



自己紹介

1

S50(1975). 3. 広島大学工学部土木工学科卒業
 S52(1977). 3. 広島大学大学院工学研究科土木工学専攻修了
 S52(1977). 4. 川田工業（株）技術本部
 S54(1979). 4. 広島大学（工学部）
 H29(2017). 3. 広島大学 退職
 H29(2017). 4. 広島大学名誉教授，特任教授
 H30(2018) インフラメンテナンス国民会議「ちゅうごく」フォーラムリーダー
 R1(2019). 10. 広島大学名誉教授
 現在に至る

資 格：工学博士，技術士（建設部門）

専門分野：構造力学，橋梁工学，維持管理工学，鋼構造，複合構造

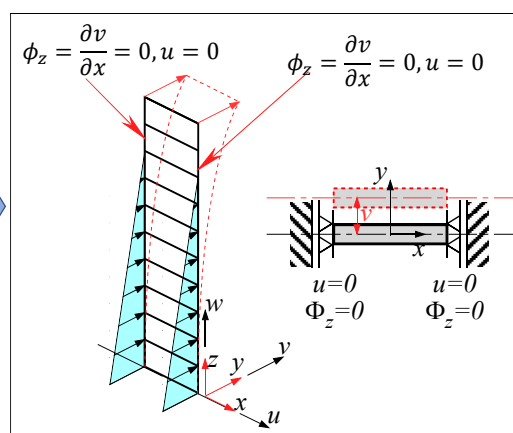
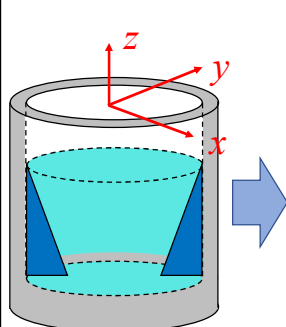
本日の講演内容

1. 構造工学における実現象と理論・解析
2. 曲線桁の有限要素解析と曲げ耐荷力評価
3. 鋼構造物の腐食凹凸表面を再現する
4. 腐食表面生成モデルの将来予測への適用
5. 孔あき鋼板ジベル(PBL)のずれ耐荷力評価

モデル化と境界条件

円筒貯水槽の有限要素解析

問題：貯水槽に静水圧が作用している。RC貯水槽の壁体を設計せよ。



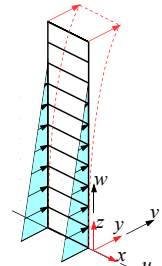
解析方針

- 汎用解析ソフトを用い、弾性FEM解析を行う。
- 水圧を受ける円筒シェル(軸対象問題)だから、対称性を考慮して壁体の一部を解析領域とする。
- 要素分割は、周方向に1分割、母線(z)方向に10分割とする。
- 荷重は、面外方向に内圧に相当する節点外力を与える
- 要素は、4節点6自由度のアイソパラメトリックシェル要素を使用する。
- 境界条件は、軸対称性から、左図のように与える。

さて、上記の解析結果は、正しいでしょうか？

4

円筒貯水槽の有限要素解析



解析は、

- 片持ちはりの解析
- 円筒シェルの周方向膜応力を考慮できない

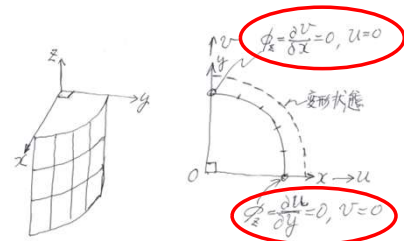
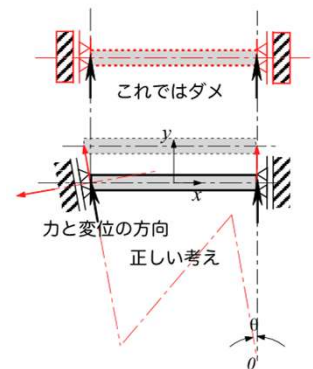
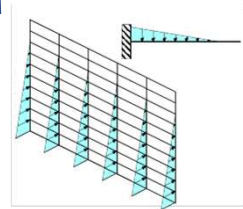
正解を得るためには

- 円筒座標系に基づく(曲率を考慮できる)シェル要素や円筒板要素などを用いる。このとき、**円筒座標系による荷重条件、境界条件**を与える。

あるいは

- 平板要素の場合、**曲率を考慮した境界条件**を与える。(右図のように境界条件を座標変換する)。これは結構めんどうなので・・・

- 周方向に1分割ではなく、**1/4円(半円やシェル全体でもよい)**を解析領域として要素分割する。アイソパラメトリックシェル要素といっても周方向に1分割の場合、平板と同じになる場合がある(シェル要素というものの・・・)



5

釈迦に説法ですが・・・正解を得るためには

- 作用力により構造物がどのように挙動するのかを知っている(よく観察している・経験豊富), あるいは技術や知識を基に実際の挙動をほぼ**正しく推測できる**能力・知識が必要。
 - 解析に当たって、構造物の何を求めたいのかを明確にして**解析手法を選択**する。例えば座屈荷重を求めるのであれば、座屈荷重等を求められる解法が必要。
 - 実際(正解)に近い解を得るための、適する**座標系**, 構造物の**モデル化**, **境界条件**の与え方, **解析理論**等を適正に選択できる能力が必要。
- 有限要素解析について
- 有限要素解析は強力な武器であるが、解析の特性・特徴や**要素の特性**・適用範囲をよく理解しておくことが必要。
 - 解析領域や要素分割, 線形・非線形の選択, **適する要素の選択**, ができる知識や能力が必要。

