はじめに

21 世紀に入り，立て続けに疲労が原因と考えられる損傷事故が報告されている．わが国でも，ジェットコースター車軸の疲労破壊による事故，鋼製橋脚隅角部の疲労損傷，I 断面橋梁のウェブに生じた 1 m にも及ぶき裂，標識柱の落下事故など，人命に関わる，あるいはヒヤッとする事故などが生じた．そして最近では，鋼床版のデッキプレート・トラフリブ溶接のルートから発生してデッキプレートを貫通する疲労き裂が問題となっている．このような疲労による事故を未然に防ぐには，維持管理の果たす役割も大きいが，適切な方法で疲労設計を行うことが不可欠である．

日本鋼構造協会では，一般的な鋼構造物を対象とした疲労設計指針，すなわち鋼構造物の疲労設計のためのモデルコードとして，1974 年に「日本鋼構造協会疲労設計指針（案)」を公表した．さらに，この指針の改定を目指して，1986 年に「疲労設計指針改定小委員会」（委員長 三木千寿 東京工業大学教授）が組織され，広範な調査と活発な議論を重ねた後，1989 年に「鋼構造物の疲労設計指針（案)」を JSSC レポートとして公表した．

その後，上記指針（案）について意見を聴取し，さらに「設計例」および同指針改定のために調査・整理した事項をとりまとめた「資料編」を加え，1993 年に『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』を出版した．同書の「設計例」は充実したものであり，また「資料編」は教科書的な役割を果たし，鋼構造の疲労に関する技術の発展に寄与してきた．さらに指針の内容は，その後作成された道路橋や鉄道橋，クレーン，そして建築構造物の疲労設計基準類にも利用されている．

それから十余年が過ぎた 2006 年に，1993 年版指針を改定するための小委員会が設けられた．改定の趣旨と理由は以下のとおりである．

疲労設計の基礎となる各継手の疲労強度は，疲労試験結果に基づいて設定されている．その際に利用された疲労試験データの多くは，名古屋大学の山田健太郎教授の研究室（当時）で収集されたものであるが，当時までの溶接の主流は低水素系の溶接棒を用いるものであった．しかし，1993 年版指針出版の頃から，鋼構造物の溶接の主流は CO_2 法へと移行している．溶接継手の疲労強度は継手形式だけでなく溶接形状にも影響されるため，CO_2 溶接で製作された継手に対し，1993 年版指針で定めている疲労強度等級をそのまま適用できるか否か検討する必要が生じた．またその間に，数多くの疲労に関する有用な知見が得られており，さらに合理的な疲労設計を行うためには，それらを有効利用すべきであると判断された．

そこで新改定小委員会では，1993 年版指針の見直しや国内外の各種鋼構造物の疲労設計法の調査などから活動を開始したが，特に時間を要したのが疲労試験データの収集と整理であった．1993 年版指針を作成する際に用いた疲労試験データに，最近 20 年間の疲労試験データを加えて新たなデータベースを作成し，各溶接継手の疲労強度等級の検討等に役立てた．また，最新の知見を取り入れ，ホットスポット応力を用いた照査と疲労き裂進展解析を用いた疲労照査について充実を図った．

このような検討に基づき，2010 年 12 月に「鋼構造物の疲労設計指針・同解説（改定案)」を日本鋼構造協会規格として発行した．その後，同改定案に対する意見を聴取し，指針の内容を詳細に

見直すとともに，指針の使用性を高める目的で，さまざまな鋼構造物を対象とした疲労設計例および疲労照査例の作成に取り組み，この度の出版に至った．

以上の経緯から，2010年の改定案とは内容の異なる部分もあることに注意いただきたい．

最後に，頼りない身勝手な舵取りにも関わらず，指針および設計例の検討・執筆・編集に尽力された委員の方々にこの場を借りて厚く御礼申し上げる．また，本企画を推進いただいた日本鋼構造協会事務局の委員会担当者，そして出版を進めていただいた技報堂出版の編集担当者に感謝申し上げたい．

2012年4月

社団法人日本鋼構造協会 疲労設計指針改定小委員会

委員長　森　　猛

鋼構造物の疲労設計指針・同解説

［2012 年改定版］

第1章　総　　則

1.1　適用範囲

(1)　本指針では，鋼構造物およびそれを構成する部材の疲労限界状態に対する安全性を照査する方法を示す．疲労限界状態とは，疲労損傷により，構造物，構造部材，継手の強度あるいは機能が損なわれる状態をいう．

