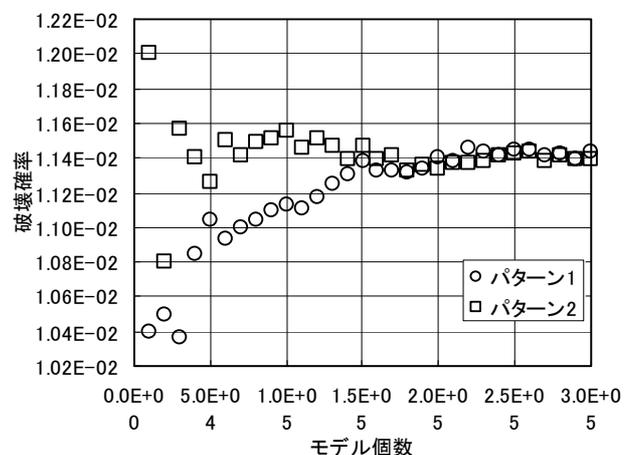


図 2.1 モデル個数による収束性

効率の低下が見られるため、得られる結果が収束するために必要な適当なモデル個数を設定する必要がある。そこで、断面に腐朽のないモデルで発生個数を変化させたときの破壊確率の収束性について、2パターンで検討を行い、結果を図2.1に示した。

これにより、どちらのケースでもモデル個数15万個程度から収束性が見られ、以降はほぼ収束していることが分かる。したがって、本研究ではモデル個数を20万個としてシミュレーションを行うこととした。

### 3. 腐朽部材のモデル化

#### 3.1 腐朽

木材にとって腐朽部位は、弱点となり部分的に強度が著しく低下してしまう。これらを考慮し、シミュレーションを行う上で腐朽部位が耐荷力を持たないとし、空洞として考えることで、腐朽部位を再現することとした。また、木材の腐朽は、菌類により生じる現象である。菌類による腐敗や腐食が一定の進行速度で行われると仮定すると、腐朽面は腐朽が開始する点を中心とした円形状に腐朽していくと考えられる。本研究では、木材断面における腐朽面が円形となるように発生させることとする。ここで、腐朽の程度を示す値として、検討を行う木材の断面積と断面内に存在する腐朽部位の総面積との比で表すこととし、この値を面腐朽率 $\alpha$ と呼ぶこととする。

#### 3.2 腐朽位置の設定

##### (1) 円形偏心腐朽

図3.1に示すように、長方形断面の中央から下に $e$ だけ偏心させた位置に腐朽領域の中心を設け、面腐朽率を変えた際に変化する破壊確率を算出する。このとき、偏心距離 $e$ は、 $0.1h, 0.2h, 0.3h, 0.4h$ の4ケース行うこととした。また、面腐朽率の変化量は $0.02$ とし、偏心距離 $0.4h$ においては、 $0.01$ とした。

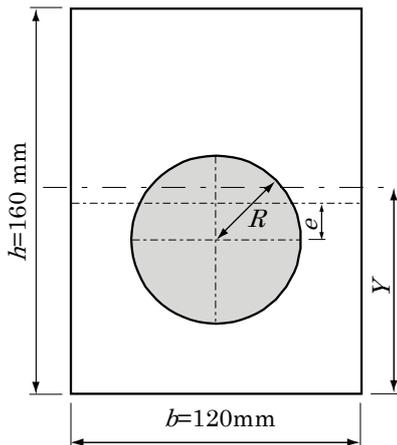


図3.1 円形偏心腐朽モデル

さらに、破壊の判定に用いる中立軸から下縁までの距離 $Y$ 及び断面二次モーメント $I$ は以下の式で表す。

$$Y = \frac{\frac{1}{2}bh^2 - \pi R^2(\frac{h}{2} - e)}{bh - \pi R^2} \quad (3.1)$$

$$I = \frac{bh^3}{3} - \pi R^2 \left\{ \left( \frac{h}{2} - e \right)^2 + \frac{R^2}{4} \right\} - \frac{\left\{ \frac{1}{2}bh^2 - \pi R^2(\frac{h}{2} - e) \right\}^2}{bh - \pi R^2} \quad (3.2)$$

