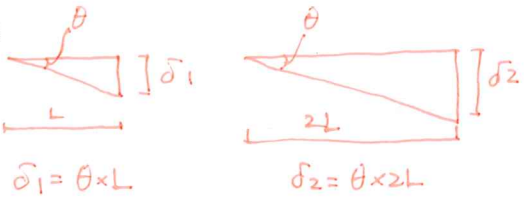
力学３（崩壊荷重の過去問題）

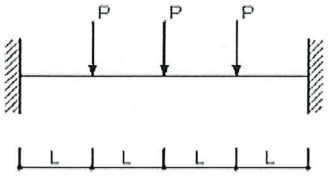


$\delta_1 = \theta \times L$　　$\delta_2 = \theta \times 2L$

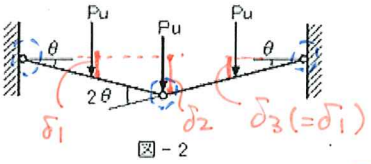
１シリーズ（３ヒンジで崩壊（梁タイプ））

問題コード　18021

図-1 のような荷重を受ける梁において，荷重 P を増大させたとき，その梁は図-2 のような崩壊メカニズムを示した．梁の崩壊荷重 P_u として，正しいものは，次のうちどれか．ただし，梁の全塑性モーメントを M_p とする．



図－１



図－２

1. $\frac{M_p}{L}$
2. $\frac{4M_p}{3L}$
3. $\frac{2M_p}{L}$
4. $\frac{8M_p}{3L}$
5. $\frac{4M_p}{L}$

「外力による仕事」＝「外力」×「移動距離」

$= P_u \times \theta L + P_u \times 2\theta L + P_u \times \theta L$

（$\theta L = \delta_1$，$2\theta L = \delta_2$，$\theta L = \delta_3$）

$= 4P_u \cdot \theta \cdot L$

「内力による仕事」＝「部材の全塑性モーメント」×「回転角」

$= M_p \times \theta + M_p \times 2\theta + M_p \times \theta$

（左側ヒンジ　中央ヒンジ　右側ヒンジ）

$= 4M_p \cdot \theta$

「外力のする仕事」＝「内力のする仕事」より

$4P_u \cdot \theta \cdot L = 4M_p \cdot \theta$

$P_u = \frac{M_p}{L}$

「新たに発生したヒンジ」は３ヶ所。

よって，「内力のする仕事」は３つ。

→ 力学３（資料）- P2 の Point⑤

２シリーズ（４ヒンジで崩壊（ラーメンタイプ））

問題コード　28041

図-1 のような鉛直荷重100kN，水平荷重Pを受けるラーメンにおいて，水平荷重Pを増大させたとき，荷重P_uで塑性崩壊に至り，図-2 のような崩壊機構を示した．P_u の値を求めよ．ただし，柱，梁の全塑性モーメントM_pの値をそれぞれ300kN・m，200kN・mとする．

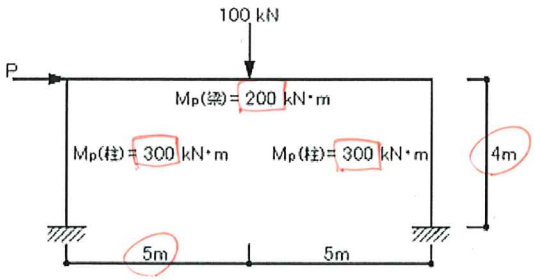


図-1

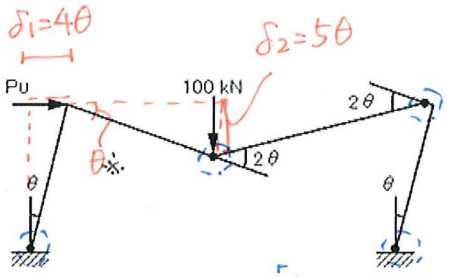
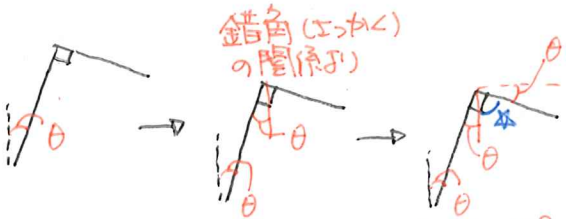


図-2



$\theta + \text{☆} = 90°$，$\text{☆} + \theta_1 = 90°$ より

$\theta_1 = \theta$ となる

「新たに発生したヒンジ」は４ヶ所。

「外力による仕事」＝$P_u \times \delta_1 + 100 \times \delta_2$

$= P_u \times 4\theta + 100 \times 5\theta$

「内力による仕事」＝$300 \times \theta$（左柱脚ヒンジ）＋$200 \times 2\theta$（梁中央ヒンジ）＋$200 \times 2\theta$（梁右端ヒンジ）＋$300 \times \theta$（右柱脚ヒンジ）

$= 1400\theta$

「外力のする仕事」＝「内力のする仕事」より

$P_u \times 4\theta + 100 \times 5\theta = 1400\theta$

$4P_u \cdot \theta + 500\theta = 1400\theta$

$4P_u = 900$

$P_u = 225$ kN

○崩壊形の機構（図-2）の回転角が記載されていない場合の対処方法

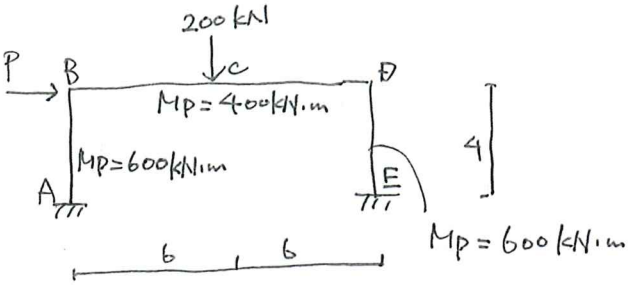


図-1

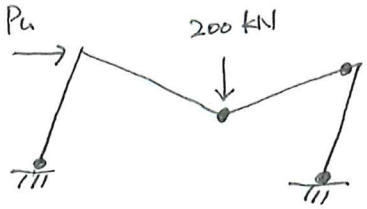
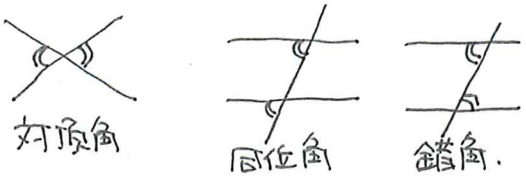