(2)　構造物は主として常温の大気中で使用されるものとし，腐食が懸念される構造物については適切に防食することを原則とする．

(3)　本指針は既設構造物の疲労照査にも適用できる．

(4)　設計寿命中に予想される公称応力の絶対値が降伏応力を超える場合には，本指針を適用することはできない．

(5)　疲労設計に関して本指針で規定していない事項については，当該機関の責任において判断するものとする．

(6)　本指針では，疲労以外の限界状態に対する安全性の照査については規定しない．それらについては，関連する基準類に従って行うものとする．

【解説】

(1)　本指針では，疲労限界状態を，疲労き裂が成長して構造物の強度あるいは機能が損なわれる状態と定義している．3.2 節で示す継手の疲労強度は，疲労き裂が板厚を貫通する程度までの繰返し数に相当する強度である．

(2)　本指針では，腐食環境における疲労，いわゆる腐食と疲労の影響を同時に受ける構造物は適用範囲外とする．また，高温下にある構造物も適用範囲外とする．

(3)　本指針を用いることにより，既設の構造物あるいは構造部材がこれまでに受けた疲労損傷を評価することで，余寿命評価や疲労照査も可能である．ただし，これまでの構造物の使用状況や今後予想される使用状況を考慮して，疲労照査に用いる荷重を設定する必要がある．

(4)　本指針では高サイクルの疲労を対象としており，各継手の基本疲労強度は高サイクル領域の疲労試験データに基づき設定している．そのため，公称応力の絶対値が材料の降伏応力を超えるような場合には，本指針は適用できない．

(5)　疲労設計は本指針の内容を十分に理解した上で行う必要がある．ただし，本指針で規定していない事項については，当該機関の判断によるものとする．

(6)　限界状態設計法では，一般に終局限界状態，使用限界状態，疲労限界状態のそれぞれに対して安全性が照査されるが，本指針では疲労限界状態の照査法について示す．

1.2 用語および記号

本指針で使用する用語および記号の定義は，以下に示すとおりである．

1.2.1 用　　語

疲労損傷：荷重の繰返し作用が原因で，構造物，構造部材，継手に疲労き裂が発生・進展することによる損傷．

公称応力：梁理論や骨組解析等によって求められる断面力に基づく応力．

純断面応力：材片総幅からボルト孔などの孔の幅を控除した純幅に板厚を乗じたものを純断面積と呼び，それをもとに計算される応力．

総断面応力：孔による控除を行わず，材片総幅に板厚を乗じたものを総断面積と呼び，それをもとに計算される応力．

応力範囲：応力の最大値と最小値の代数差．

等価応力範囲：変動振幅応力と同じ繰返し数で等価な疲労損傷度を与える一定振幅の応力範囲．

ホットスポット応力：疲労損傷が生じる位置での局部応力であり，溶接ビード形状による応力集中は含まない．

継手の種類：形式および疲労強度に応じた継手の分類であり，それぞれに対して強度等級が与えられている．

強度等級：A～I，K1～K5，Sの記号で示される．それぞれに対して疲労設計曲線が設定されている．

疲労設計曲線：それぞれの強度等級に対して与えられた応力範囲（直応力範囲，せん断応力範囲）と疲労寿命の関係を示す曲線．

基本疲労強度：疲労設計曲線に基づいて求められる所定の応力繰返し数に対する応力範囲．

2×10^6 回基本疲労強度：疲労設計曲線に基づいて求められる 2×10^6 回の応力繰返し数に対する応力範囲．

疲労強度：基本疲労強度を平均応力や板厚などの影響を考慮して補正した疲労強度．

一定振幅応力に対する応力範囲の打切り限界：一定振幅応力の疲労限に対応するものであり，作用する変動振幅応力のすべての応力範囲成分がこの値以下であれば，疲労照査を行う必要のない応力範囲の限界値．

変動振幅応力に対する応力範囲の打切り限界：この値以下の応力範囲成分は，疲労損傷に寄与しないと考えてよい応力範囲の限界値．

設計寿命：設計上期待する構造物の使用期間．

単位期間：設計寿命を算出するために用いられる単位となる期間．構造物の性質に応じて，時間，日，週，月，年など，任意に選んでよい．

疲労設計荷重：疲労設計に用いる荷重．１つの荷重単位または複数の荷重単位の組合せ，あるいは代表荷重単位で与えられる．

荷重単位：単位期間内の活荷重の性状を十分に表すような荷重で，その大きさと頻度および載荷位置により与えられる．

第２章　疲労設計荷重

2.1　疲労設計荷重

疲労設計荷重は，設計寿命中に構造物に作用する荷重の特性を十分に表すことのできるものとし，１つの荷重単位または複数の荷重単位の組合せ，あるいは代表荷重単位を用いて設定する．