##### (2) 円形中心腐朽

円形中心腐朽は、長方形断面の中央を中心とした円を腐朽領域としているため、算出する式は、円形偏心腐朽の偏心距離を $0$ とし検討を行うこととする。

##### (3) 下縁半円腐朽

河川などの橋梁では、上縁側はほぼ乾燥状態にあり、腐朽しにくい環境であるが、下縁側では水分の供給を受け、腐朽し易い傾向があると考えられる。そこで図3.2に示すように、下縁に腐朽中心点を設け、半円状に腐朽することを想定して、検討を行うこととした。また、面腐朽率の変化量は $0.01$ として、破壊確率を算出することとした。

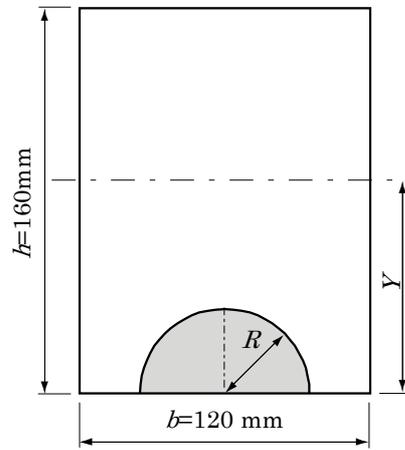


図3.2 下縁半円腐朽モデル

さらに、破壊の判定に用いる中立軸から下縁までの距離及び断面二次モーメントは以下の式で表すこととする。

$$Y = \frac{\frac{1}{2}bh^2 - \frac{2R^3}{3}}{bh - \frac{\pi R^2}{2}} \quad (3.3)$$

$$I = \frac{bh^3}{3} - \frac{\pi}{8}R^4 - \frac{\left\{ \frac{1}{2}bh^2 - \frac{2}{3}R^3 \right\}^2}{bh - \frac{\pi R^2}{2}} \quad (3.4)$$

##### (4) 下縁固定円形偏心腐朽

下縁固定円形偏心腐朽は、円形偏心腐朽と下縁半円腐朽を組み合わせることで、腐朽し易い下縁と内部の二箇所に腐朽が存在する場合を再現したモデルである。偏心距離 $e$ は、 $0, 0.1h, 0.2h, 0.3h$ の4ケースを行うこととした。また、面腐朽率の変化量は $0.02$ とし、偏心距離 $0.2h, 0.3h$ においては、 $0.01$ とした。

さらに、破壊判定に用いる下縁と中立軸との距離及び断面二次モーメントは以下の式で表すこととする。ここで、半円腐朽の半径を $R_1$ 、円形腐朽の半径を $R_2$ とする。

$$Y = \frac{\frac{1}{2}bh^2 - \pi R_2^2(\frac{h}{2} - e) - \frac{2}{3}R_1^3}{bh - \pi R_2^2 - \frac{1}{2}\pi R_1^2} \quad (3.5)$$

$$I = \frac{bh^3}{3} - \pi R_2^2 \left\{ \left( \frac{h}{2} - e \right)^2 + \frac{R_2^2}{4} \right\} - \frac{\pi R_1^4}{8} - \frac{\left\{ \frac{1}{2}bh^2 - \pi R_2^2(\frac{h}{2} - e) - \frac{2}{3}R_1^3 \right\}^2}{bh - \pi R_2^2 - \frac{1}{2}\pi R_1^2} \quad (3.6)$$

(5) 上下縁半円腐朽

上下縁半円腐朽は、下縁半円腐朽と上縁側に半円状の腐朽面を持たせ、断面に腐朽面を二箇所設けたモデルである。面腐朽率の変化量は 0.01 とした。また、破壊判定に用いる中立軸から下縁までの距離及び断面二次モーメントは以下の式で表すこととする。ここで、下縁側の腐朽面の半径を  $R_1$ 、上縁側の腐朽面の半径を  $R_2$  とする。