図-2

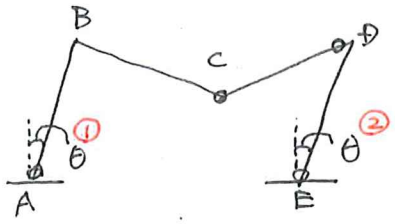
① まず、左側柱脚Aの回転角をθとする。

② 右側柱脚Eの回転角もθとなる。
（図-1において、左向の柱の長さが同じであるため）

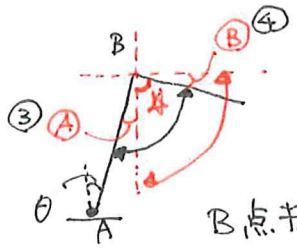


お互いに同じ角度になります。

③ B点拡大図にて、Ⓐは左側柱脚Aの回転角と同じ大きさであるので、θとなる。
→ 対頂角、同位角、錯角（さっかく）は中学2年で学びます。



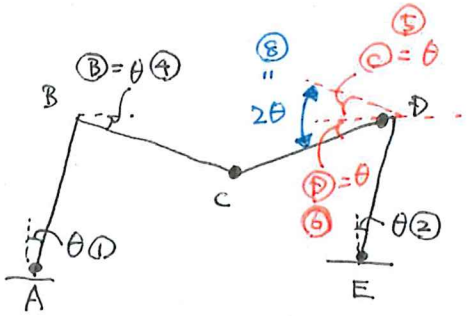
④ Ⓐ（=θ）と★で90度。（↶）
★とⒷで90度（↷）
よってⒷはθとなる。



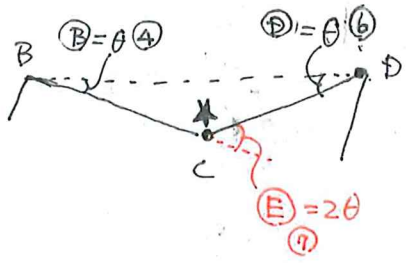
B点拡大図。

⑤ Ⓑ（=θ）とⒸは同じ角度（錯角）であるので、Ⓒ=θとなる。

⑥ 三角形BCDは二等辺三角形であるので
Ⓓは④（=θ）となる。



⑦ Ⓑ（=θ）とⒸ（=θ）と★を足すと180度となる（三角形の3つの角度の合計は180度）。
また★とⒺで180度。
よって Ⓔ = Ⓑ+Ⓒ = θ+θ = 2θ となる。



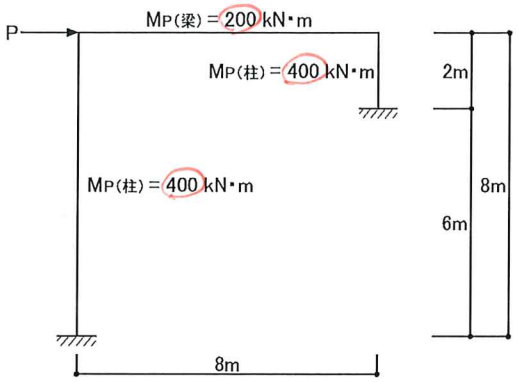
※ 幾何学（代数幾何）が苦手な人は、深入りしないこと！

「別解」が使えるのは「水平外力のみ」の場合です！

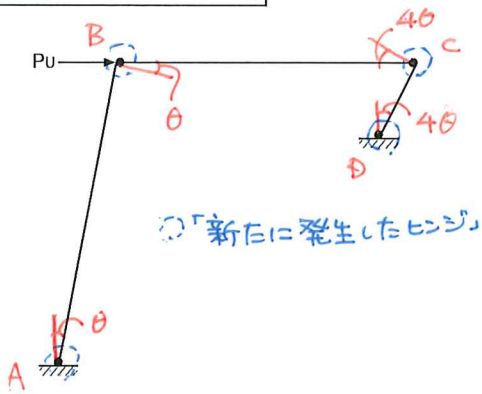
2'シリーズ（4 ヒンジで崩壊（ラーメンタイプ，水平外力のみ））

問題コード 05031

図−1のような水平荷重Pを受けるラーメンにおいて，Pを増大させたとき，そのラーメンは，図−2のような崩壊機構を示した．ラーメンの崩壊荷重P_uの値として，正しいものは，次のうちどれか．ただし，柱，梁の全塑性モーメントの値は，それぞれ400kN・m，200kN・mとする．



図−1



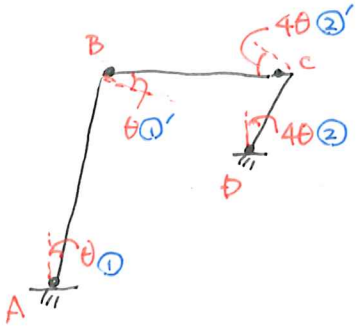
図−2

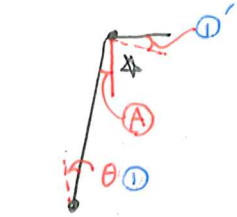
○「新たに発生したヒンジ」は4ヶ所

1. 225 kN
2. 300 kN
3. 375 kN
4. 500 kN

「外力のする仕事」＝「内力のする仕事」で解くことができます．
→アプリの解説参照．

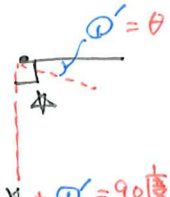
図−2の回転角について．
・A点の回転角をθとした時
・B点の回転角がθ
・C点 〃 4θ
・D点 〃 4θ
となることは大丈夫ですか？

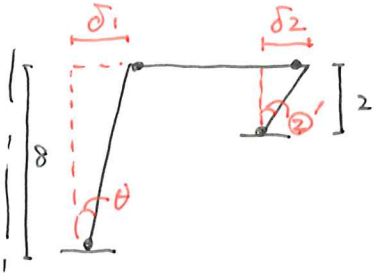




①をθとすると Ⓐもθとなる
（錯角）







$\delta_1 = 8\times\theta$，$\delta_2 = 2\times②'$

（力学3（資料）−1の Point①より．

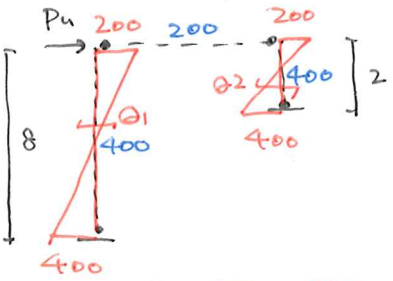
$\delta_1 = \delta_2$ より

$8\theta = 2\times②'$

$②' = 4\theta$

②と②'の関係は，①と①'の関係と同じように計算で求める

別解について



$Q_1 = \frac{400+200}{8} = \frac{600}{8} = 75$

$Q_2 = \frac{400+200}{2} = \frac{600}{2} = 300$

$P_u = Q_1 + Q_2 = 75 + 300 = 375$ kN．

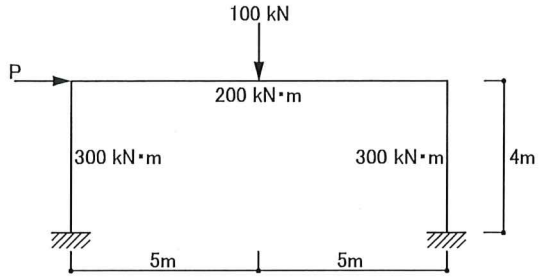
Point

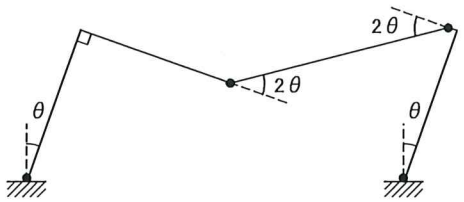
この別解の計算では，図−2の回転角の計算を必要としません！

問題コード 28041

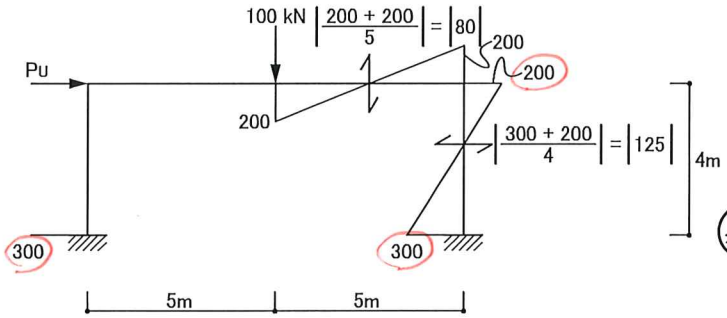
別解:

