鋼構造物の設計 (2)

1.2 構造部材の形と力学的な考察

・構造物、構造部材の形は
力学的に決まるもの

・構造力学＋構造材料＝
構造物の形状と
構造部材の断面形状

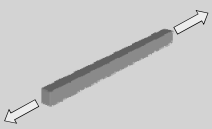
Eiffel Tower (1889)

構造部材の力学

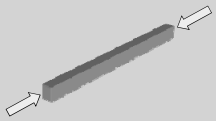
構造部材に作用する力

Types of Forces in Structural Components

引張 Tension



圧縮 Compression



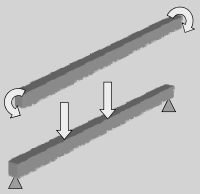
作用する力は複雑
支配的な力に対して部材耐力を決める。これが断面設計

構造部材に作用する力

Types of Forces in Structural Components

引張 Tension　Or　圧縮 Compression

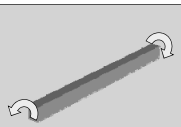
曲げ Bending



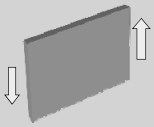
構造部材に作用する力

Types of Forces in Structural Components

ねじれ Torsion



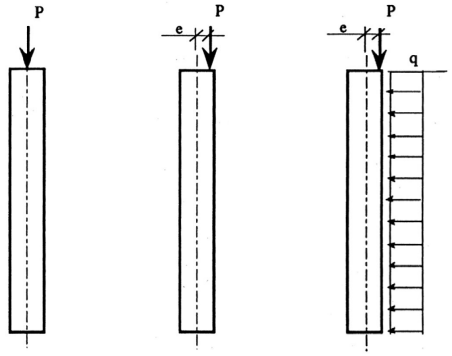
せん断 Shear



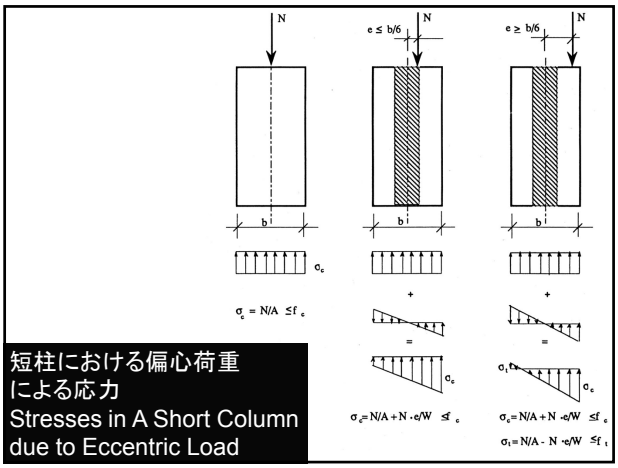
引張 or 圧縮　+ 曲げ + せん断 + ねじれ

柱部材における偏心荷重

A Column with Eccentric Load

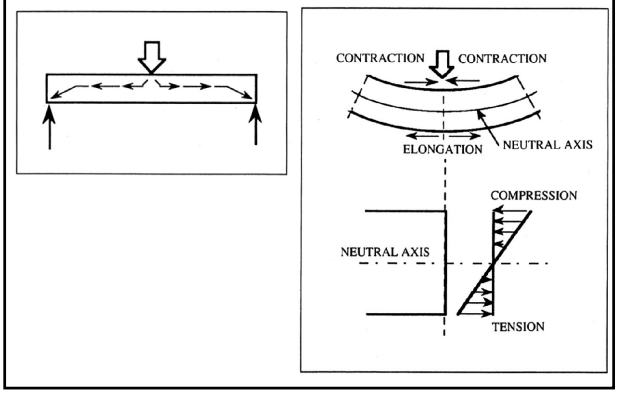


Concentric Load　Eccentric Load　Eccentric Load + Bending



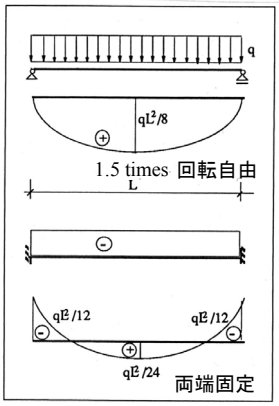
短柱における偏心荷重による応力
Stresses in A Short Column due to Eccentric Load

はりの曲げ　Bending of A Beam Element



分布荷重を受けるはり 境界条件の影響

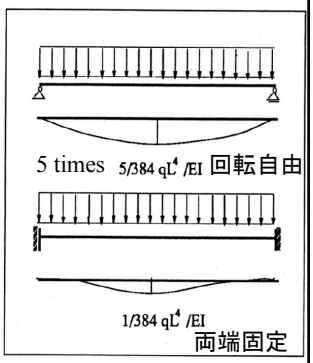
A Beam with distributed Load with Various Boundary Conditions



Bending-Moment-Diagram

分布荷重を受けるはり境界条件の影響

A Beam with distributed Load with Various Boundary Conditions

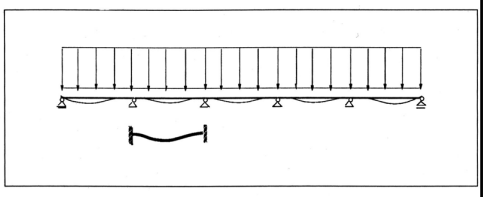


Deflection

分布荷重を受ける多径間連続はり 境界条件の影響

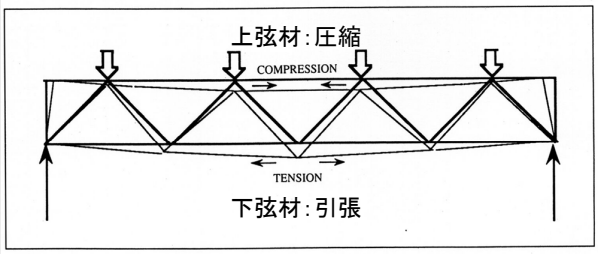
A Continuous Multi-Span Beam with distributed Loads

Continuous beam over several equal spans. With uniformly distributed load over the whole beam, an inner span will be prevented from rotating at the ends. These will therefore be subjected to bending moments equal to the beam with two fixed ends.



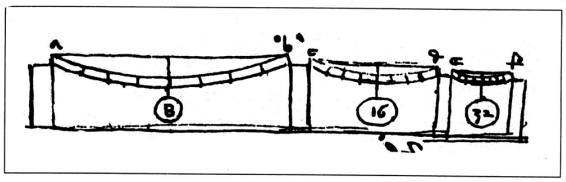
単純支持されたトラス

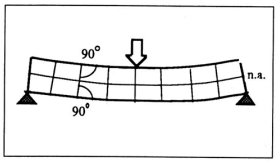
A simply supported truss structure



トラス桁（Truss）⇔ プレートガーダー（girder）
応力の流れは同様

Leonardo da Vinciによるはり耐力の考え方





Perpendicular cross sections of the beam will also be perpendicular after the beam is bent.