6

1. 構造工学における実現象と理論・解析

理論とは

科学研究において，個々の現象や事実を統一的に説明し，予測する力をもつ体系的知識。狭義には，明確に定義された概念を用いて定式化された法則や仮説を組み合わせることによって形作られた演繹的体系を指す

解析とは

物事を分析して理論的に明らかにすることにより，その本質を明らかにすること。分析。

解析学：微分学・積分学から発展した数学の総称。

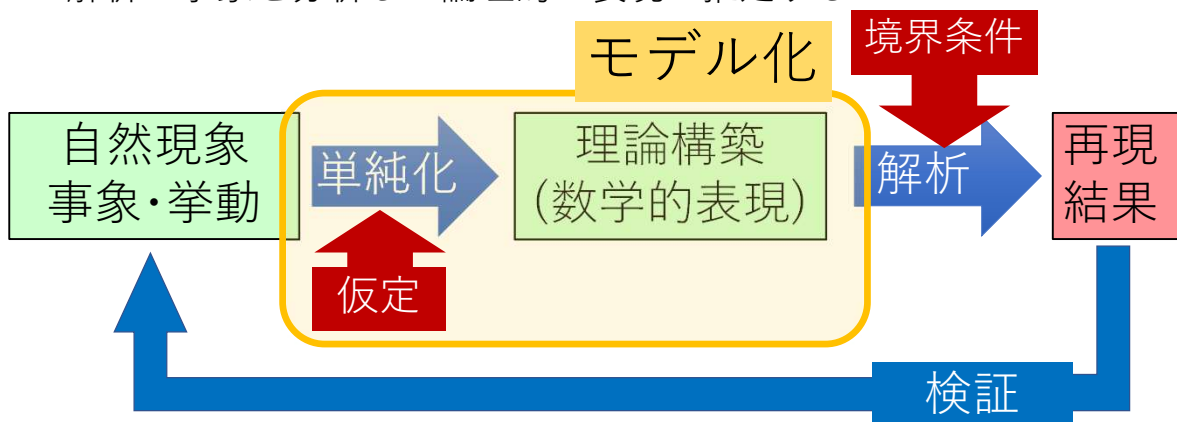
微分方程式等による数学的表現をもちいて解を得ること

7

現象の再現手順をまとめると・・・

理論：自然現象を統一的に表現する

解析：事象を分析して論理的に表現・推定する



事象は一つ！結果が合わなければ，仮定やモデル化，境界条件がおかしい！

8

問題は

- 種々の解析結果が実現象に近ければ，その理論は正しいと判断して良い(と思われる)
- 必ず実現象(実験結果)とは異なる解析結果が現れる．その理由は？

実際上あるいは実験上の不備(初期不整の影響)

理論の導出や考えが不十分

仮定の不成立(適用範囲外)

解析モデルの不備(境界条件等の設定が実際と異なる等)

解析手法の限界(解析ソフトの能力)

解析ツールの限界(コンピュータの能力)

9

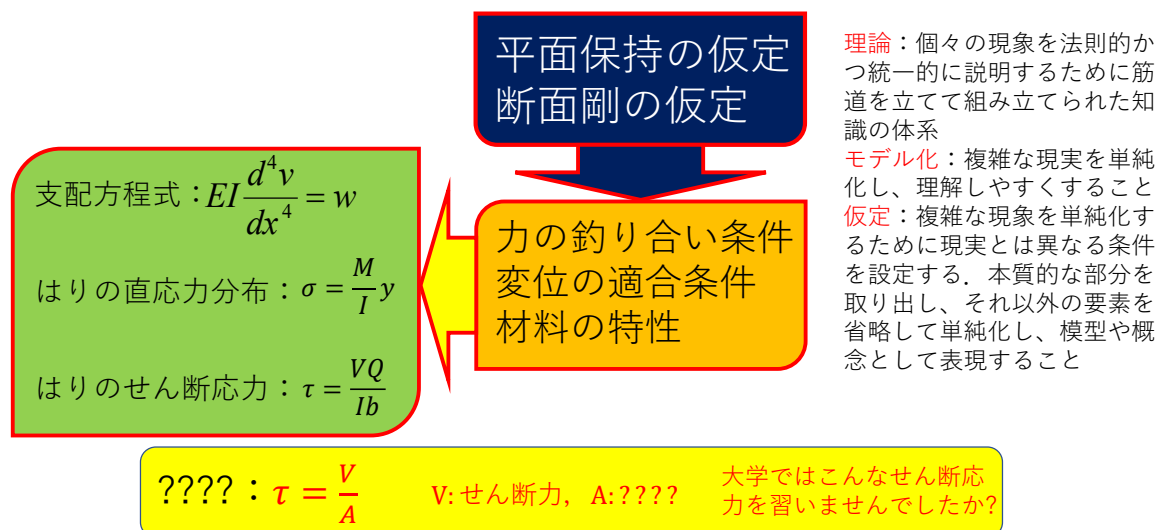
個人的な疑問

- 種々の解析結果が，実現象に近い結果を与えてとしても . . .
理論(評価式など)は力学的に矛盾無く構築されているか
補正係数の意味を，力学的に説明できるか
適用範囲に矛盾はないか
(例えば鉄筋のある場合と無い場合の不整合)
要は説明を聞いて，
まわりが納得できるか？まわりを説得できるか？
- 場合によっては，1時間以内で答えを出して対処しなくてはならないこともある ➡ FEM等では対応できない