2.2　荷重単位

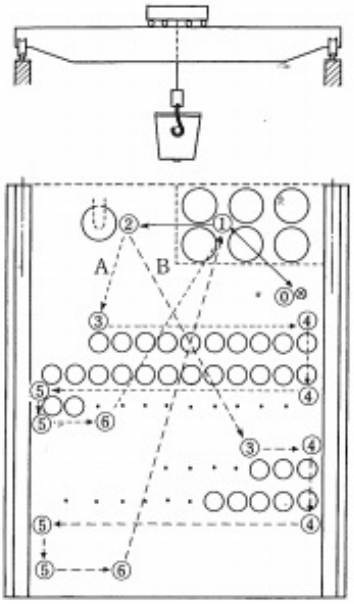
荷重単位は，構造物の使用目的および予想される使用状況に応じて設定する．荷重単位は，単位期間内に作用する荷重の特性を十分に表すことのできるような荷重の大きさと頻度，および位置と移動により与えられる．複数の荷重単位を用いることが適当な場合には，その種別ごとに荷重単位を設定する．

荷重単位の荷重の大きさを確定値ではなく，変動するとした方が適切な場合には，そのように設定する．

【解説】

構造物にさまざまな繰返し荷重が作用する場合には，荷重の大きさや頻度，その組合せなどの荷重の特性を考慮した上で，疲労設計荷重を設定する必要がある．荷重単位は，単位期間内に作用する荷重の性状を十分に表すことのできるような荷重の大きさと頻度および位置と移動により与えられる．複数の荷重単位を用いることが適当な場合には，その種別ごとに荷重単位を設定する．通常，１つの荷重単位で構造物の疲労荷重を設定できることはまれであるため，複数の荷重単位で疲労荷重を与えることになる．以下では，クレーン走行桁，道路橋，鉄道橋，船舶を例として，その荷重単位について解説する．

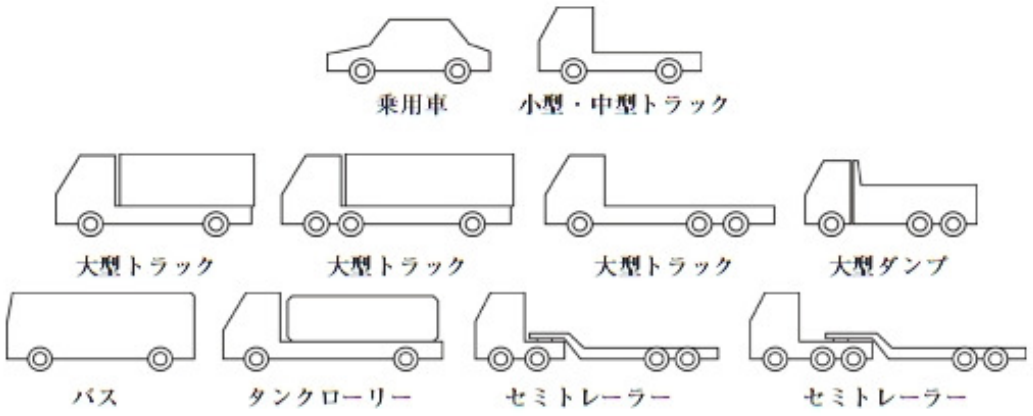
クレーン走行桁では，クレーンと吊り上げる荷の重さとクレーンの一連の動き，およびその頻度が１つの荷重単位となる．図解 2.1 にレードルクレーン走行桁の荷重単位の例を示す．この例では２つの荷重単位を考えている．２つの荷重単位の載荷位置の動きは，ともに，クレーンが休止位置⓪より出発し，①で空レードルを吊り上げ，②の注鋼口で一旦，空レードルを下げ，これに溶鋼が満たされるのを待って再び吊り上げ，③へ移動し，ここから順次インゴットケースへ溶鋼を注ぎ，④，⑤を経て⑥でレードルが空になり，①へ移動しレードルを外し，そして⓪の休止位置で待機する，である．ただし，荷重単位Ａ（定常荷重）ではイッゴットケースがレードル