力学的に形状が決定される構造例(1)

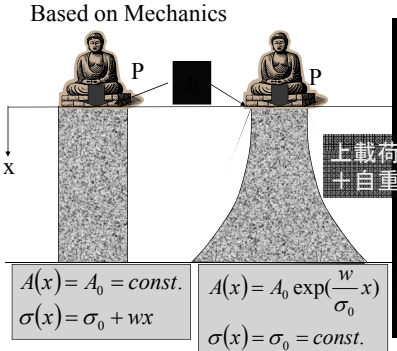
Determination of Shapes of Structural Components
Based on Mechanics

Eiffel Tower (1889)

Tokyo Tower

力学的に形状が決定される構造例(1)

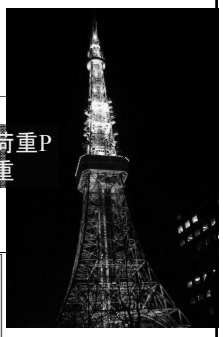
Determination of Shapes of Structural Components
Based on Mechanics



$A(x) = A_0 = const.$
$\sigma(x) = \sigma_0 + wx$

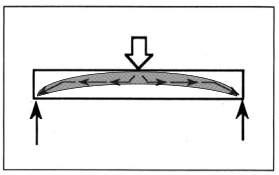
$A(x) = A_0 \exp(\frac{w}{\sigma_0} x)$
$\sigma(x) = \sigma_0 = const.$

このような形を自然に学んだ


Tokyo Tower

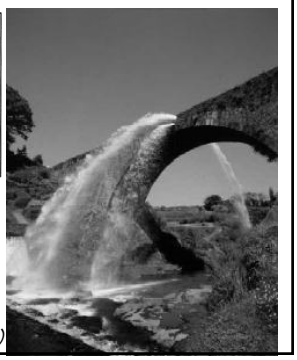
力学的に形状が決定される構造例(3)

Determination of Shapes of Structural Components
Based on Mechanics



アーチ構造，ドーム構造

石造で長スパンを考えると
アーチになる

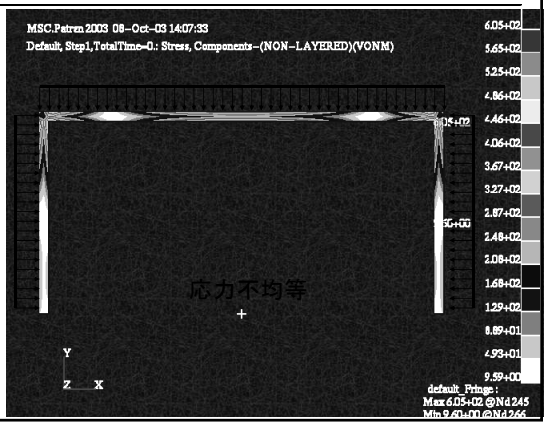

通潤橋(1854)

力学的に形状が決定される構造例(2)

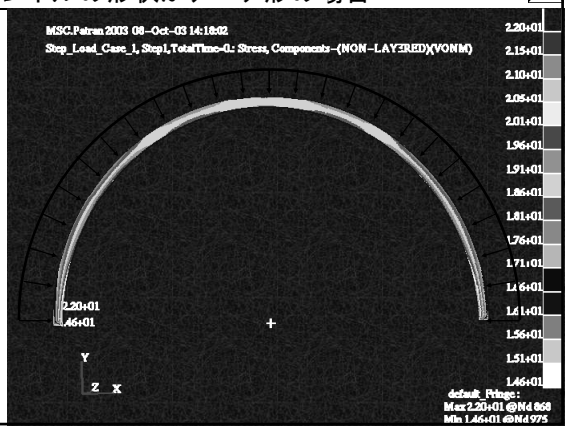
Determination of Shapes of Structural Components
Based on Mechanics

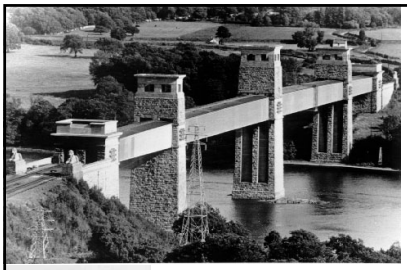
Tunnel

トンネルの形状が箱形だったら・・・

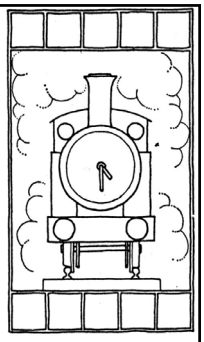


トンネルの形状がアーチ形の場合



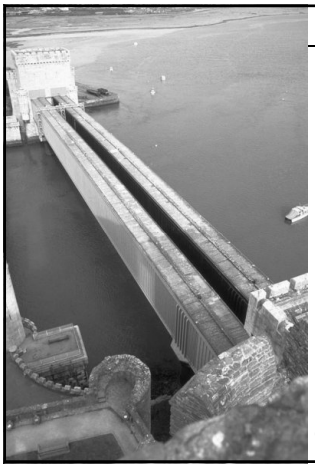


Britannia Bridge



Britannia bridge: tubular box beam.

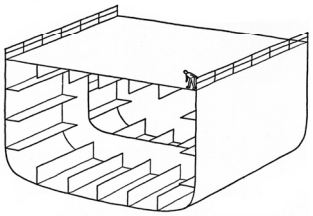
たわみをおさえるために桁高が大きくなり，
吊橋 → 箱断面桁橋



Conway Bridge

日本丸

- ■総トン数／21,903トン
- ■全長／166.6m
- ■全幅／24.0m
- ■客室数／202室
- ■乗客数／600名
- ■就航年：1990年



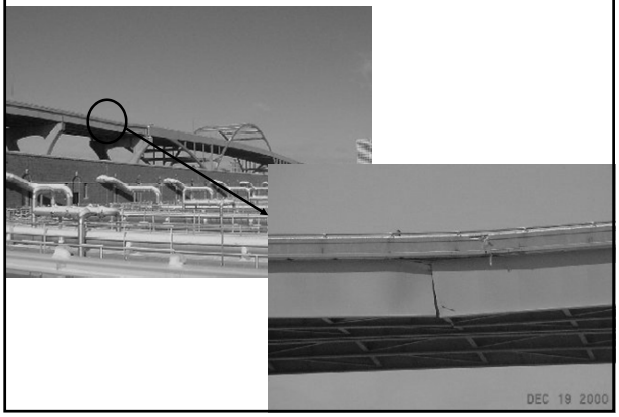
Engineering shell structures such as ships and aircraft generally use both stringers and ribs or bulkheads. This is a diagram of the Isherwood construction often used in oil tankers.