いまさらですが・・・「はり理論」

10

はり理論は実験結果(実現象)よりも正しいと思いませんか？



ところで 大学で担当した講義科目は・・・

11

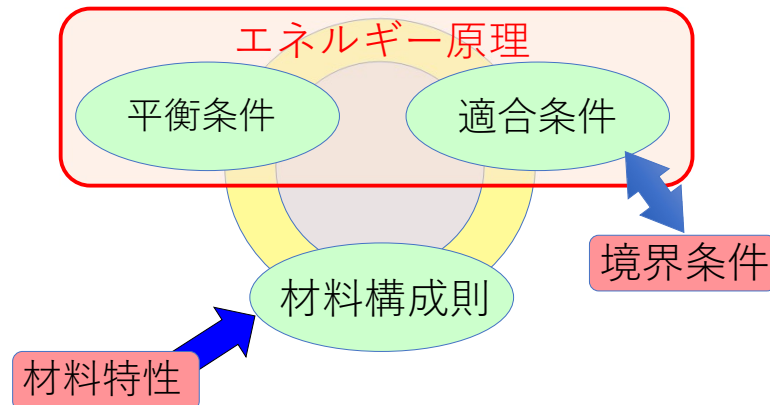
- 材料力学 (2年前期)
- 材料力学演習 (2年前期)
- 構造力学 (2年後期)
- 構造力学演習 (2年後期)
- エネルギー原理と構造解析 (構造解析学) (3年前期)
- その他
維持管理工学, 社会基盤環境工学実験, 社会基盤環境デザイン (橋梁設計)
- 構造工学特論 (主にFEM) (M)
- 構造力学特論 (主に鋼構造) (M)

大学では、2～4年生の3年間をかけて
構造関係のほぼ全部の講義・演習を担当したが、学生が理解したかどうかは不明

12

大学(学部)の3年間で教えたことは 構造解析とは

平衡条件と適合条件を，材料特性を考慮して（境界条件を加えて）解く



長期間かけて教えたことは，たったこれだけ！
はりやトラス、板など形が変わっただけ

13

ついでに非線形解析

材料学的非線形（塑性，粘性）

- ・ 構造物を構成する材料の特性
- ・ 材料の構成則

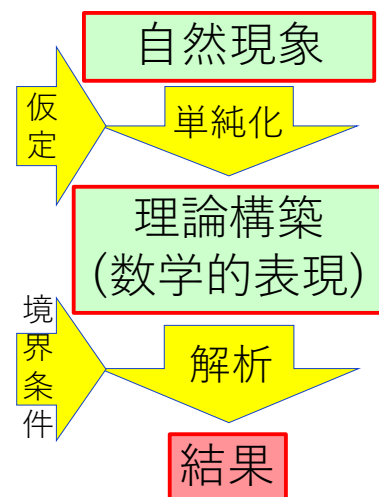
幾何学的非線形（大たわみ，有限変位）

- ・ 変形後の平衡方程式
- ・ 変形後の正確な適合条件



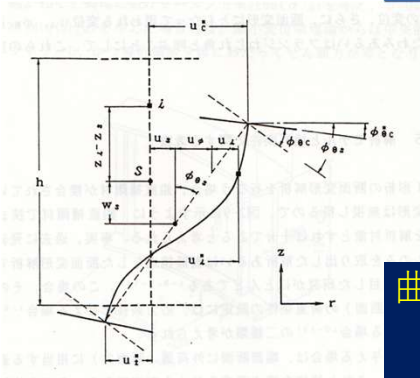
微小変位理論

- ・ 変形前の力の釣り合いと適合条件



材料構成則，有限変位理論なども
手順は同じ

2. 曲線桁の有限要素解析と曲げ耐力評価



断面の変形



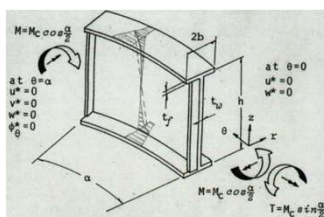
曲線桁の特徴

- ・ 曲げとねじれが連成
- ・ 大きな断面変形を発生

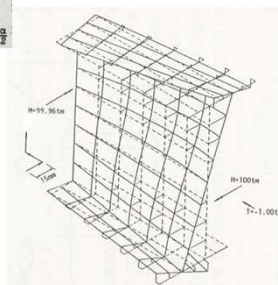


箱桁橋が多い

曲線桁の有限要素解析



解析モデル
扇板と曲面板の立体解析



要素分割と解析結果
(桁の変形状態)

目的

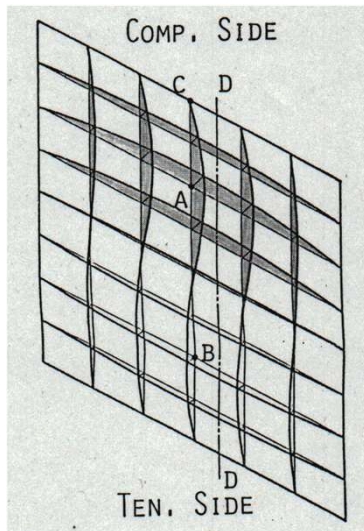
曲げを受ける曲線プレートガーダーの断面変形を調べたい。

そのためには、**はり理論は適用できない。**

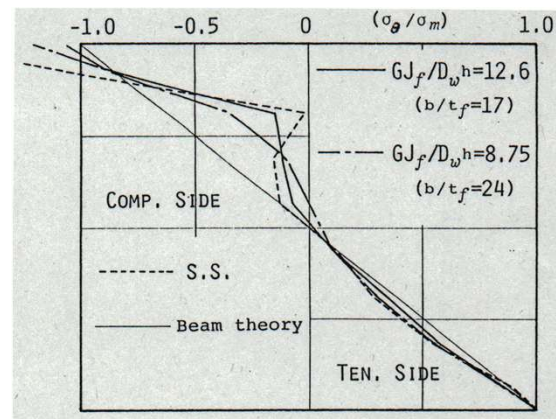
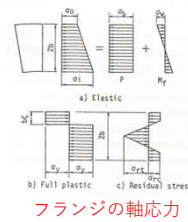
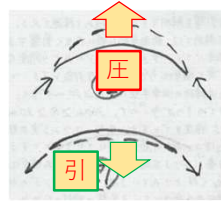
モデル化と解析方針