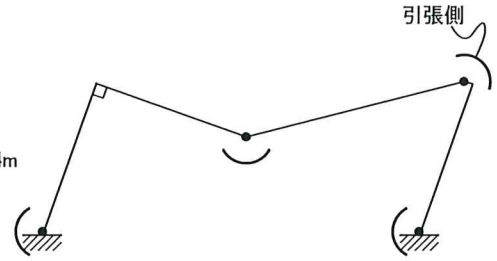
力の釣り合いで考える.



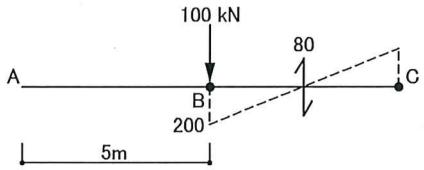


崩壊時の曲げモーメントを考える.





梁について考える.

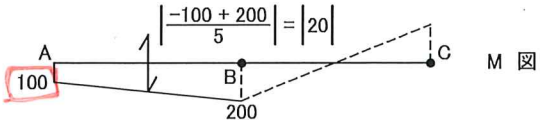


上下方向の力の釣り合いより,
外力100と釣り合うためには, A–B間のせん断力が20であれば良い.
A点の曲げモーメントをM_Aとすると

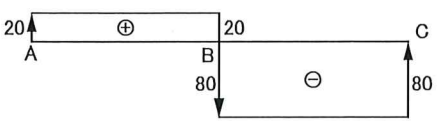
$$\left|\frac{M_A + 200}{5}\right| = |20|$$

$M_A + 200 = 100$

$M_A = -100$



M 図

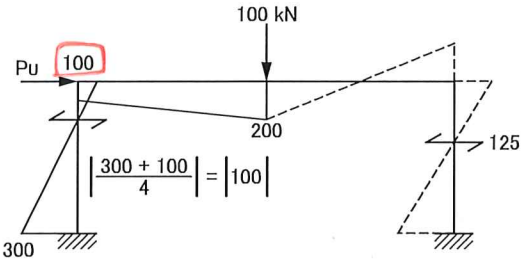


Q 図

梁A点の曲げモーメントは下側に100.

⇩

柱頭A点の曲げモーメントは右側に100.



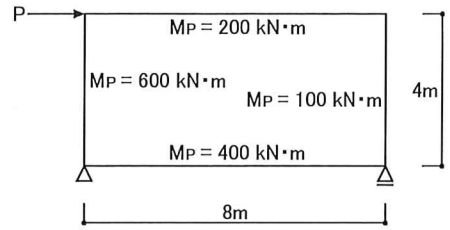
水平方向の力の釣り合いより,

$P_U = 100 + 125$

$= 225$

問題コード 07031

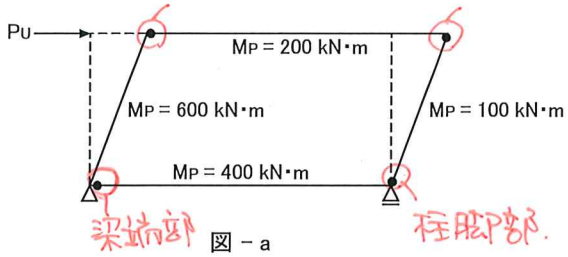
図のようなラーメンに作用する水平荷重Pを増大させたとき，ラーメンの崩壊荷重の値として，正しいものは，次のうちどれか．ただし，柱，梁の全塑性モーメントの値は図中に示す値とする．



1. 100 kN
2. 200 kN
3. 300 kN
4. 450 kN

問題の図の見るべきポイント
・柱脚部と1階梁の端部は剛接合．
→柱脚部にも曲げモーメントは発生する．

解説：

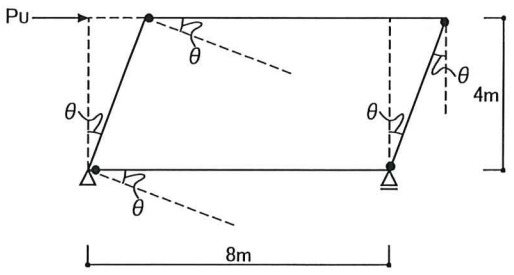


図－a

ヒンジが発生する位置は
・外力がかかる位置
・柱梁接合部
のうちの4か所．

柱梁接合部は，柱と梁の弱い方（Mpの小さい方）

ラーメンの崩壊機構が形成するとき，柱と梁の全塑性モーメントM_{pa}値の小さい側にヒンジが4か所形成される．
このラーメンにおいては，左側については上側・下側の梁の左端部に，右側については柱の上下部（柱頭・柱脚）にヒンジが形成される．



図－b

図-bのように，左側柱脚部分の回転角をθとすると，上側・下側の梁の左端部及び右側柱の上下部（柱頭・柱脚）の回転角は全てθとなる．

よって，

外力による仕事（We）＝「力×移動距離」の総和

$= P_U \times 4\theta$

内力による仕事（W i）$= \underset{\text{上梁左端}}{200\theta} + \underset{\text{下梁左端}}{400\theta} + \underset{\text{柱頭}}{100\theta} + \underset{\text{柱脚}}{100\theta}$

$= 800\theta$

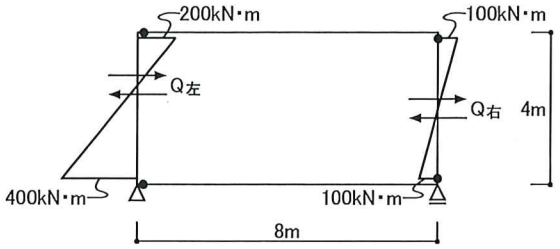
$P_U \times 4\theta = 800\theta$

$P_U = 200$ kN

解答：2

別解：

柱の曲げモーメント図を用い，内力系の力の釣り合いより崩壊荷重を求める．
図−aより，左側柱は上側・下側ともに梁端部にヒンジが生じているので，崩壊機構形成時の左柱の柱頭部分に生じる曲げモーメントの大きさは200kN・m，柱脚部分に生じる曲げモーメントの大きさは400kN・mであることがわかる．
右側柱は柱頭・柱脚にヒンジが生じているので，崩壊機構形成時の右柱の柱頭部分に生じる曲げモーメントの大きさは100kN・m，柱脚部分に生じる曲げモーメントの大きさは100kN・mであることがわかる