断面の構成は
箱断面の桁橋と同じ

1.3 鋼構造物の限界状態と破壊事例

1940 Tacoma Narrows Bridge Collapse
失敗の積み重ねにより工学は進歩
http://www.enm.bris.ac.uk/research/nonlinear/tacoma/

2000 Brittle Fracture In Hoan Bridge

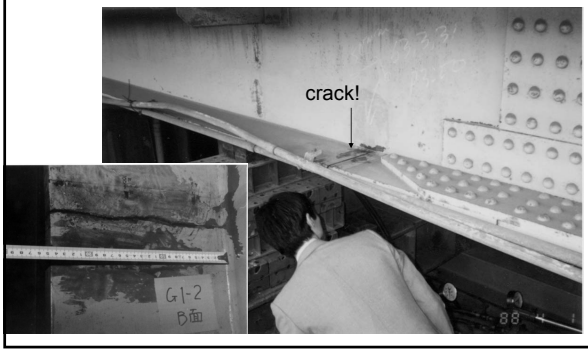


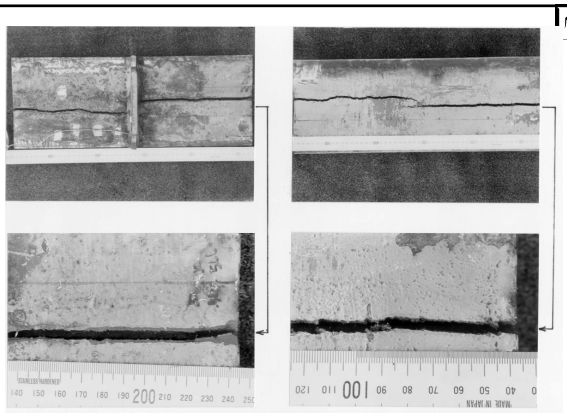
損傷事例と原因

- Yielding
  - Material Properties
- Structural Instability
  - Vibration induced by wind or pedestrian
  - Unexpected lateral movement during erection
  - Buckling
- Fracture
  - Fatigue
  - Earthquakes

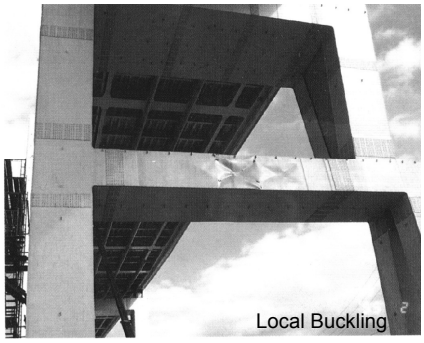
Fatigue and Fracture

Imperfect butt-welding of bottom flanges





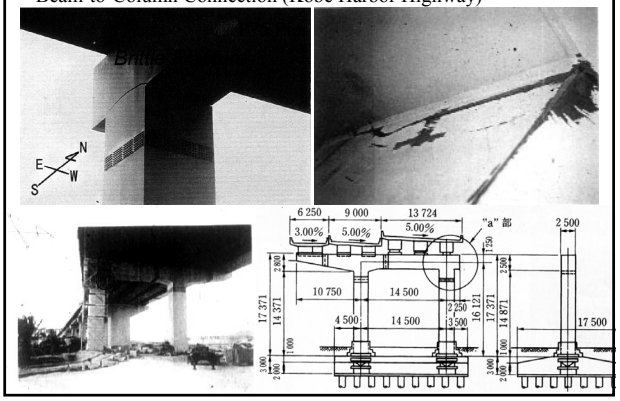
Damage Cases in Hyogo-ken Nanbu Earthquake



Damage Cases in Hyogo-ken Nanbu Earthquake

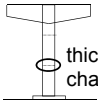
Damage Cases in Hyogo-ken Nanbu Earthquake

Beam-to-Column Connection (Kobe Harbor Highway)



Damage Cases in Hyogo-ken Nanbu Earthquake

3. Circular Pier

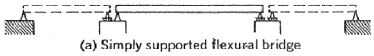


⇒Material Tests

1. 橋の形式 Bridge Types

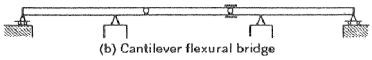
(1) 単純桁 Simply Supported flexural bridge

- 最も単純な形式
- 圧延部材，圧延部材+カバープレート
- プレートガーダ，ボックスガーダ



(2) カンチレバー桁 Cantilever flexural bridge

- 二径間以上，主桁に回転自由なヒンジを入れ静定化



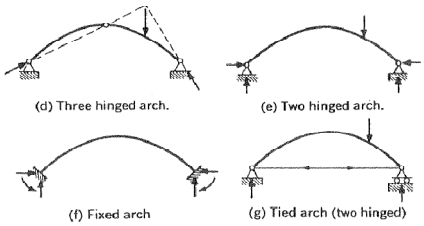
(3) 連続桁 Continuous girder bridge

- 二径間以上，不静定構造
- 剛性高い

1. 橋の形式 Bridge Types

(4) アーチ橋 Arch bridge

- 石造，コンクリート，鋼
- アーチ部は圧縮力が支配的

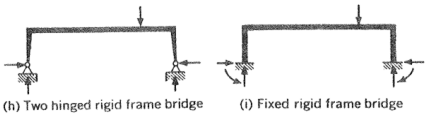


以上のほか，アーチ系の橋として
ランガー橋，ローゼ橋

1. 橋の形式 Bridge Types

(5) ラーメン橋 Rigid frame bridge

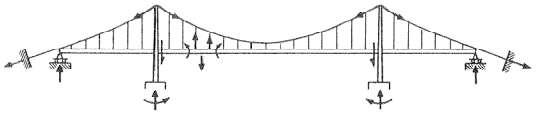
- 不静定次数の高い構造

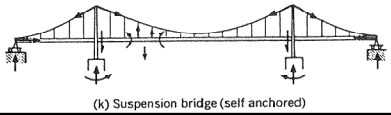


1. 橋の形式 Bridge Types

(6) 吊橋 Suspension bridge

- 長径間の橋
- ケーブルが最重要，桁はハンガーでケーブルに吊られている
- 無補剛(中，小吊橋) 補剛

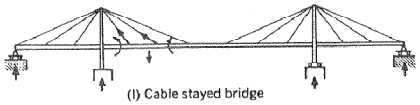




1. 橋の形式 Bridge Types

(7) 斜張橋 Cable stayed bridge

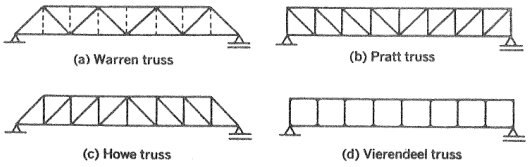
- 新しい形式
- 桁をケーブルで支持



1. 橋の形式　Bridge Types

(8) トラス構造　Truss

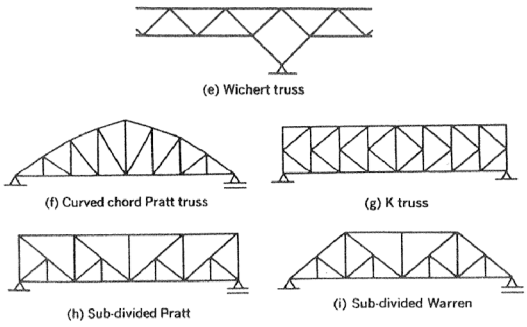
- トラス構造の橋への最初の応用は木橋
  (引張部材のみ鋳鉄棒，あるいは鋼棒)
- 斜材の組みかたにより種々の形式
- 単純桁，ゲルバー桁，連続桁，アーチ橋，吊橋，斜張橋