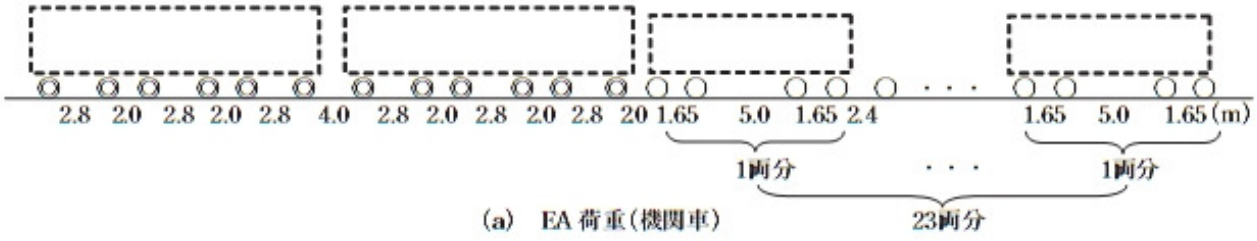
図解 2.1　レードルクレーン走行桁の荷重単位の例

側からみてクレーン走行桁中央より手前にあり，荷重単位Ｂ（一時的な荷重）では走行桁中央より奥にある．荷重単位の荷重の大きさは，それぞれの位置で，(空レードル重量)，(空レードル重量＋定格溶鋼重量)，(空レードル重量＋定格溶鋼重量－インゴットケースへの注入溶鋼重量)，(空レードル重量）と変化する．荷重単位の頻度は，レードルクレーンの計画使用頻度をもとに定める．例えば，単位期間を週とし，荷重単位Ａの頻度121，荷重単位Ｂの頻度98などと設定する．

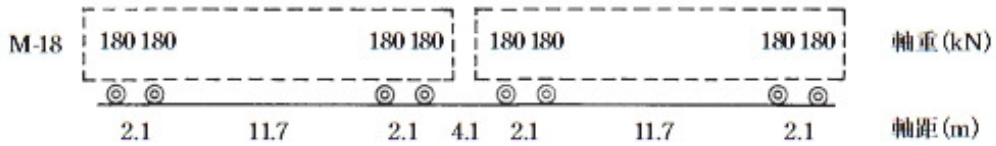
道路橋については，車両の軸重，車軸数，車軸間隔と橋梁上の通過位置および頻度が１つの荷重単位となる．このような荷重単位をいくつかの代表的な形式の車両に対して設定し，それらを組み合せることで疲労設計荷重を設定する．例えば，**図解2.2**に示すように，乗用車，トラック（2軸，3軸），トレーラートラック（4軸，5軸）などに車両を分類し，それぞれを荷重単位とすることが考えられる．また，これらの車両（荷重単位）の重量分布が交通車両の走行実態調査などにより既



図解2.2　自動車荷重の車種別分類の例



(a)　EA荷重(機関車)



(b)　M荷重(電車・内燃動車)

(c)　H荷重(新幹線)

図解2.3　鉄道橋における列車荷重の軸配置の例

第６章　既設鋼構造物の疲労照査と点検・診断・対策

6.1　疲労照査

既設鋼構造物の疲労照査は，想定寿命を定めた上で，現時点までに対象部位が受けた応力範囲の頻度分布と，今後受けるであろう応力範囲の頻度分布を適切な方法で求め，3.3 節に従って行う．