部材に生じているせん断力の値は，部材に生じている両端の曲げモーメントの値の和を，
部材の長さで割ることで求めることができる．
よって，

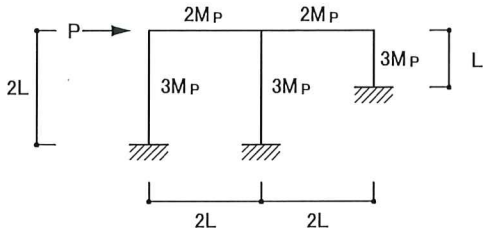
$$Q_{左} = \frac{400 + 200}{4} = 150\text{N}$$

$$Q_{右} = \frac{100 + 100}{4} = 50\text{kN}$$

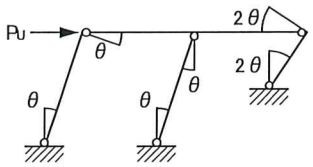
$$P_U = Q_{左} + Q_{右} = 150 + 50$$
$$= 200\ \text{kN・m}$$

問題コード 20041

図−1のようなラーメンに作用する荷重Pを増大させたとき，そのラーメンは図−2のような崩壊メカニズムを示した．ラーメンの崩壊荷重P_uを求めよ．
ただし，柱，梁の全塑性モーメントをそれぞれ$3M_P$，$2M_P$とする．



図−1



図−2

解説：

図−2の崩壊機構より

外力による仕事(We)　=「力×移動距離」の総称

$= P_u \times \delta$

$= P_u \times 2L\theta$

内力による仕事(Wi)　=「モーメント×回転角」の総称

① 左柱脚　② 左梁の左端　③ 中柱脚　④ 中柱頭　⑤ 右梁の右端　⑥ 右柱脚

$= 3M_P \times \theta + 2M_P \times \theta + 3M_P \times \theta + 3M_P \times \theta + 2M_P \times 2\theta + 3M_P \times 2\theta$

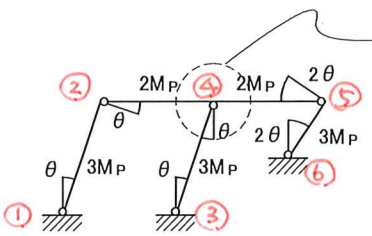
$= 21M_P\theta$

外力による仕事(We)　=　内力による仕事(Wi)より

$$P_u \times 2L\theta = 21M_P\theta$$

$$P_u = \frac{21M_P}{2L}$$

解答：　$P_u = \dfrac{21M_P}{2L}$

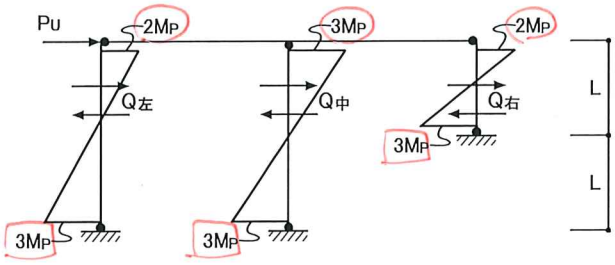


柱の両側に梁がある場合，
梁の全塑性モーメントの合計
($2M_P + 2M_P = 4M_P$)と
柱の全塑性モーメント$3M_P$の
小さい方に塑性ヒンジは発生する

→この問題では
柱頭にヒンジが発生

別解：

柱の曲げモーメント図を用い，内力系の力の釣り合いより崩壊荷重を求める．
問題文の図-2より，柱脚にはヒンジが生じているので崩壊機構形成時の柱脚の曲げモーメントは，柱の全塑性モーメントの3Mpであることがわかる．
また，側柱の柱梁接合部分では，柱の全塑性モーメントの3Mpに対して，梁の全塑性モーメントは2Mpであるので，梁端部にヒンジが生じていることがわかる．よって，崩壊機構形成時の側柱の柱頭の曲げモーメントは，梁の全塑性モーメントの2Mpであることがわかる．
中柱の柱梁接合部分では，柱の全塑性モーメント3Mpに対し，2本の梁の全塑性モーメントの合算値は4Mpであるので，小さい値の柱にヒンジが生じることがわかる．
よって，中柱の柱頭の曲げモーメントは3Mpであることがわかる．



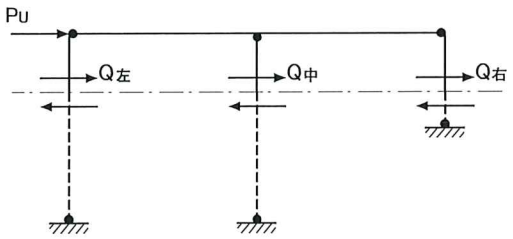
図－a

部材に生じているせん断力の値は，部材に生じている両端の曲げモーメントの値の和を，部材の長さで割ることで求めることができる．
よって，

$$Q_{左} = \frac{3M_P + 2M_P}{2L} = \frac{5M_P}{2L}$$

$$Q_{中} = \frac{3M_P + 3M_P}{2L} = \frac{6M_P}{2L}$$

$$Q_{右} = \frac{3M_P + 2M_P}{L} = \frac{5M_P}{L}$$



$$P_U = \frac{5M_P}{2L} + \frac{6M_P}{2L} + \frac{5M_P}{L}$$

$$= \frac{21M_P}{2L}$$

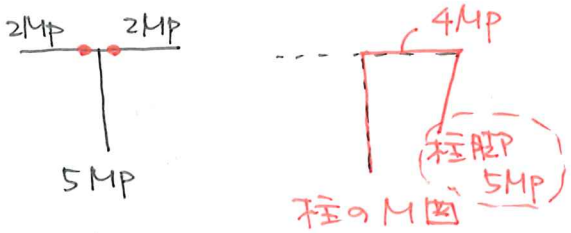
おまけ

中柱（柱の両側に梁がついている柱）

・梁の合計値 4Mp ＞ 柱3Mpの場合



・梁の合計値 4Mp ＜ 柱5Mpの場合

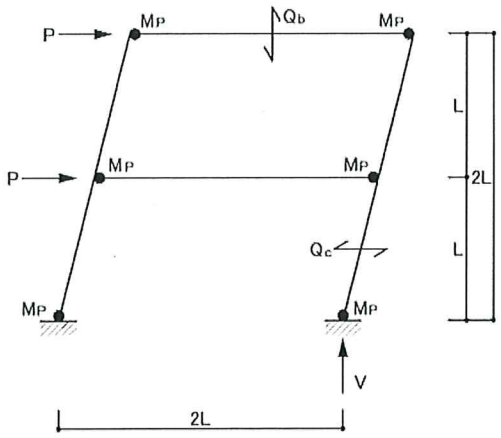


3シリーズ（不静定＋崩壊荷重）　応用問題（難しい問題）です♪

問題コード 03041

静定・不静定のシリーズ（力は上から下へ流れる）と崩壊荷重の複合問題です。

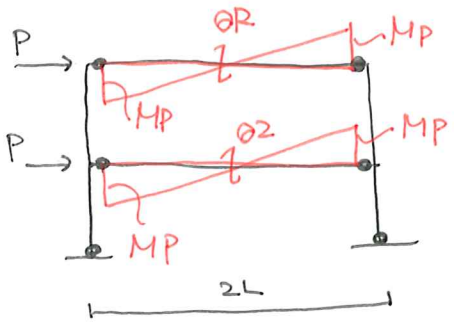
図は2層のラーメンに水平荷重Pが作用したときの，正しい崩壊メカニズムを示したものである．次の記述のうち，最も不適当なものはどれか．ただし，柱及び梁の全塑性モーメントはM_Pとする．