次スライドに続く

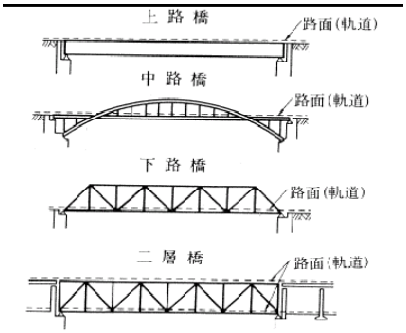
1. 橋の形式　Bridge Types

(8) トラス構造(続き)　Truss (Continued)



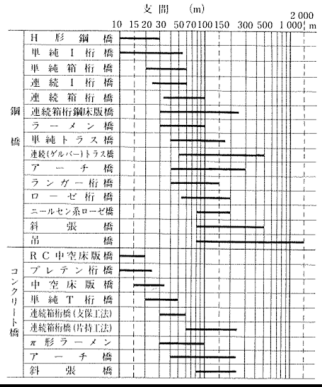
1. 橋の形式　Bridge Types

(9) 橋の走行位置による分類
Classification of bridges by deck position

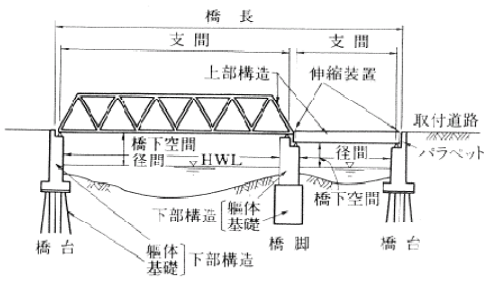


2. 橋梁形式別適用支間

Normal ranges of span length by bridge type

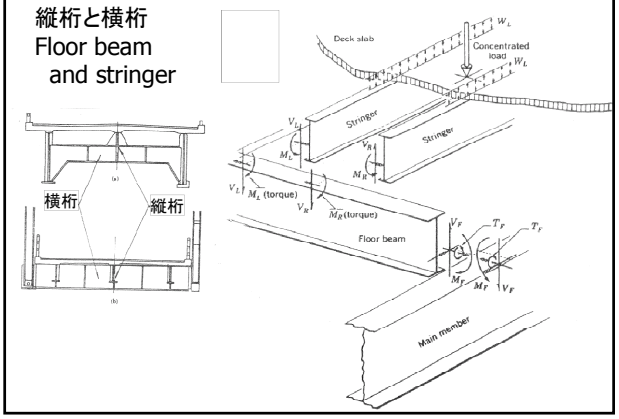


3. 橋梁各部の名称



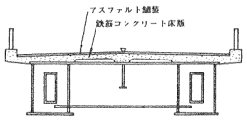
3. 橋梁各部の名称

縦桁と横桁
Floor beam
and stringer



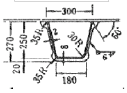
3. 橋梁各部の名称

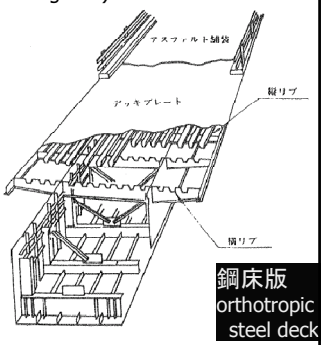
床版の構造(箱桁の例)
Orthotropic steel deck (Ex. of box girder)



鉄筋コンクリート床版
RC deck

縦リブの例





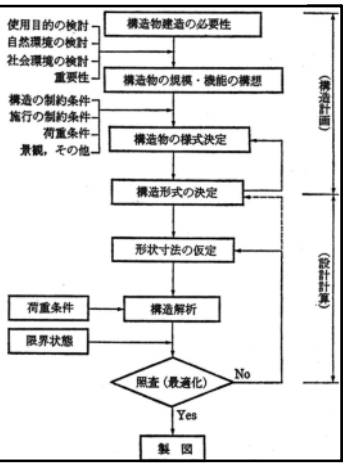
鋼床版
orthotropic steel deck

鋼構造物の設計 (4)

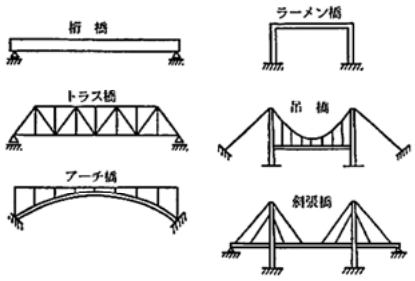
安全性の照査

許容応力設計法
限界状態設計法

構造設計のプロセス
Process of Structure Design



構造形式の決定（橋梁の例）



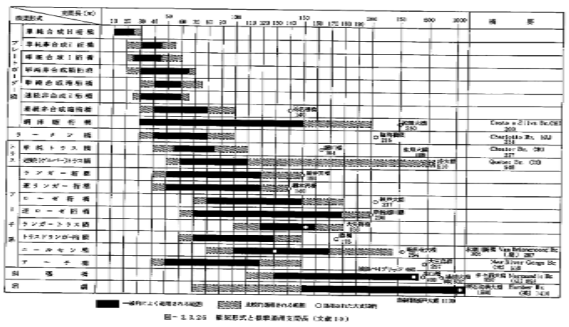
出典:「日本橋梁建設協会HP」

出典:「日本橋梁建設協会HP」

出典:「日本橋梁建設協会HP」

橋梁形式と標準適用支間長

出典:「鋼橋の概要　平成6年4月 ((社)日本橋梁建設協会)」



荷重条件 (道路橋の場合)