$$Y = \frac{\frac{1}{2}bh^2 - \frac{2}{3}R_1^3 - \frac{1}{2}\pi R_2^2(h - \frac{4R_2}{3\pi})}{bh - \frac{1}{2}\pi(R_1^2 + R_2^2)} \quad (3.7)$$

$$I = \left[ \frac{1}{3}bh^3 - \frac{1}{8}\pi R_1^4 - R_2^2 \left\{ \frac{1}{2}\pi \left( h - \frac{4R_2}{3\pi} \right)^2 + \frac{9\pi^2 - 64}{72\pi} R_2^2 \right\} - \left( h - \frac{4R_2}{3\pi} \right)^2 \left\{ bh - \frac{1}{2}\pi(R_1^2 + R_2^2) \right\} \right] \quad (3.8)$$

4. 解析結果

4.1 材料強度と荷重効果の応力分布

図 4.1 は、円形偏心腐朽モデルの偏心距離  $e=0.2h$ 、面腐朽率  $\alpha=0.1$  とした時に荷重が載荷した際、下縁に発生する応力  $\sigma_s$  と強度による応力  $\sigma_R$  の応力分布の一例を表したものである。

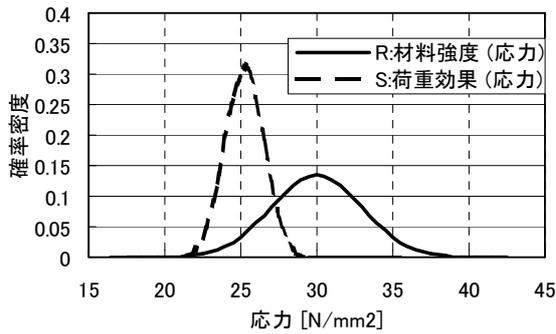
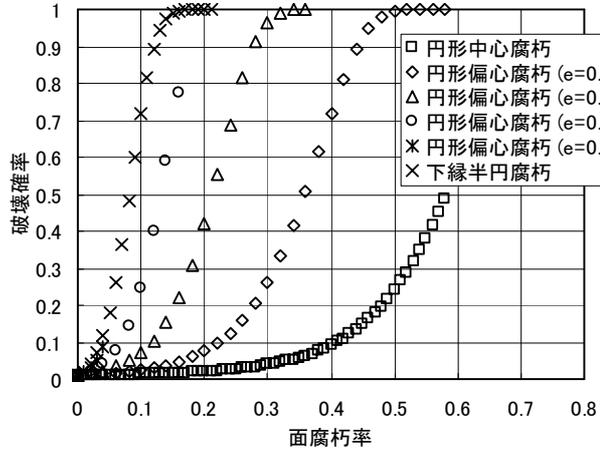


図 4.1 円形偏心腐朽モデルの  $R$  と  $S$

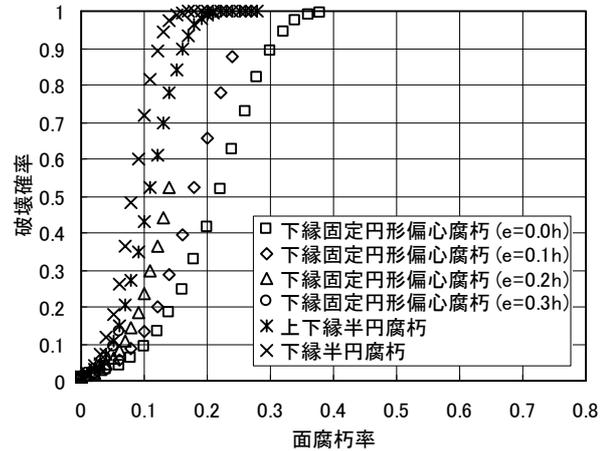
材料強度は正規分布に従う乱数により定められている材料強度であり、腐朽の影響で変化しないものとした。荷重効果は、荷重により発生する応力のばらつきであり、腐朽による断面二次モーメントの低下により増加することで腐朽の影響を考えている。ここで、 $R < S$  となったときに破壊となり、図 4.1 では破壊確率が 0.072 となった。