1. 図のせん断力Q_bは，$\frac{M_P}{L}$である．
2. 図の鉛直反力Vは，$\frac{2M_P}{L}$である．
3. 図の水平荷重Pは，$\frac{2M_P}{L}$である．
4. 図のせん断力Q_cは，$\frac{4M_P}{L}$である．

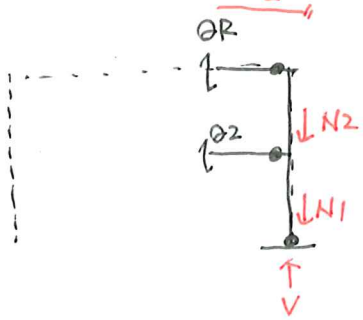
考え方

・梁端部にヒンジが形成されるので崩壊メカニズム時の梁の曲げモーメント図は下図のようになることがわかる．



1. $Q_b=\frac{M_P+M_P}{2L}=\frac{M_P}{L}$　$(=Q_R=Q_2)$

2.



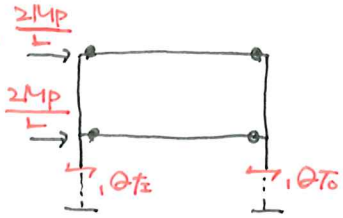
上下方向の力の釣り合い

$V=N_1=N_2+Q_2$
$=Q_R+Q_2$
$=\frac{M_P}{L}+\frac{M_P}{L}$
$=\frac{2M_P}{L}$

3. 柱の曲げモーメントについて
2階梁の全塑性モーメントと，
2階柱脚と1階柱頭の
全塑性モーメントの合計値が
釣り合う（＝同じ値）．
→ 2階柱脚と1階柱頭の
曲げモーメントの合計値はMP．
つまり 柱の曲げモーメント図は0からない

柱のせん断力の合計値から外力Pを求めるのではなく，「外力のする仕事」＝「内力のする仕事」で外力Pを計算する
（具体的な計算はアプリの解説参照）

4.



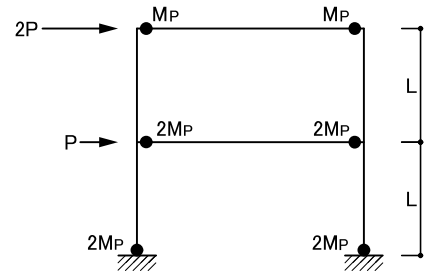
水平方向の力の釣り合い

架構の対称性より，$1\theta_{左}=1\theta_{右}$

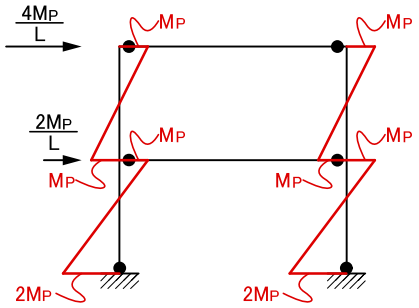
$\frac{2M_P}{L}+\frac{2M_P}{L}=2_1\theta$

$1\theta_1=\frac{2M_P}{L}$

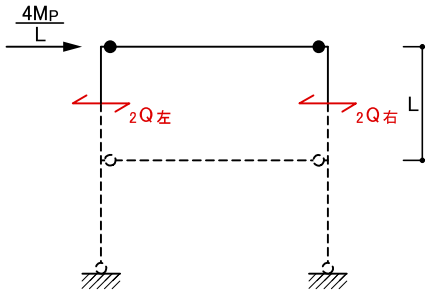
23041 ， 29041

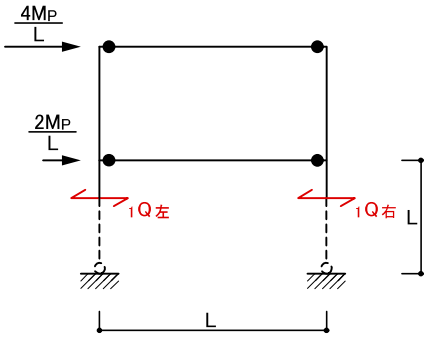


$P = \frac{2M_P}{L}$



柱のM図





$_2Q_{左} = {}_2Q_{右}$（$= {}_2Q$）

$_2Q = \frac{M_P + M_P}{L} = \frac{2M_P}{L}$

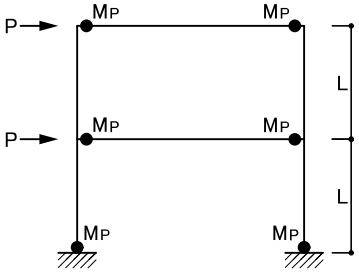
$_2Q_{左} + {}_2Q_{右} = 2 \times {}_2Q = \frac{4M_P}{L}$

$_1Q_{左} = {}_1Q_{右}$（$= {}_1Q$）

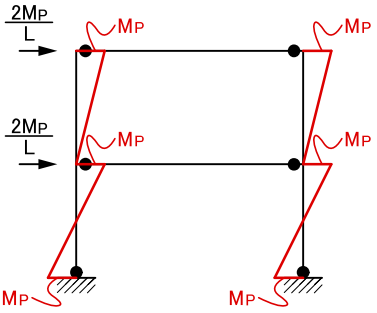
$_1Q = \frac{2M_P + M_P}{L} = \frac{3M_P}{L}$

$_1Q_{左} + {}_1Q_{右} = 2 \times {}_1Q = \frac{6M_P}{L}$

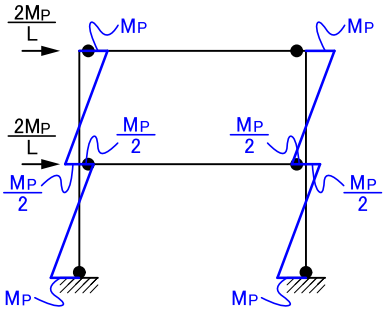
03041



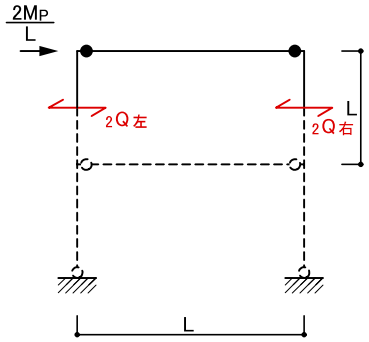
$P = \frac{2M_P}{L}$

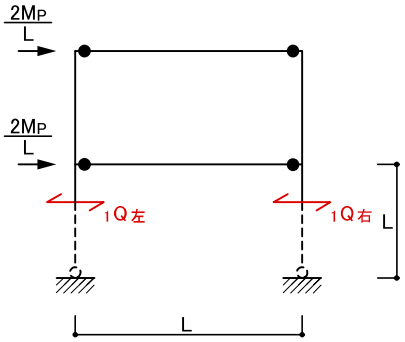


柱のM図



誤った柱のM図





$_2Q = \frac{0 + M_P}{L} = \frac{M_P}{L}$

$_2Q_{左} + {}_2Q_{右} = 2 \times {}_2Q = \frac{2M_P}{L}$

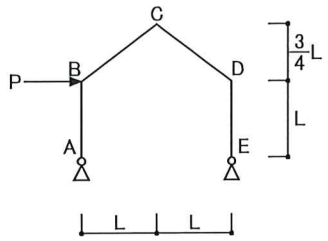
$_1Q = \frac{M_P + M_P}{L} = \frac{2M_P}{L}$