・主荷重
　死荷重，活荷重，衝撃　等
・従荷重
　風荷重，地震の影響　等
・主荷重に相当する特殊荷重
　雪荷重　等
・従荷重に相当する特殊荷重
　施工時荷重

道路橋の設計活荷重

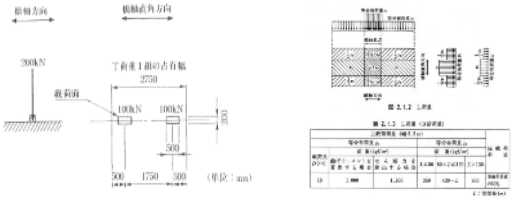


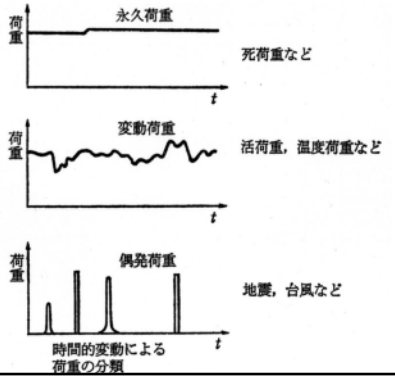
図-2.2.1　T荷重

T荷重：主に床版，床組の設計に使用

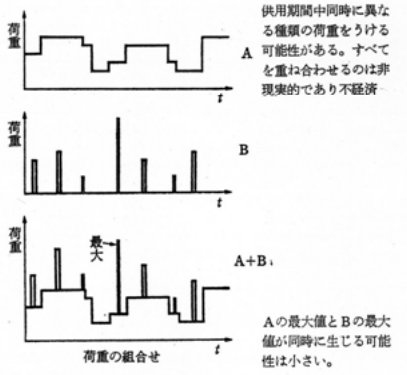
L荷重：主に主げたの設計に使用

発生確率による荷重の分類

Classification of Loads based on Probability



荷重の組み合わせ Combination of Loads



荷重の組み合わせ照査の必要性

Necessity of Verification of Effects of Loads Combination

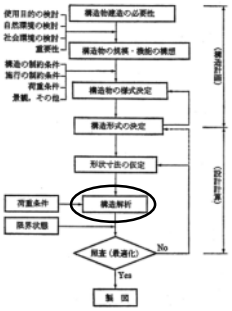
荷重組合せ照査の必要度の目安

	永久荷重	変動荷重	偶発荷重
永久荷重	○	○	○
変動荷重	○	○	△
偶発荷重	○	△	×

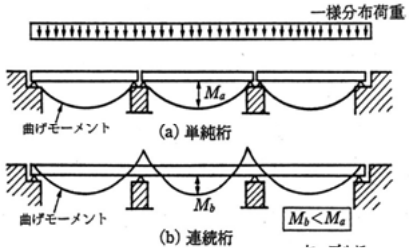
表-3.3.1　許容応力度の割増し係数

荷重の組合せ	割増し係数
(1) 主荷重(P)＋主荷重に相当する特殊荷重(PP)	1.00
(2) 主荷重(P)＋主荷重に相当する特殊荷重(PP)＋温度変化の影響(T)	1.15
(3) 主荷重(P)＋主荷重に相当する特殊荷重(PP)＋風荷重(W)	1.25
(4) 主荷重(P)＋主荷重に相当する特殊荷重(PP)＋温度変化の影響(T)＋風荷重(W)	1.35
(5) 主荷重(P)＋主荷重に相当する特殊荷重(PP)＋制動荷重(BK)	1.25
(6) 主荷重(P)＋主荷重に相当する特殊荷重(PP)＋衝突荷重(CO)	
鋼部材に対して	1.70
鉄筋コンクリート部材に対して	1.50
(7) 活荷重及び衝撃以外の主荷重＋地震の影響(EQ)	1.50
(8) 風荷重(W)	1.20
(9) 制動荷重(BK)	1.20
(10) 施工時荷重(ER)	1.25

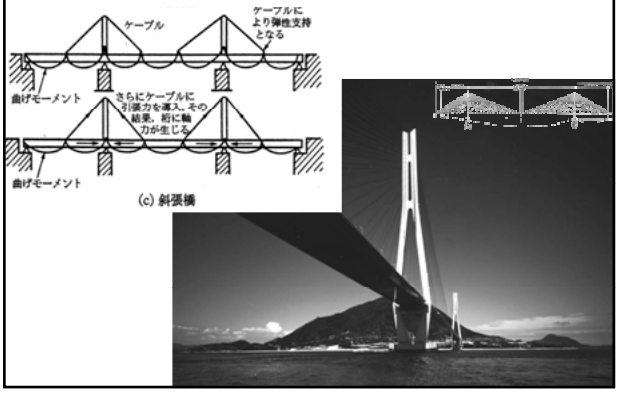
構造計算（荷重により生じる断面力および応力）



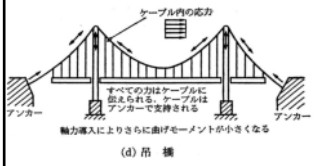
荷重により生じる断面力および応力
Sectional Forces and Stresses due to Loads

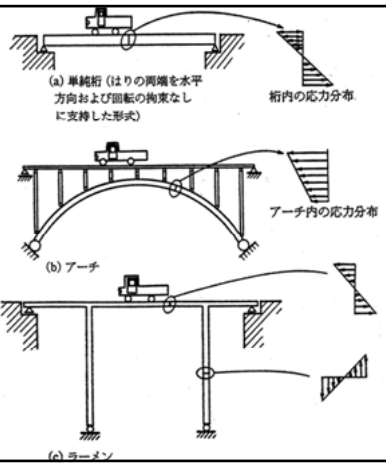


荷重により生じる断面力および応力
Sectional Forces and Stresses due to Loads



荷重により生じる断面力および応力
Sectional Forces and Stresses due to Loads





限界状態

限界状態

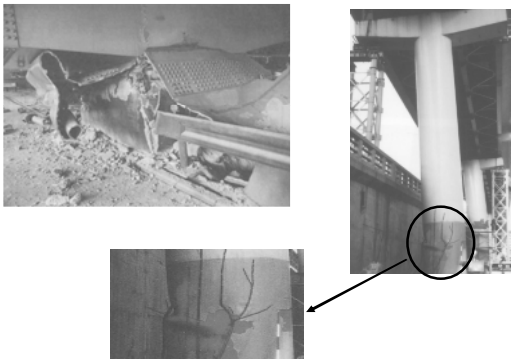
鋼構造物の限界状態の例
（基準等によって定義が若干異なる場合がある）
- ・終局限界状態
- ・使用限界状態
- ・疲労限界状態
- ・（修復限界状態）

終局限界状態

構造物，部材の最大耐力を示す状態
（例）
- ・構造物が転倒，滑動などにより安定を失う
- ・脆性破壊や延性破壊などにより破断する
- ・座屈により耐力を失う

兵庫県南部地震による被害

出典：「阪神高速道路　資料」



腐食による鋼材の破断

出典：「国土交通省HP」

使用限界状態

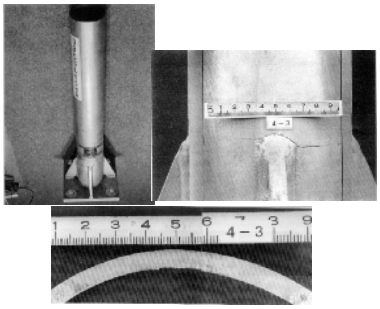
構造物を十分安全に使用するために必要な変形などの条件が満たされなくなる状態
（例）
- ・正常な状態で使用するには変位が過大
- ・振動が過大で不安の念をいただかせる
  （歩道の不快な振動）