4.2 面腐朽率による破壊確率の挙動

図 4.2 は、腐朽面が断面内に 1 つとなるモデルと断面内に 2 つとなるモデルを分け、面腐朽率の変化による破壊確率の変動を表したものである。比較のため、下縁半円腐朽モデルの結果を両方のグラフに表示することとした。



(a) 腐朽面が断面内に 1 箇所の場合



(b) 腐朽面が断面内に 2 箇所の場合

図 4.2 面腐朽率による破壊確率の変化

これにより、すべてのモデルにおいて、面腐朽率の増加に伴い、破壊確率の増加が見られる。また、腐朽領域が下縁に近づくにつれて、面腐朽率が小さな値で高い破壊確率となっていることが分かる。腐朽面が 1 箇所の場合では、下縁半円腐朽で腐朽率 1 割の時点で 7 割が破壊するという結果となった。これに対し、円形中心腐朽では、腐朽率 4 割となっても破壊は 1 割程度であり、幅方向の限界まで腐朽させても破壊は 5 割程度に留まった。

腐朽面が 2 箇所の場合では、腐朽面が単数の場合に比べ非常に破壊し易い傾向があることが分かった。しかし、腐朽面が 1 箇所の下縁半円腐朽モデルでは、腐朽面が 2 箇所となる場合と比較しても破壊し易いことが分かった。

これらの結果から、断面中心部付近では、腐朽面積が小さいうちは破壊確率の増加が顕著でないが、腐朽が拡大してしまうと破壊に至る可能性があると考えられる。また、下縁により近い位置に腐朽が見られる場合は、初期の腐朽状態で破壊につながる強度低下が見られるため、腐朽の程度にかかわらず破壊の危険性が高いといえる。

4.3 断面腐朽による性能関数への影響

図 4.3 は、 $e=0.2h$  だけ偏心した位置に腐朽面の中心がある場合における面腐朽率  $\alpha$  が 0.0, 0.1, 0.2 と変化した時の性能関数  $Z$  を表している。性能関数は材料強度  $R$  と荷重効果  $S$  の差であり、 $Z=R-S$  で表される。また、 $Z$  の平均値を  $\mu_z$ 、標準偏差を  $\sigma_z$  とおくと信頼性指標  $\beta$  は  $\beta = \mu_z / \sigma_z$  で表される。

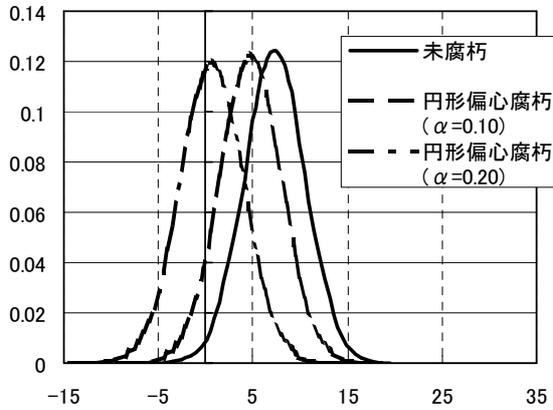


図 4.3 円形偏心腐朽の性能関数

これにより、性能関数は面腐朽率が大きくなるほど、左側にシフトしていることが分かる。信頼性指標  $\beta$  については、腐朽部位が少ないほど、平均値は大きく、標準偏差は微弱ながら小さくなっていることから、腐朽の拡大に伴って徐々に低下していく傾向があることが確認できる。また、性能関数は材料強度と荷重効果の差であることから、負の値で破壊したとされるため、縦軸と性能関数で囲まれた部分の面積が破壊確率となり、腐朽の拡大に伴って破壊確率が大きくなることが確認できる。