$_1Q_{左} + {}_1Q_{右} = 2 \times {}_1Q = \frac{4M_P}{L}$

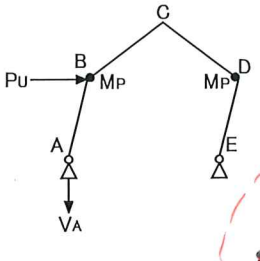
計算のPoint
枝1〜4のうち、計算が
楽そうなものからとりかかる!

問題コード 26041

図−1のような山形ラーメンに作用する水平荷重Pを増大させたとき，山形ラーメンは図−2のような梁端部に塑性ヒンジを生じる崩壊機構を示し，そのときの水平荷重の大きさはP_Uであった．次の記述のうち，最も不適当なものはどれか．ただし，梁の全塑性モーメントはM_Pとする．

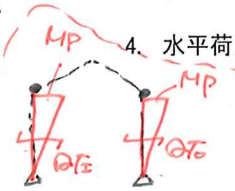


図−1



図−2

1. A点の垂直反力V_Aは$\frac{M_P}{L}$である．
2. 梁BCのせん断力は$\frac{7M_P}{4L}$である．
3. 柱DEの軸力は$\frac{M_P}{L}$の圧縮力である．
4. 水平荷重P_uは$\frac{2M_P}{L}$である．



$Q_{左}=Q_{右}=\frac{0+M_P}{L}=\frac{M_P}{L}$

$P_u=Q_{左}+Q_{右}=\frac{2M_P}{L}$

解説：

・支点Aにおける回転角をθとした時の崩壊機構は，図−aのようになる．
この時の荷重点Bにおける荷重方向の変位δは，

$\delta = L\theta$

よって，外力のする仕事 ： $P_U \times L\theta$

内力のする仕事 ： $M_P \times \theta + M_P \times \theta = 2M_P\theta$

$P_U \times L\theta = 2M_P\theta$ より $P_U = \frac{2M_P}{L}$ ・・・選択肢4：○

→ 柱AB．柱DEのせん断力の合計値がP_u．
柱のM図やQ図が描けますか？
→ それが難しいなら，仮想仕事法で解く．

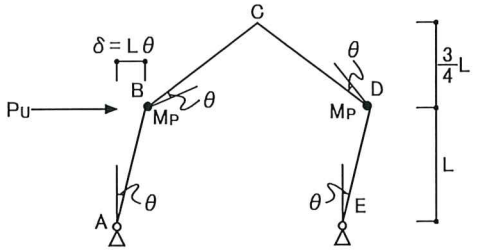


図 − a

・図−bのように支点反力を仮定する．

$\Sigma_E M = 0$ より，

$+V_A \times 2L + P_u \times L = 0$

$V_A = -\frac{P_u}{2}$ （下向き）

$P_u = \frac{2M_P}{L}$ より，

$V_A = -\frac{2M_P}{L} / 2 = -\frac{M_P}{L}$ （下向き） ・・・選択肢1：○

→ P_uにより ↷ $P_u \times L$の時計回りの回転．

↓V_A ↑V_Eにより ↶ $V \times 2L$の反時計回りの偶力モーメント．

$P_u \times L = 2 \cdot VL$

$V = \frac{P_u}{2} = \frac{2M_P}{L} \times \frac{1}{2} = \frac{M_P}{L}$

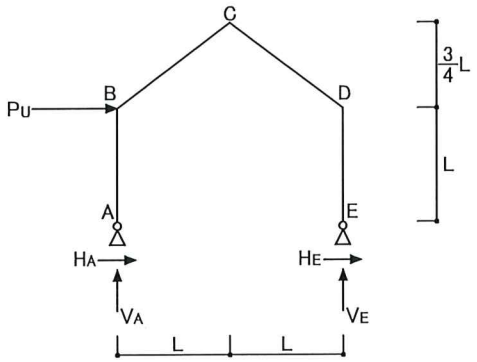


図 − b

・$\Sigma Y = 0$ より，

$+V_A + V_E = 0$

$V_E = -V_A = -\left(-\frac{M_P}{L}\right) = +\frac{M_P}{L}$ （上向き）

柱DEの軸力N_{DE}は，支点反力V_Eとつり合う．

よって，

$N_{DE} = \frac{M_P}{L}$ （圧縮力） ・・・選択肢3：○

→ 柱脚レベルの梁がない場合．柱の軸は鉛直支点反力と釣り合います．

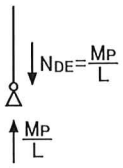


図 − c

（節点を押す向きなので圧縮材）．
→ トラスの節点法．

・曲げモーメント図は，図−dのようになる．
塑性ヒンジが生じているB点とD点の曲げモーメントはM_P，

BD間の中央にあるC点の曲げモーメントは$\frac{3M_P}{4}$ となる．

$$Q_{BC} = -\frac{+M_P + \frac{3M_P}{4}}{\frac{5L}{4}}$$

$$= -\frac{7M_P}{4} \times \frac{4}{5L}$$

$$= -\frac{7M_P}{5L}$$ ・・・選択肢2: ×

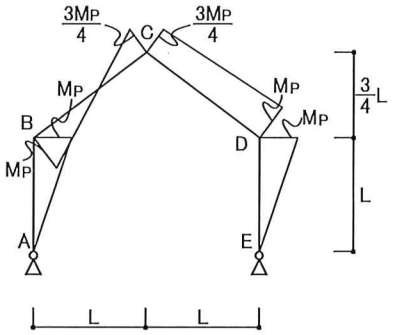
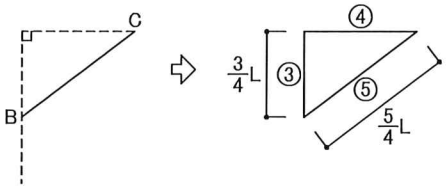
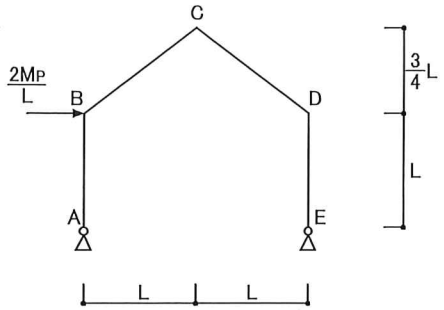