疲労限界状態

交通荷重，波浪，風等の繰返し外力により疲労亀裂が進展する状態

設計段階での照査に加えて，維持で最も重要なチェック項目

疲労損傷の例



安全性の評価（照査）

安全性の評価（照査）

安全性の評価

外力作用（S）＜抵抗（R）

（抵抗の不確実さ）

・材料強度のばらつき，断面寸法の誤差　等

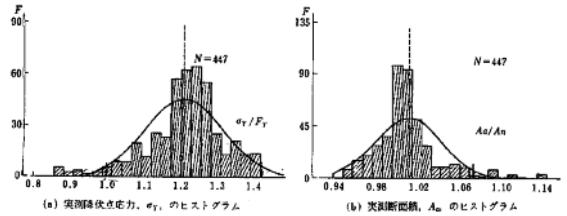
（外力作用の不確実さ）

・多くの設計荷重は外力作用を単純化，モデル化したもの

・設計荷重以上の荷重が絶対に来ない保証はない

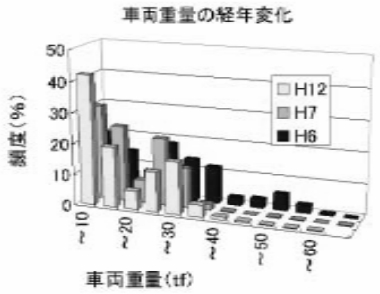
抵抗の不確実さの例

出典：「土木学会 座屈設計ガイドライン」



外力作用の不確実さの例（車両重量）

出典：「国土交通省　資料」



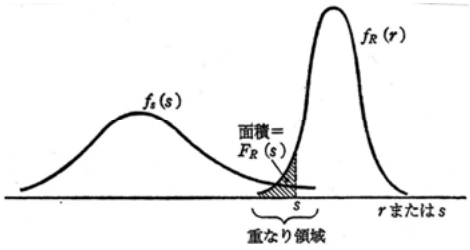
安全性評価に用いられる手法

許容応力度法

限界状態設計法

確立論に基づく信頼性理論

信頼性理論による破壊確率の算出（レベルIII）
Calculation of Fracture Probability

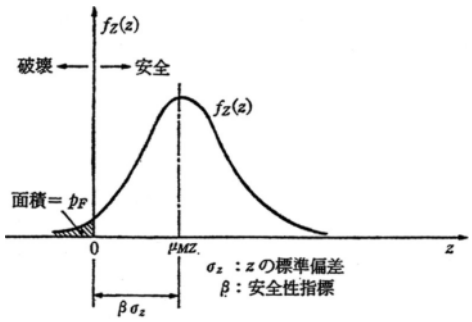


$$p_f = P(R<S) = \Sigma P(R<S \mid S=s)\cdot P(S=s)$$

もし R と S が統計的に独立ならば

$$p_f = \int_0^\infty F_R(s) f_s(s)\, ds$$

破壊確率と安全性の指標（レベルII）
Fracture Probability and Safety Index



許容応力度設計法

道路橋の設計法

設計荷重から計算される応力度の総和σが材料に対して規定された許容応力度σ_aを超えないようにすることで安全性を照査

$$\sum_{i=1}^{n}\sigma_i = \sigma < \sigma_a = \frac{\sigma_k}{\gamma}$$

許容応力度設計法

許容応力度

$$\sigma_a = \frac{\sigma_k}{\gamma}$$

材料の基準強度（降伏強度）の公称値.

（例:16<板厚t(mm)≦40）

・SM490: 315MPa

・SM570: 450MPa

γ ：安全率

材料強度のばらつき，部材に生じる応力変動，構造物の安全性のレベル．道路橋示方書の場合，γ=1.7が多い．

限界状態設計法（部分係数設計法）

・鉄道橋の設計法

・部分安全係数を考慮

・各限界状態において設計断面耐力と作用力とを比較

・材料強度の特性値f_kと荷重の特性値F_kが基本

・最終的な照査は，構造物係数 γ_iを設定して下記により実施

$$\frac{R_d}{S_d} \geq \gamma_i$$

照査法の例（土木学会：鋼・合成構造標準示方書）

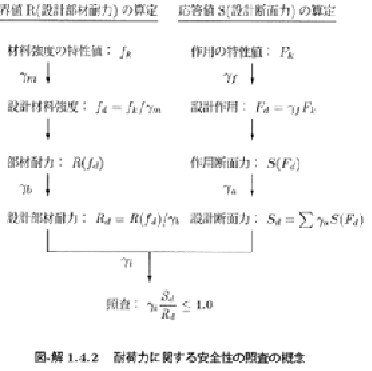


図-解 1.4.2 耐荷力に関する安全性の照査の概念

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} \le 1.0$$

$$\gamma_i \frac{\sum \gamma_a \cdot S(\gamma_f \cdot F_k)}{R(f_k/\gamma_m)/\gamma_b} \le 1.0$$

R_d ：設計限界値
f_k ：材料強度の特性値
γ_m ：材料係数
γ_b ：部材係数
$R(\cdot)$ ：材料強度から構造物の限界値を算出するための関数
S_d ：設計応答値
F_k ：個々の作用の特性値
γ_a ：構造解析係数
γ_f ：個々の作用に対する作用係数
$S(\cdot)$ ：作用から構造物の応答値を算出するための関数
γ_i ：構造物係数

部分係数：設計の不確実性を考慮して，各設計変数に割り当てられた係数であり，作用係数，材料係数，構造解析係数，部材係数，および構造物係数の５つの係数．
構造物係数：構造物の重要度，限界状態に達した際の社会的・経済的影響など考慮するための係数．
構造解析係数：断面力などを算定するのに用いる構造解析手法の不確実性，構造物のモデル化の不確からしさなどを考慮するための係数．
材料係数：材料強度の特性値からの望ましくない方向への変動，供試体と構造物中との材料特性の差異，材料特性が限界状態に及ぼす影響，材料特性の経時変化などを考慮するための係数．
部材係数：部材耐力算定上の不確実性，部材寸法のばらつきの影響，部材の重要度などを考慮するための係数．
作用係数：作用の特性値からの望ましくない方向への変動，作用の算定方法の不確実性，設計耐用期間中の作用の変化，作用の特性が限界状態に及ぼす影響，環境作用の変動等を考慮するための係数．