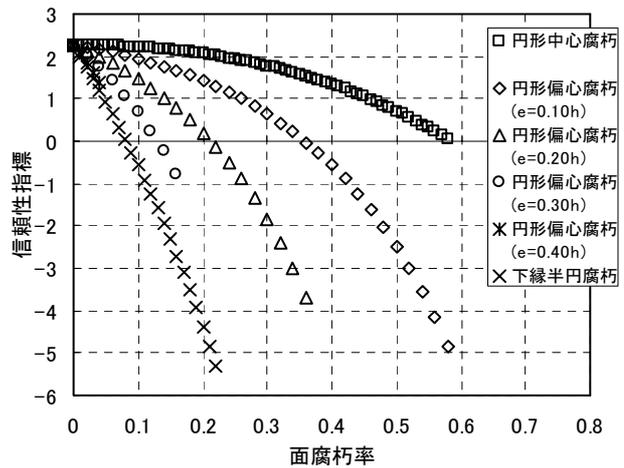
4.4 面腐朽率による信頼性指標の挙動

図 4.4 は、図 4.2 と同様にモデルを分け、面腐朽率の変化による信頼性指標の変動を表したものである。

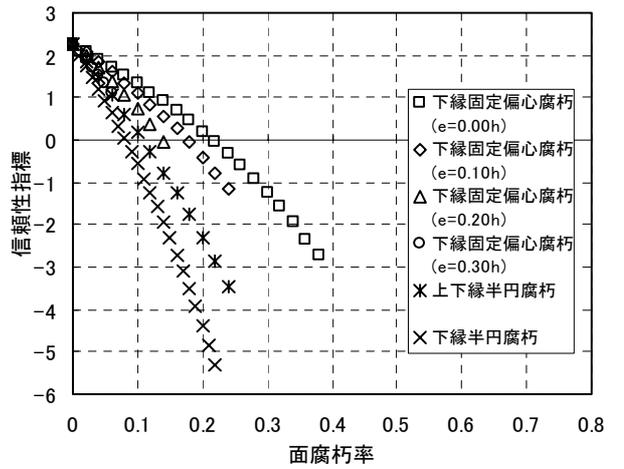
これにより、グラフが全体的に右下がりのグラフとなっているため、面腐朽率が増加すると信頼性指標が減少することが確認できる。また、上側に凸のグラフ形状であるため、腐朽面積が拡大するにつれて耐力の低下が著しく現れることが分かる。さらに、偏心距離が大きくなると、グラフ上で上に凸となる部分が見られなくなり、腐朽初期の段階で信頼性指標の値の低下が見られる。

腐朽面が 2 箇所の場合では、1 箇所の場合と比較して信頼性指標の減少が著しいことが分かる。グラフの形状は、上に凸となっているが、1 箇所の場合と比較して、傾きが急であり、信頼性指標の変化が著しいことが分かる。また、1 箇所の場合と比較して偏心の影響はあまり見られないことから、下縁に設けた腐朽面の影響力が大きいといえる。

これらの結果から、腐朽面が下縁付近に存在する場合腐朽の初期の段階で信頼性指標の低下が著しく、中心部にのみ腐朽が存在する場合、腐朽の初期の段階で信頼性指標の著しい低下は見られないが、腐朽面が拡大するにつれて低下しているといえる。



(a) 腐朽面が 1 箇所の場合



(b) 腐朽面が 2 箇所の場合

図 4.4 面腐朽率による信頼性指標の変化

5. あとがき

木材が腐朽により強度が低下してしまう現象を腐朽の位置及び度合いによる破壊確率の増加、信頼性指標の低減を明らかにするために、樹種をカラマツと想定しシミュレーションを行った。その結果、面腐朽率を増加させ、腐朽面積が増大することにより、すべてのケースで破壊確率が増加し耐力の低下が見られた。腐朽面に偏心を設けた際、その偏心量に伴って初期の腐朽で破壊確率が増加する傾向があることが分かった。信頼性指標でも、同様の結果が得られており、面腐朽率の増加により、信頼性指標が低減し、腐朽面に偏心を設けた際、初期の腐朽で破壊確率が増加する。これらを踏まえると、木材が腐朽により強度低下する現象は、腐朽の程度よりも断面中央からどの程度偏心しているかが重要となっていると考えられる。

参考文献

- 1) 齊藤貴信:モンテカルロシミュレーションによる集成材の曲げ耐荷力評価,平成 17 年度函館工業高等専門学校卒業論文,2006.
- 2) 林知己夫:乱数の知識,森北出版株式会社,1970.
- 3) 日本建築学会:木質構造限界状態設計指針,2003.