図 − d

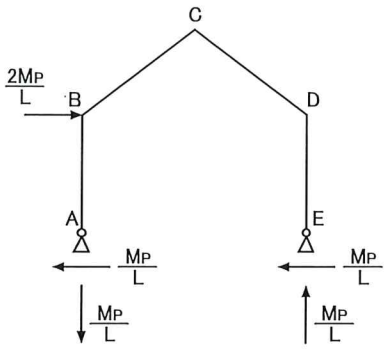


解答： 2

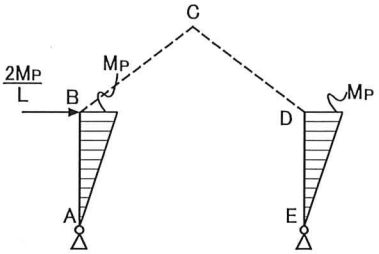
補足説明(曲げモーメント図):



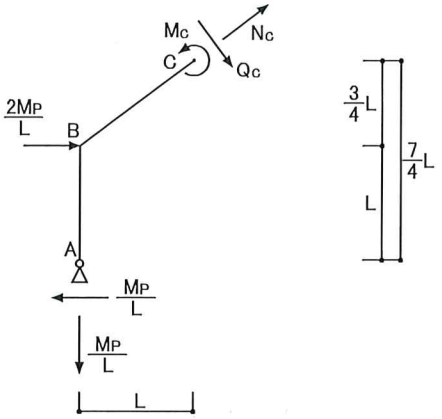
支点反力は



梁BCのB側及び梁CDのD側にヒンジが生じて崩壊形を示すので,柱の曲げモーメントは下図のようになる.



C点で架構を切断して左側を考える.



C点に着目して,架構が回転しないことを確認する.

$\Sigma_C M = 0$ より,

$$-M_C - \frac{2M_P}{L}\times\frac{3}{4}L + \frac{M_P}{L}\times\frac{7}{4}L - \frac{M_P}{L}\times L = 0$$

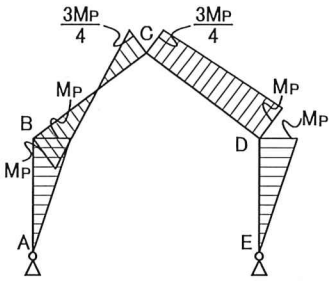
$$M_C = -\frac{3}{2}M_P + \frac{7}{4}M_P - M_P$$

$$= \frac{-6+7-4}{4}M_P$$

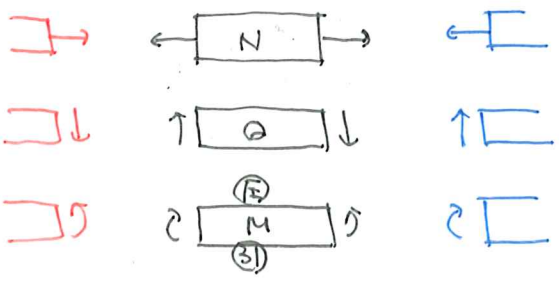
$$= -\frac{3}{4}M_P$$

梁の下梁引張と仮定しての計算
→答の符号がマイナスなので,
C点は上側引張とする.

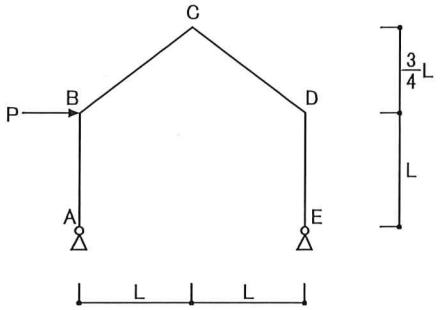
全体の曲げモーメント図としては,

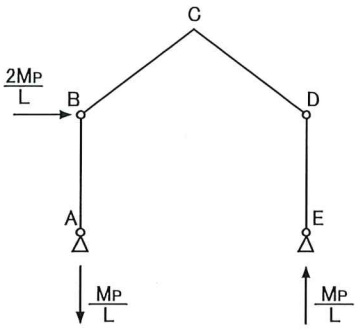


となる.



補足説明(梁BCのせん断力):





選択肢1, 3, 4より, B点の外力　$P = \frac{2M_P}{L}$

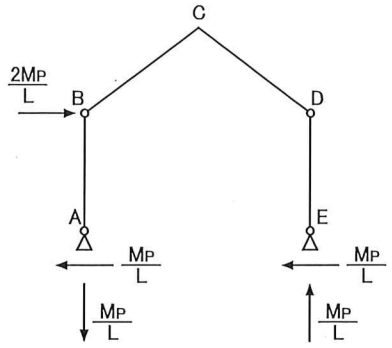
A点の鉛直支点反力　$V_A = -\frac{M_P}{L}$ (下向き)

E点の鉛直支点反力　$V_E = \frac{M_P}{L}$ (上向き)

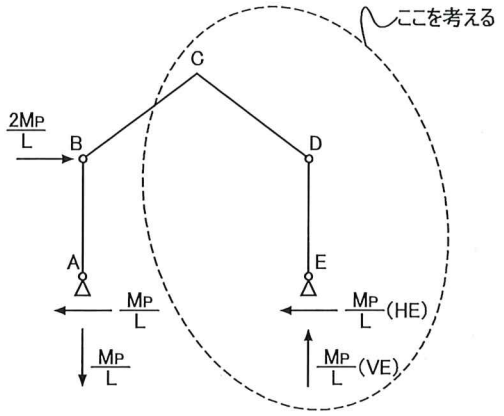
B点及びD点に塑性ヒンジが生じる崩壊系発生時の柱頭M_BとM_Dは, 共にM_Pとなる.
A点とE点の水平支点反力をH_A, H_Eとすると,

$H_A \times L$(柱ABの長さ) = M_P

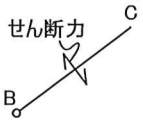
$H_E \times L$(柱EDの長さ) = M_Pであるため,



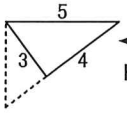
となる.



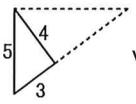
梁BCのせん断力は, 梁BCに直交方向であるので,



HE及びVEは梁BCの直交方向成分と釣り合う.



$\frac{M_P}{L}$ は, $\frac{M_P}{L} \times \frac{3}{5}$ ・・・梁BCのせん断力



$\frac{M_P}{L}$ は, $\frac{M_P}{L} \times \frac{4}{5}$ ・・・梁BCのせん断力

よって,

$$Q_{BC} = \frac{3}{5} \times \frac{M_P}{L} + \frac{4}{5} \times \frac{M_P}{L}$$

$$= \frac{7M_P}{5L}$$

となる.

力学３（固有周期の過去問題）

1本柱の固有周期

$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{mh^3}{3EI}}$

→ 力学3（資料）-3 参照.