限界状態設計法

鉄道橋では

材料の特性値 f_k：通常保証できる強度（降伏強度）の下限値（公称値）

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

$\gamma_m = 1.05$

：構造用鋼材の引張応力に対する材料係数（「鉄道構造物等設計標準・同解説　鋼・合成構造物」の場合）

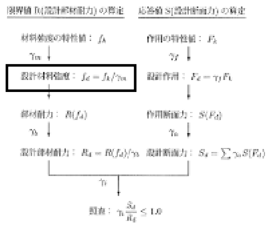
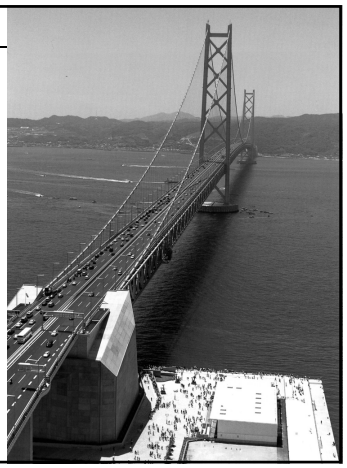


図-解 1.4.2　耐荷力に関する安全性の照査の概念

鋼構造物の設計 (5)

鉄と鋼
鋼材の力学的性質

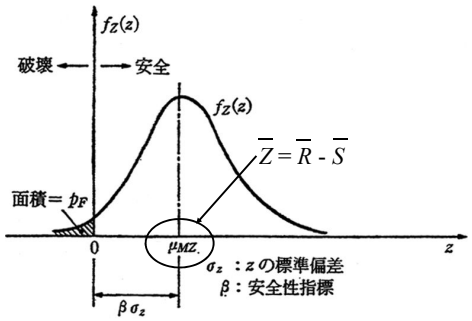
教科書第2章，3章
を精読すること



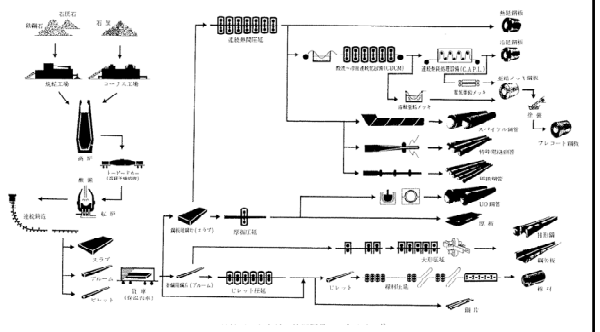
明石海峡大橋

破壊確率と安全性の指標（レベルⅡ）

Fracture Probability and Safety Index



2.1 鋼の製造



教科書，p18，図-2.1

2.2 組織と状態

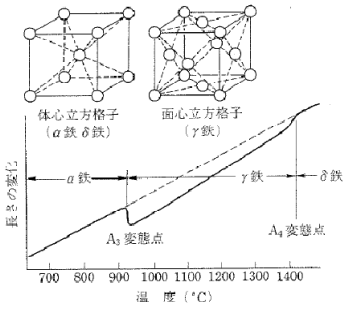


図 2.5 純鉄の膨張曲線と結晶格子の変化[4]

教科書，p21，図-2.5

2.3 添加元素，残留元素

表 2.1 添加元素の影響[4]

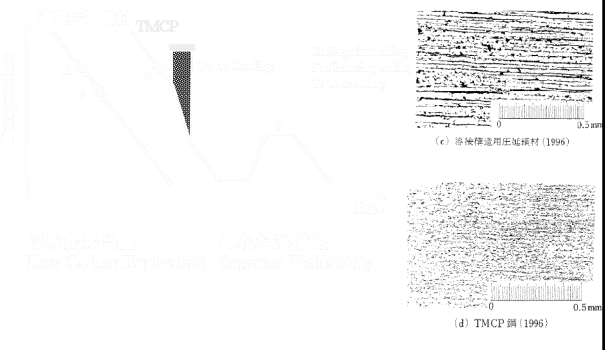
マンガン	Mn	強度，硬度が増し，伸び，絞りが減る．硫黄によるぜい化を防止する．
シリコン	Si	強度を高めるが，限度を超えるともろくなる．耐熱性を高める．
リン	P	もろくなる．耐食性を高める．偏析する傾向があり，注意を要する．溶接割れの原因．
硫黄	S	赤熱状態でもろくする（赤熱ぜい性）．偏析する傾向がある．
アルミニウム	Al	脱酸および組織の微細化に効果．それにより強度特性向上．
ニッケル	Ni	鋼に粘り強さを与える．耐食性・耐熱性を大きくする．→ステンレス鋼．
クロム	Cr	Niと近い作用．→ステンレス鋼．
モリブデン	Mo	高温での強さを増す．
銅	Cu	大気中での耐食性を増す．→耐候性．引張強さ，硬さを高めるが，延性を損なう．
タングステン	W	硬さ，耐摩耗性を向上．高温での強さを増す．

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}\left(+\frac{Cu}{13}\right) \quad (2.1)$$

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2.2)$$

教科書，p22-23，表-2.1，式(2.1)，(2．2)

TMCP (Thermo Mechanical Control Process) Steel

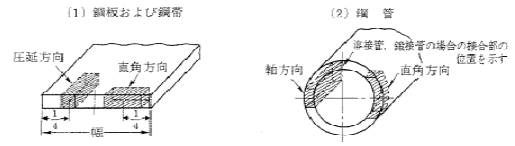


教科書，p25，図-2.7

3.1試験の規格

JIS
試験片の採取位置と試験結果のばらつき、信頼性

JIS G 0303 ：鋼材の検査通則
Z 2201 ：金属材料引張試験片
Z 2241 ：金属材料引張試験方法
Z 2202 ：金属材料衝撃試験片
Z 2242 ：金属材料衝撃試験方法
Z 2204 ：金属材料曲げ試験片
Z 2243 ：ブリネル硬さ試験方法
Z 2244 ：ビッカース硬さ試験方法



教科書，p.27-28，表，図-3.1

3.2 破壊の様式

延性――脆性
粒界と粒内

- 延性破壊
- 脆性破壊
- 疲労
- 遅れ破壊
- クリープ

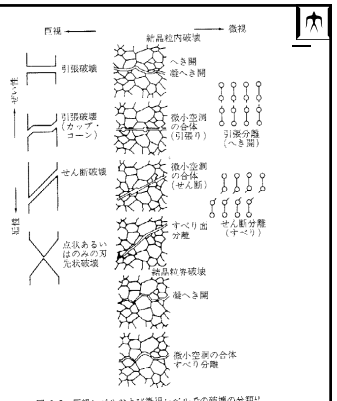
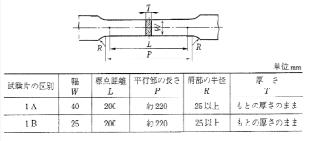


図 3.2 巨視レベルおよび微視レベルでの破壊の分類[1]

教科書，p29，図-3.2

3.3 鋼材の引張特性

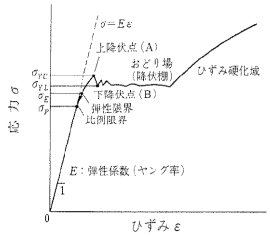
- 公称応力―公称ひずみ曲線
- 弾性係数、ヤング率
- 上降伏点と下降伏点



単位 mm

試験片の区別	幅 W	標点距離 L	平行部の長さ P	肩部の半径 R	厚 さ t
1A	40	200	約 220	25以上	もとの厚さのまま
1B	25	200	約 220	25以上	もとの厚さのまま