- ・ 垂直補剛材で挟まれた**1区間**を**解析対象**とし、両端に曲げモーメントを作用させる。
- ・ フランジを**扇形板**、ウェブを**曲面板**とみなし、桁を板シェル構造とみなす。
- ・ 1接点6自由度の、扇形板要素と曲板要素からなる**折板構造**として、**有限要素解析**を行う。
- ・ 幾何学的非線形性が強く現れるため、**有限変位解析**とする。
- ・ 塑性(材料学的非線形性)は考慮しない

解析結果

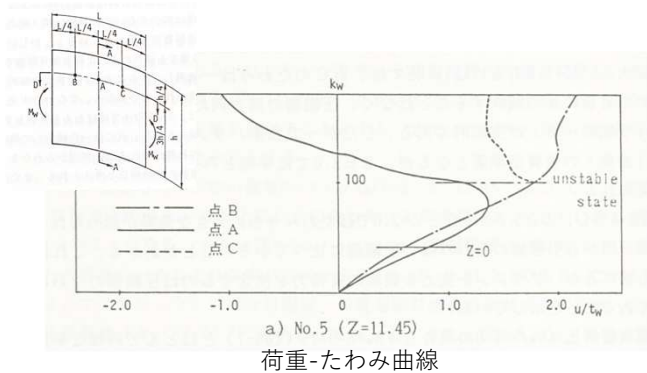


ウェブの変形



ウェブの曲げ応力 (週方向)

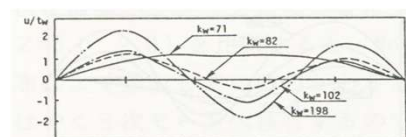
曲線桁ウェブの断面変形挙動



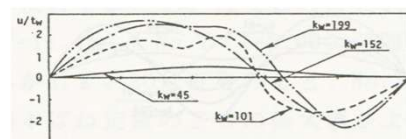
荷重-たわみ曲線

荷重増加に連れてウェブは、**複雑な非線形挙動**を呈する
ウェブ圧縮側の面外たわみは、周方向に
1次 ➡ 3次(2次) ➡ 2次(3次)
とモードが変化する ➡ **後座屈後座屈**

中央での対称条件は途中で崩れる!!

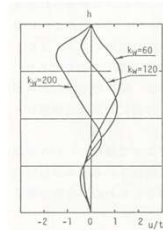


a) No. 7 (Z=5.0)



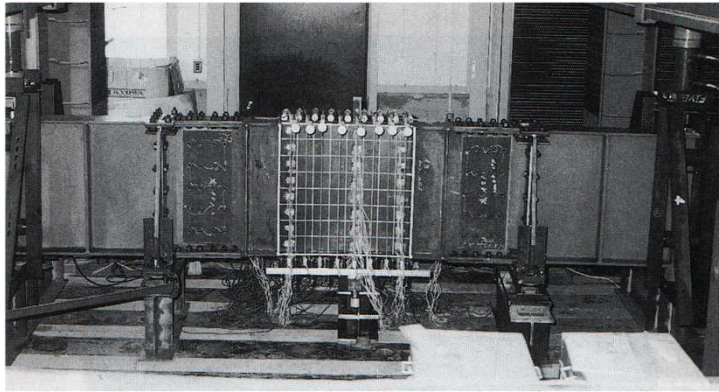
b) No. 9 (Z=2.0)

たわみの周方向分布 D-D line



たわみの高さ方向分布 (中央断面)

曲線桁の曲げ耐荷力実験

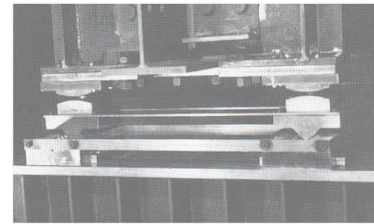


載荷風景

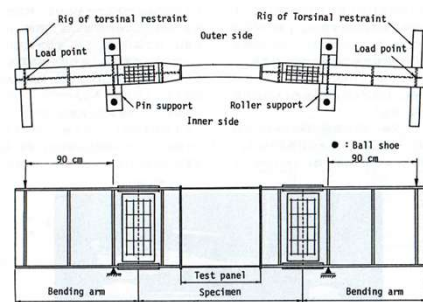
構造工学論文集, Vol.36.A, 1990.3.