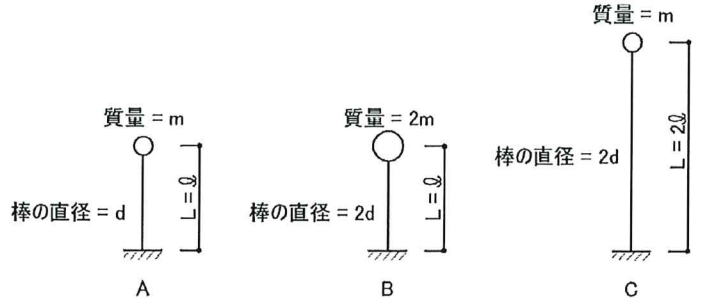
$T = \frac{2\pi}{\sqrt{3E}}\sqrt{\frac{mL^3}{I}} = \bigcirc\sqrt{\frac{mL^3}{I}}$

直径 d の円の断面二次モーメント I_0

$I_0 = \frac{\pi d^4}{64}$

問題コード 19071

図のような頂部に集中質量をもつ丸棒A，B，C における固有周期 T_A，T_B，T_C の大小関係を求めよ．ただし，3本の棒はすべて等質とし，棒の質量は無視する．なお，棒のバネ定数は $\frac{3EI}{L^3}$（L：棒の長さ，E：ヤング係数，I：断面二次モーメント）である．



$T_A = \bigcirc\sqrt{\frac{mL^3}{\frac{\pi d^4}{64}}} = \bigcirc\sqrt{\frac{64mL^3}{\pi d^4}}$

$T_B = \bigcirc\sqrt{\frac{2mL^3}{\frac{\pi(2d)^4}{64}}} = \bigcirc\sqrt{\frac{64\times 2mL^3}{16\pi d^4}} = \bigcirc\sqrt{\frac{64mL^3}{8\pi d^4}}$

$T_C = \bigcirc\sqrt{\frac{m(2L)^3}{\frac{\pi(2d)^4}{64}}} = \bigcirc\sqrt{\frac{64\times 8mL^3}{16\pi d^4}} = \bigcirc\sqrt{\frac{64\times 4mL^3}{8\pi d^4}}$

$T_A : T_B : T_C = \bigcirc\sqrt{\frac{8\times 64mL^3}{8\pi d^4}} : \bigcirc\sqrt{\frac{64mL^3}{8\pi d^4}} : \bigcirc\sqrt{\frac{4\times 64mL^3}{8\pi d^4}}$

$= \sqrt{8} : 1 : 2$

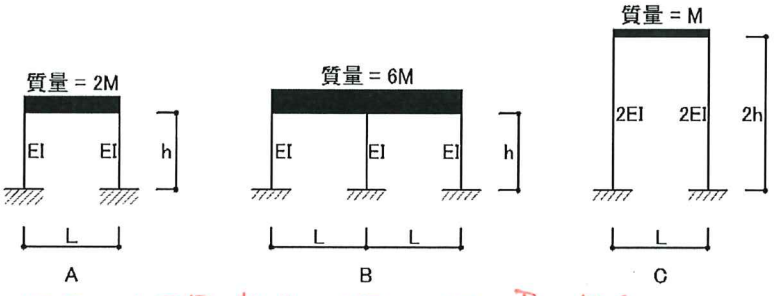
$= 2\sqrt{2} : 1 : 2$

$\Rightarrow T_A > T_C > T_B$

※. $I_0 = \frac{d\times d^3}{12} = \frac{d^4}{12}$ で代用可能.

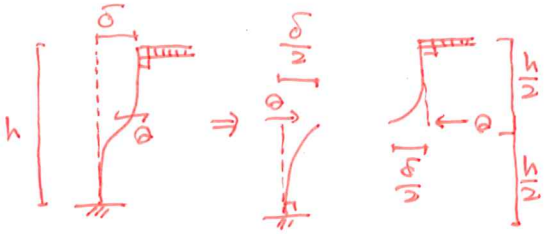
問題コード 04071

図のようなラーメン架構A，B及びCの水平方向の固有周期をそれぞれ T_A，T_B 及び T_C としたとき，それらの大小関係として，正しいものは，次のうちどれか．ただし，柱の曲げ剛性は図中に示すEIあるいは2EIとし，梁は剛体とする．また，柱の質量は考慮しないものとする．



1. $T_A < T_B = T_C$
2. $T_B < T_A < T_C$
3. $T_B = T_C < T_A$
4. $T_C < T_A < T_B$

ラーメン架構の水平剛性Kの値は，柱2本の場合は柱1本の場合の2倍となる．



$T_A = 2\pi\sqrt{\frac{2M\times h^3}{12EI\times 2}} = 2\pi\sqrt{\frac{Mh^3}{12EI}}$

$T_B = 2\pi\sqrt{\frac{6M\times h^3}{12EI\times 3}} = 2\pi\sqrt{\frac{2Mh^3}{12EI}}$

$T_C = 2\pi\sqrt{\frac{M\times(2h)^3}{12\times 2EI\times 2}} = 2\pi\sqrt{\frac{2Mh^3}{12EI}}$

$\frac{\delta}{2} = \frac{Q(\frac{h}{2})^3}{3EI}$

$\delta = \frac{2Qh^3}{8\times 3EI} = \frac{Qh^3}{12EI} = \frac{Q}{K}$

$K = \frac{12EI}{h^3}$

$T_A < T_B = T_C$

問題コード 28061

図-1 のような頂部に質量m 又は2m をもち，剛性がK又は2Kの棒A，B，Cにおける固有周期はそれぞれT_A，T_B，T_Cである．それぞれの棒の脚部に図-2 に示す加速度応答スペクトルをもつ地震動が入力されたとき，棒に生じる最大応答せん断力がQ_A，Q_B，Q_Cとなった．Q_A，Q_B，Q_Cの大小関係を求めよ．ただし，T_A，T_B，T_Cは図-2 のT_1，T_2，T_3のいずれかに対応し，応答は水平方向であり，弾性範囲内とする．

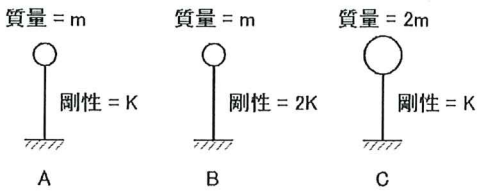


図-1

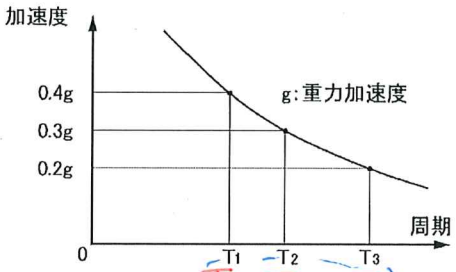


図-2

慣性力F = 質量m × 加速度a

→ 構造文章「4. 荷重・外力」の解説集 P35（電子書籍 P399）

$T_A=2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$，$T_B=2\pi\sqrt{\frac{m}{2K}}$，$T_C=2\pi\sqrt{\frac{2m}{K}}$ より $(T_B<T_A<T_C)$

図-2 より $a_A=0.3g$，$a_B=0.4g$，$a_C=0.2g$

$Q_A=a_A\times m=0.3g\times m=0.3mg$

$Q_B=a_B\times m=0.4g\times m=0.4mg$

$Q_C=a_C\times 2m=0.2g\times 2m=0.4mg$

$\therefore\ Q_A<Q_B=Q_C$