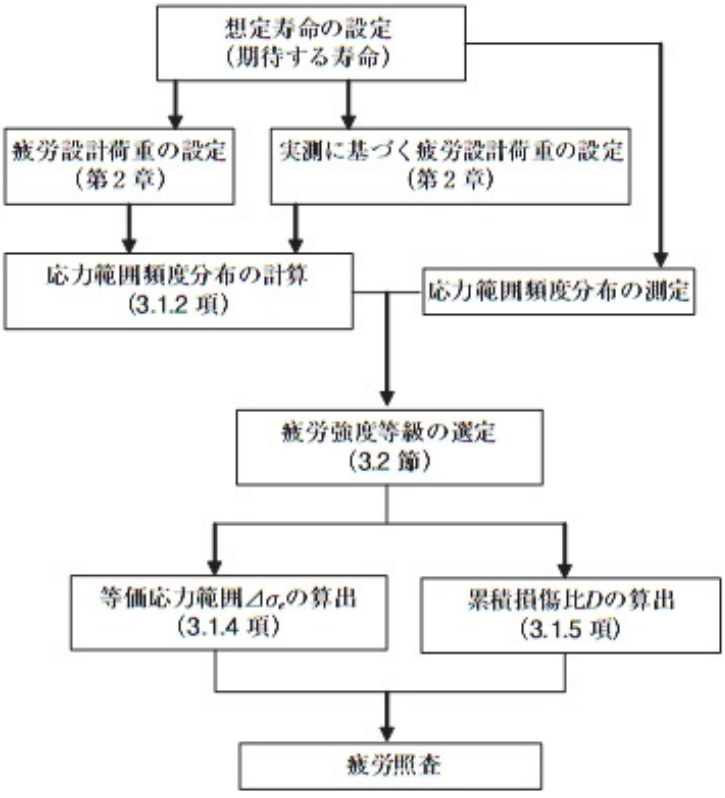
【解説】

既設鋼構造物の疲労照査は，点検実施前に行う場合と点検実施後に行う場合がある．点検実施結果に基づいて行う場合には，疲労き裂が検出されなかった場合と検出された場合に分けて行われる．さらに，補修や予防保全などの対策を行った場合を対象として行うこともある．ここでは，疲労き裂が検出されなかった，あるいは対策を講じた場合を対象とした疲労照査方法について示す．なお，疲労損傷が検出された場合の照査については，6.3 節を参考にするとよい．

新設鋼構造物の疲労照査と既設構造物の疲労照査の違いは，疲労（設計）荷重の確度である．すなわち，新設構造物では疲労設計荷重をさまざまな仮定に基づいて定めなければならないのに対し，既設構造物では実際に作用している荷重を測定できることである．一般に，新設構造物の設計では，荷重の不確実さから実際よりも大きく，またその頻度も実際よりも多く設定されることが多い．したがって，疲労設計荷重を用いて既設構造物の疲労安全照査を行うと，安全側すぎる結果が得られる恐れが高い．

既設構造物では，実際に応力範囲頻度分布を測定することも可能である．また，設計段階では明確ではない溶接部の品質を確認できることも既設構造物の特徴であり，疲労強度等級の選定に役立つこともある．

既設構造物の疲労照査としては，以下の３段階の方法が考えられる．その流れを図解 6.1 に示す．



図解 6.1　既設構造物の疲労照査の手順

(1)　疲労設計荷重を用いる方法

第2章に従って，対象とする構造物に適用すべき疲労設計荷重を定める．3.1節に示した方法で，疲労設計荷重による応力範囲とその頻度（応力範囲頻度分布）を求める．対象とする部位の疲労強度を表3.4に従って定める．その後，3.3節に従って疲労照査を行う．

(2)　実測結果に基づいた疲労荷重を用いる方法

構造物に作用する荷重を測定し，その結果に基づいて疲労荷重を定める．その際，測定期間をいかに定めるかが重要となる．橋梁では，3日間あるいは1週間などが提案されている．また，供用開始から現時点までの荷重が，現時点での測定結果と異なると予想される場合には，適切な方法で疲労荷重を補正するのが望ましい．現時点以降の疲労荷重についても同様である．その他は，疲労設計荷重を用いる方法と同じである．

(3)　応力範囲頻度分布測定結果を用いる方法

既設構造物では，直接応力範囲頻度分布を測定することが可能である．これを用いることにより，より精度の高い疲労照査が可能となる．応力範囲頻度分布の測定期間については，前項と同じである．また，供用開始から現時点までの，そして現時点以降の応力範囲頻度分布が，測定した応力範囲頻度分布と異なると予想される場合には，適切な方法で補正するのが望ましい．その他は，疲労設計荷重を用いる方法と同じである．

公称応力を求めるためのひずみセンサーの貼付位置にも注意する必要がある．例えば，溶接止端のごく近傍（例えば，5 mm）にひずみセンサーを取り付けた場合には，応力集中の影響で公称応力とみなされるものよりも，高い応力が測定される恐れが高い．この場合には，過度に安全側の疲労照査となる．対象継手に作用する主応力の方向が溶接ビードに対して，大きく傾くことが想定される場合には，3軸ゲージを用いて，応力測定を行う必要がある．ひずみゲージ位置の応力と着目位置の応力の関係が明らかな場合には，それを利用することも考えられる．

対象とする継手の形状が複雑な場合や複雑な応力状態にある場合には，公称応力を測定することは困難である．そのような場合には，4.2節のホットスポット応力を求めるための参照点の応力をひずみゲージで測定することで，疲労安全性を照査することができる．ひずみゲージにより参照点の応力を測定する際の留意点や用いるべき疲労強度等級については，第4章に示されている．