境界条件設定のための工夫

18



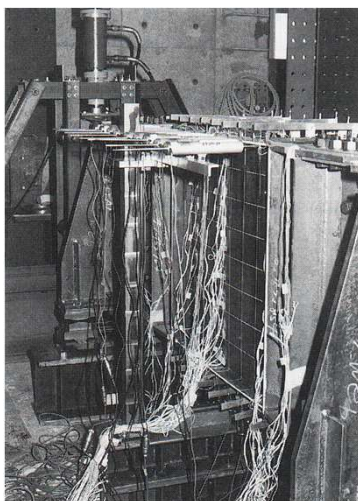
Roller Support
(移動シュー)



載荷概要

曲線桁の曲げ耐荷力実験 (計測法の工夫)

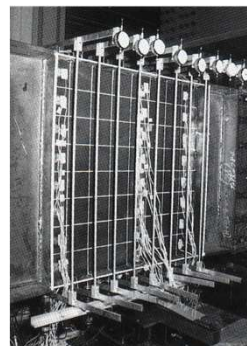
19



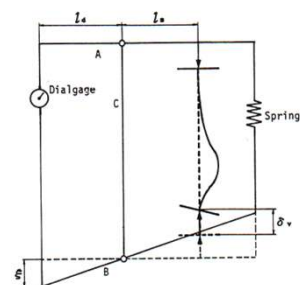
ウェブの面外たわみ計測
多点同時計測

フランジ垂直座屈破壊に注目

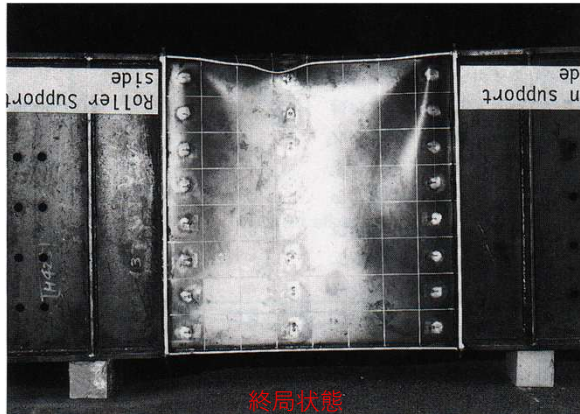
- ・ 桁高の変化 (縮み) 計測装置
- ・ 多点同時たわみ計測



桁高変化 (縮み) 計測

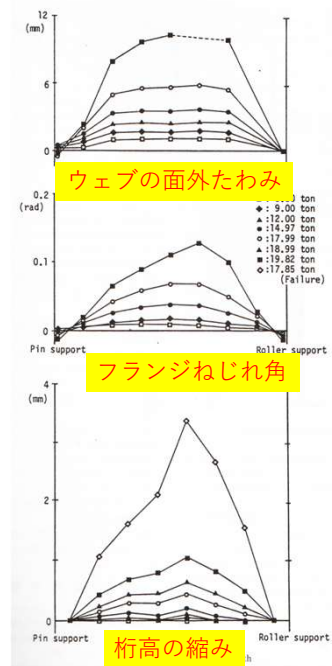


曲線桁の曲げ耐荷力実験



終局状態
圧縮フランジの局部座屈

- ・ウェブが薄いとフランジ垂直座屈が起こる
- ・フランジのねじれとけた高の縮みは連成して発生する



20

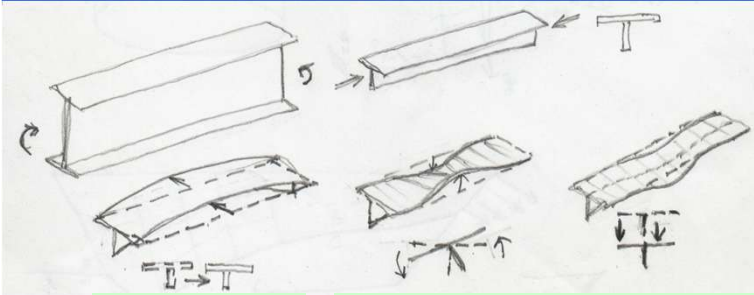
曲線桁の曲げ耐荷力評価

非線形FEMで、耐荷力は求まるかもしれないが、費用と労力は莫大

→ 実務で使えるためのモデル化が必要

複雑な実現象を簡略化、モデル化して、工学的に実用可能な範囲で耐荷力を評価する。

直線桁におけるBaslerのモデル
圧縮フランジの3つの座屈様式



フランジ水平座屈

フランジねじれ座屈

フランジ垂直座屈

直線桁の曲げ耐荷力を支配する、フランジねじれ座屈、フランジ水平座屈（横ねじれ座屈）については、概ね解明されていたが、フランジ垂直座屈の発生メカニズムは、十分には解明されていなかった。

フランジ垂直座屈による曲げ耐荷力評価モデル

- ・Basler et. al(桁の変形後の垂直方向圧縮力)
- ・西野, 長谷川 (flg.とwebの有効部分の座屈)
- ・三上(桁の変形後のパネルの垂直方向圧縮力)
- ・藤井 (評価法は一番面倒くさい)

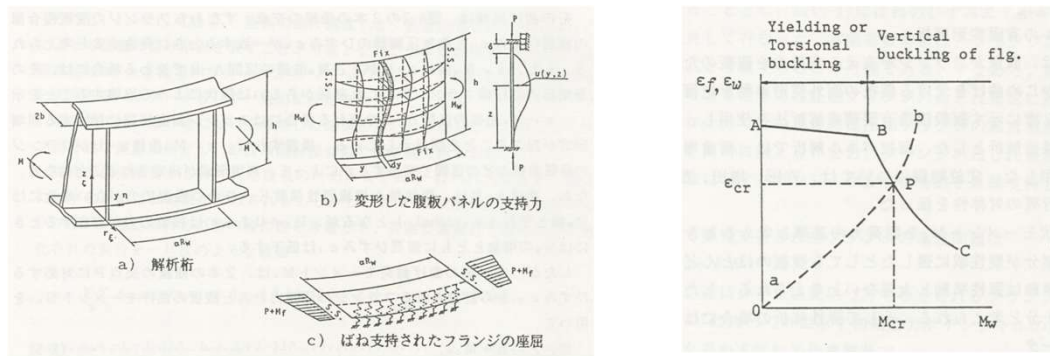
土木学会論文集, No.374/I-6. 1986. 10.