(a) 1号試験片



(b) ひずみの小さい領域

教科書，p31，図-3.3

教科書，p32，図-3.5

- 破断伸び
- 絞り

$$\delta=\left(\frac{l-l_0}{l_0}\right)\times 100 \quad (\%) \qquad (3.17)$$

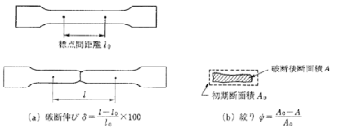


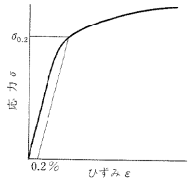
図 3.13 破断伸びと絞り

また，破断後の最小断面積から求められる絞り ϕ も伸び能力の尺度に用いられる．

$$\phi=\left(\frac{A-A_0}{A_0}\right)\times 100 \quad (\%) \qquad (3.18)$$

教科書，p38，式(3.17)，(3.18)

- 降伏点が明確でない場合
- 除荷－再載荷
- くびれの発生と伸びの分布，一様伸び



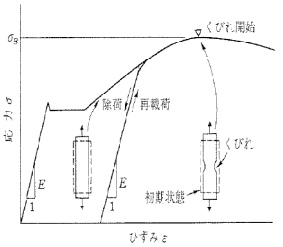
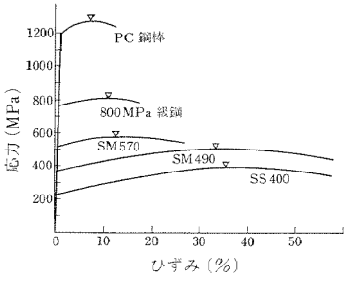


図 3.6 0.2%耐力（降伏点が明確に現れない場合）

教科書，p33，図-3.6，図-3.7

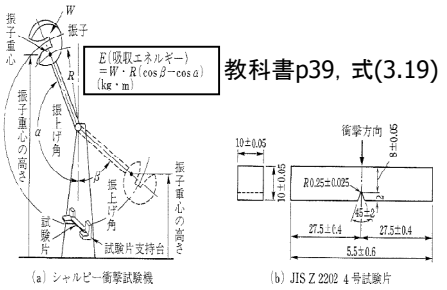


(a) 公称応力－公称ひずみ関係

教科書，p32，図-3.5

3.4 衝撃強さ

Charpy（シャルピー） 衝撃試験



教科書p39，式(3.19)

(a) シャルピー衝撃試験機　(b) JIS Z 2202 4号試験片

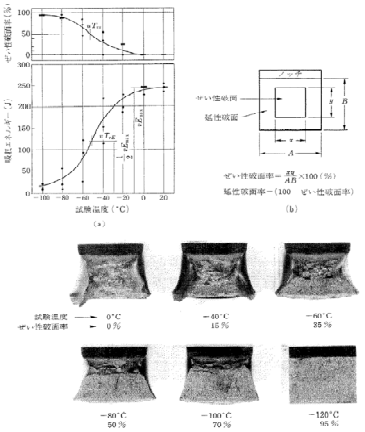
図 3.14 シャルピー衝撃試験

教科書，p39，図-3.14

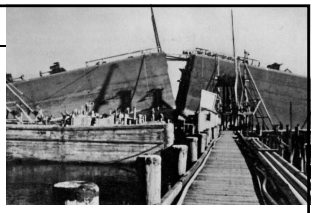
3.4 衝撃強さ

脆性破面率，遷移温度

教科書，p40，図-3.15



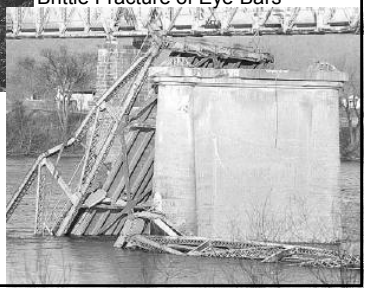
第2次世界大戦中のアクシデント



戦時Liberty 船、T-2Tankerの事故
5000建造、
1946年までに1,000隻にかなりの亀裂
1942-1952年　200隻破壊の可能性
最低　　９のT-2Tankers
　　７のLiberty船が破壊

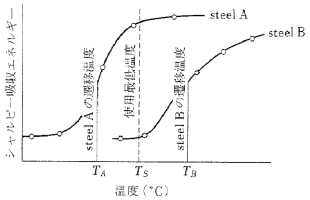
Point-Pleasant Bridge

At 5:00 PM on December 15, 1967
Overload due to Christmas Rush
Brittle Fracture of Eye Bars



脆性破壊防止設計

・15ftlb、20ftlb、25ftlb、35ftlb
・鋼材規格のA,B,C（シャルピー吸収エネルギーで規定）
・遷移温度アプローチ



$T_A < T_S < T_B$ から steel A を採用

図 3.16 遷移温度アプローチ

教科書，p42，図-3.16

(5)疲労

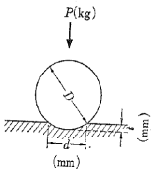
S-N線
Miner則と疲労被害度
Rain Flow法
疲労亀裂の進展
Paris Law

3.6 遅れ破壊

環境誘起破壊
（Environment Assist Cracking）
応力腐食割れ
（Stress Corrosion Cracking:SCC）
　陽極溶解（Anodic Dissolution）
水素脆化（Hydrogen Embrittlement:HE）
　金属内への水素の侵入と移動

3.7 硬さ

・代表的な試験法として，ビッカース硬さ試験，ブルネル硬さ試験，ロックウェル硬さ試験



とする．このときブリネルかたさ H_B は P/(球と試験片の接触面積〔kg/mm²〕) と定める．すなわち

$$H_B = 2P/\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2}) \quad (8\text{-}1)$$

あるいは

$$H_B = P/\pi Dt \quad (8\text{-}2)$$

標準試験としては D が 10 mm，P が 3,000kg を用いる．

出典：須藤一：材料試験法，内田老鶴圃

3.7 硬さ

溶接部（熱影響部）の最高高さと
　溶接われの発生との関係
炭素量

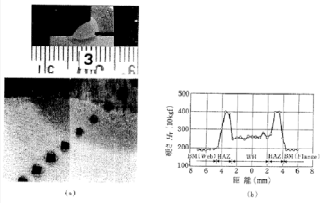


図 3.37 ビッカース硬さ試験によるくぼみと測定例

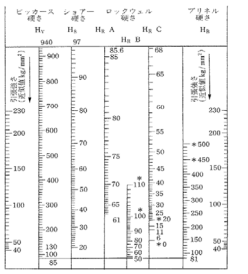


図 3.38 鋼のビッカース硬さに対する近似的換算図表[1]
（本図表中＊のある範囲内の数値はあまり用いられない）

教科書，p56，図-3.37

教科書，p57，図-3.38