第3章で示したように，疲労照査は，設計供用期間内に着目部に生じる応力の変動履歴を応力範囲頻度分布として捉え，それを着目部の疲労強度と比較することにより行われる．式(解3.1)を書き直すと，疲労照査式（安全係数を考慮しない）として以下の式が得られる．

$$D = \Sigma \frac{n_i}{N_i} = \frac{\Sigma\left(\Delta\sigma_i^3 \cdot n_i\right)}{C_0} \leq 1 \qquad \text{(解 6.1)}$$

$\Delta\sigma_i$：応力範囲頻度分布を構成する応力範囲成分

n_i：$\Delta\sigma_i$ の頻度

N_i：$\Delta\sigma_i$ のみが作用した場合の疲労寿命

C_0：疲労強度等級を表すための定数

$\Delta\sigma$：応力範囲

N：疲労寿命

式(解6.1)は，$\Sigma\left(\Delta\sigma_i^3 \cdot n_i\right)$ と C_0 を比較することにより疲労照査が行われることを意味している．

設計例

設計例 A　道路橋

- 設計例 A-1　3 径間連続非合成 I 桁橋（多主桁形式）
- 設計例 A-2　3 径間連続合成 2 主 I 桁橋（少数主桁形式）
- 設計例 A-3　3 径間連続非合成 2 主箱桁橋

設計例 B　鉄道橋（下路トラス橋）

設計例 C　クレーン構造物

- 設計例 C-1　アンローダ・バックステイ
- 設計例 C-2　天井クレーン走行桁
- 設計例 C-3　クラブトロリー式天井クレーンガーダー

設計例 D　船舶（ばら積み貨物船）

設計例 E　海洋構造物（大型浮体空港）

設計例 F　圧力容器（疲労き裂進展評価）

設計例 G　鉄道車両の台車枠

設計例 H　補修・補強（道路橋）

設計例 A　道路橋

1. はじめに

(1)　照査対象

疲労照査の対象は，比較的大型車交通量の多い 2 車線の道路橋とした．構造形式は，多主 I 桁橋（A–1），少数主桁橋（A–2），箱桁橋（A–3）の 3 種類である．

(2)　照査要領

実際の疲労照査はすべての断面について行う必要があるが，いくつかの代表的な断面のみを例にとった．照査方法は公称応力を用いた疲労照査とし，一定振幅応力に対する応力範囲の打切り限界に対する簡便な疲労照査を行い，照査式を満足しなかった場合について，累積疲労損傷比を用いた疲労照査を行う．

(3)　照査範囲

本例では，疲労損傷により構造的な問題が大きくなる主桁に着目し，そこに含まれるいくつかの継手を対象として疲労照査を行う．

2. 設計荷重

鋼道路橋の疲労設計指針[1]では，代表荷重として T 荷重（図 A.1）を用いることとしている．そして，疲労設計に T 荷重を用いるにあたり，実測された最大重量の大きさや 1 軸と多軸の交通車両の差異，複数の車両が同時に載荷されることによる応力の増分を考慮するための係数として，活荷重補正係数 γ_T が示されている．道路橋の設計例としてとりあげる 3 橋は，支間長の等しい 3 径間連続梁であるため，活荷重補正係数 γ_T の値は同一であり，以下のように算出される．

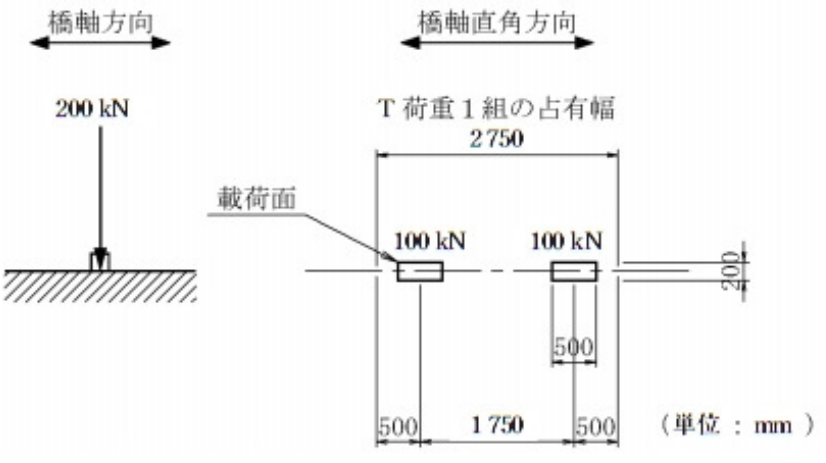


図 A.1　代表荷重単位