21

22

フランジ垂直座屈の発生メカニズム（藤井モデルの仮説）

1. 荷重（曲げモーメント）によりウェブにたわみが発生する。たわみは荷重増加とともに変化する。
2. フランジは、ウェブに支持されているが、ウェブの支持力をバネ定数として考慮する。
3. バネ定数は、ウェブのたわみに依存し、ウェブのスリットのたわみ分布で表す。
4. ウェブ支持力が十分なときは、フランジのねじれ座屈か水平座屈で崩壊する。ウェブ支持力が十分でなくなったときにフランジ垂直座屈が発生して崩壊する。

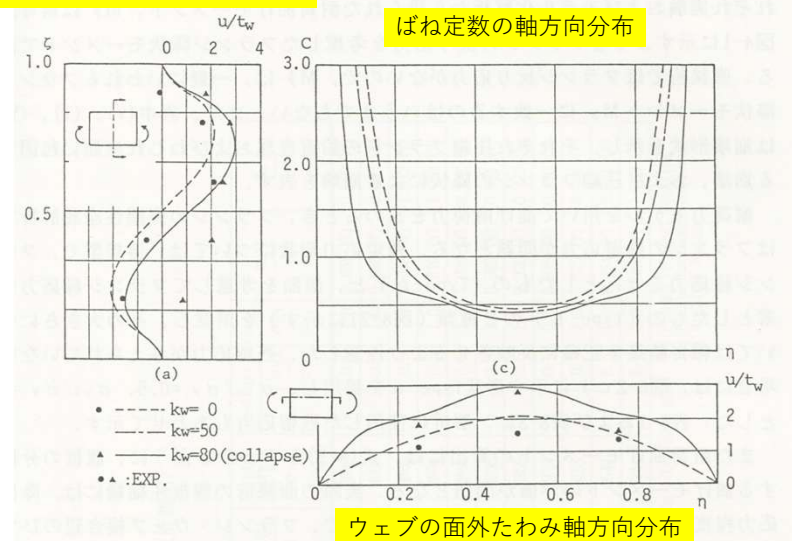


23

ウェブの支持力（バネ定数の求析）

ウェブの面外たわみ鉛直分布

ばね定数の軸方向分布

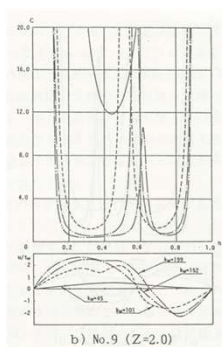


曲げ耐荷力解析の精度

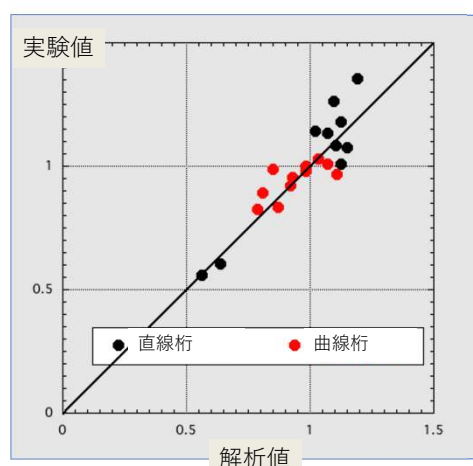
24

学位論文：曲げを受ける曲線桁の断面変形と耐荷力に関する研究

- ・ 反り応力を考慮したフランジねじれ座屈
- ・ ウェブ変形を考慮したフランジ垂直座屈
- ・ 曲線桁の曲げ耐荷力評価法の提案



バネ定数とたわみ分布



3. 鋼構造物の腐食凹凸表面を再現する

25

- ・ 腐食は、Feの酸化（酸素O₂と水H₂O）の電気化学的反応
 - ・ 多くの研究者は、そのメカニズムや腐食量(減肉板厚)に着目した論文が多い
 - ・ しかし、腐食した鋼構造物の残存耐荷力評価には不向きのように見える(表面凹凸形状が無い)
- ・ 腐食表面凹凸形状を作ると
 - ・ 平行な減肉（一様な板厚）を用いた評価より正確
 - ・ 一様腐食（全体腐食）のみならず局所腐食も考慮できる
 - ・ 補修実験において、種々の補修効果を定量的に評価できる

腐食凹凸表面作成モデル

- ①単純な支配パラメータ
- ②修正が容易
- ③種々の腐食表面ができる

腐食形態は、空間的時効相関があるのではないか。
(奥村誠，塚井誠人)

土木学会論文集A, Vol.66, No.1, pp.92-105, 2010.

26

腐食凹凸表面作成モデル

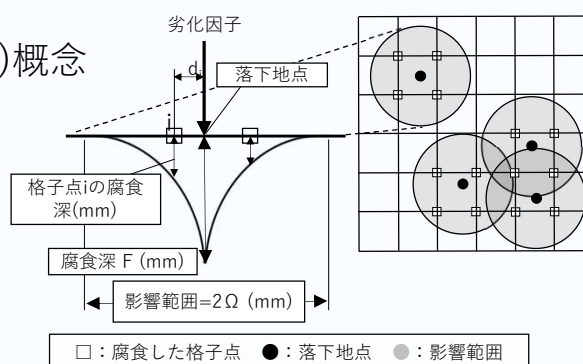
• アタック因子(劣化因子)概念の導入

一つのアタック因子により鋼表面が掘り下げられる。その深さ形状は以下とする。

$$V_i = F \exp(-\beta d_i)$$

空間的自己相関

V_i : 鋼表面の任意点*i*の腐食深
 F : アタック因子の強さ
 β : 距離減衰係数
 d_i : アタック因子の落下点から格子点までの距離



腐食表面凹凸形状は

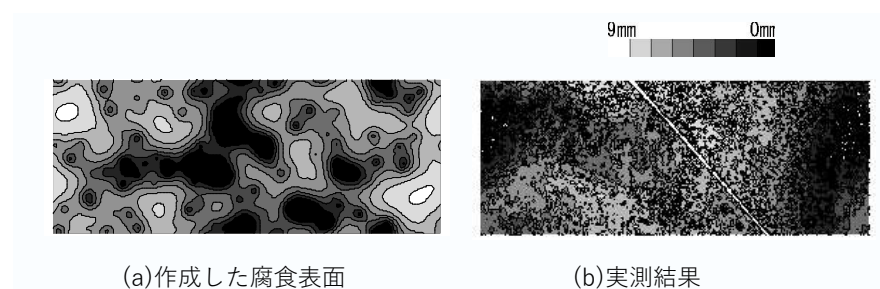
- アタック因子の強さ F
 - β (腐食深の形状を決めるパラメータ)
 - アタック因子の数 n
- の3つのパラメータで決まる。

土木学会鋼構造委員会：腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能回復設計法，土木学会，H26.8.

27

腐食凹凸表面を再現する

腐食凹凸形状は， F ， β とアタック因子の数 n の，3つのパラメータで決まるアタック因子の落下位置(座標)は乱数を発生させて決める

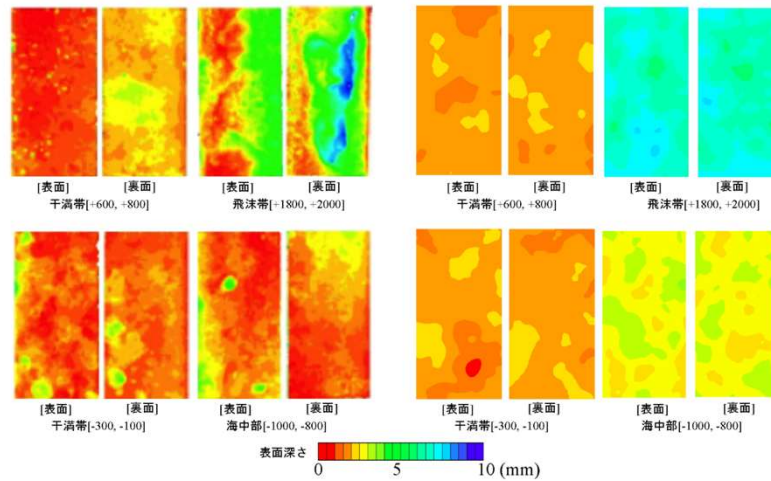


様々な解析および実験シミュレーションが可能となる!!

凹凸形状を決めるパラメータの数は少ない方が簡単

28

解析結果（曝露試験結果との比較）



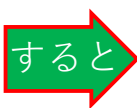
実測結果

予測モデル

29

同じ腐食表面を持つ実験供試体を作る

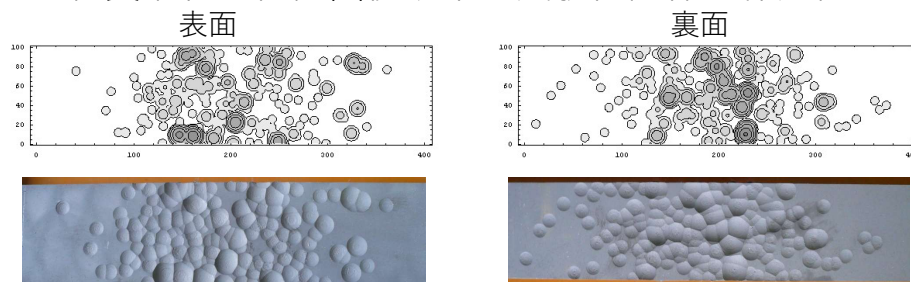
マザーマシンと連携させると**同じ凹凸表面を持つ供試体**を
多数製作することもできる。



当て板補修の適する当て板形状のパラメトリック実験などが可能となり**補修効果を定量的に把握できる**

実物の腐食鋼板では、当て板無しの試験をするとその鋼板は無くなる

- 腐食鋼材の性能回復効果の実験供試体の作成例

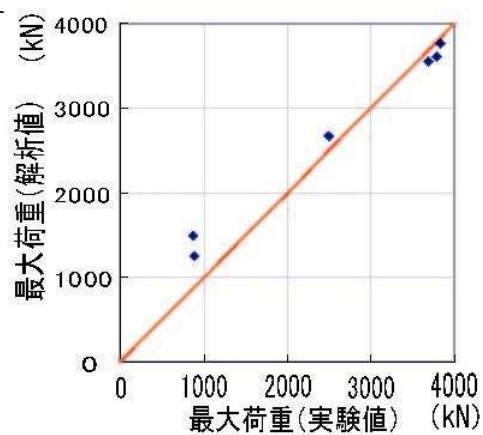
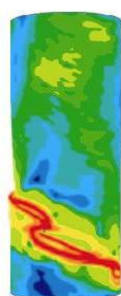


30

FEMによる鋼管杭の残存耐荷力解析(実測値)

- 複合非線形解析
- アイソパラメトリックシェル要素が便利
- 要素長：10 mm 程度

実測結果が正確であれば、高精度で評価が可能

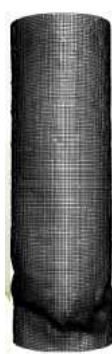


31

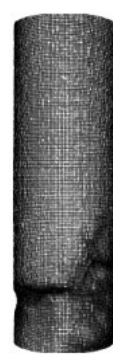
有限要素法による残存耐荷力解析結果例



(a)実験結果



(b)実測結果を用いた解析



(c) 腐食予測モデルを用いた解析

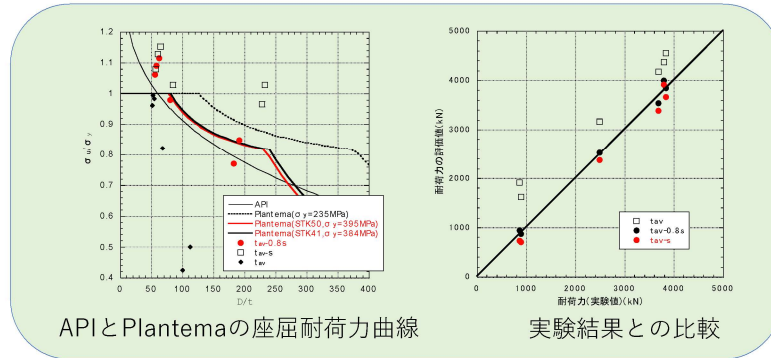
腐食した鋼管杭の破壊形態

複合非線形FEMにより精度のよい耐荷力評価が可能

FEM以外の
耐荷力評価

円形鋼管柱の簡易評価式を適用した 残存圧縮耐荷力評価

- 無腐食部材の座屈曲線に、腐食計測結果（例えば代表板厚）を適用して強度を求める



腐食した鋼管杭の残存圧縮耐荷力を求めるために、無腐食の鋼管座屈曲線に代表板厚を代入して、残存圧縮強度を求めた例
(この場合、代表板厚は、腐食後の平均板厚－標準偏差とすると実験結果を推定できる)

33

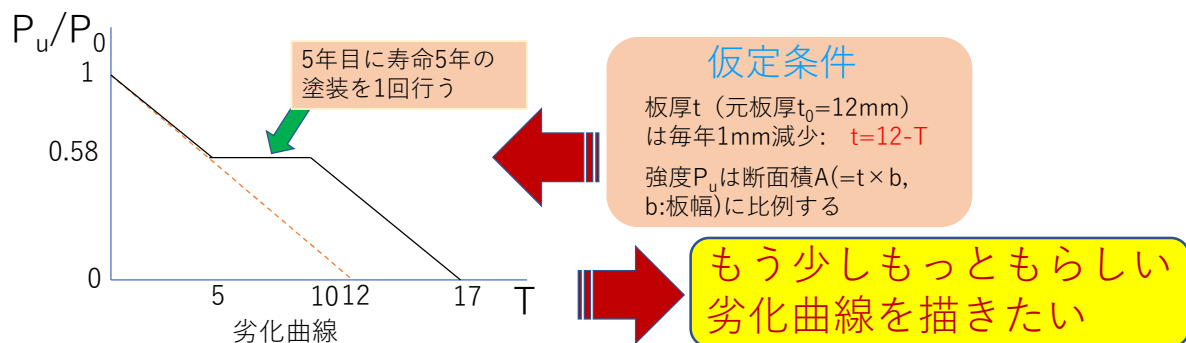
4. 腐食表面生成モデルの将来予測への適用

そもそも 残存耐荷力の将来予測とは耐荷力劣化曲線を描くことにほかならない

予測モデルの構築は

「簡単と言えば容易、複雑といえば極めて難問」

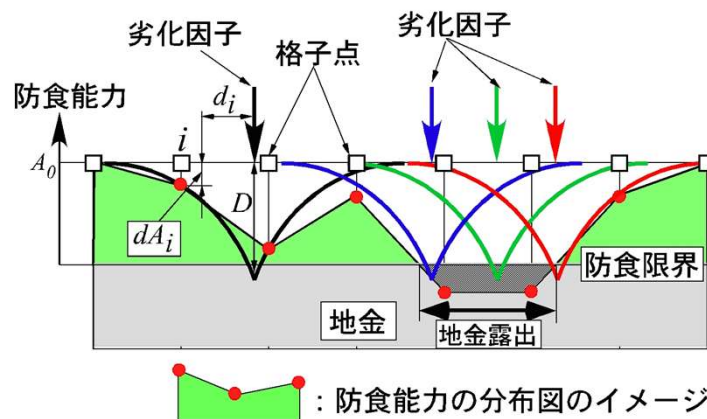
問題は、モデルの仮定、条件が実現象と整合するか？



34

腐食表面の将来予測モデル

- もし、アタック因子 F が、1年間に n 個落ちると仮定すると、予測が可能になる。



35

実現象の表現（モデルの補正）

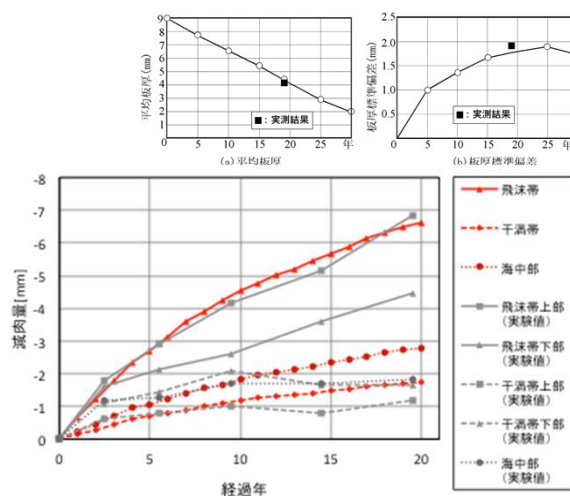
現実：腐食速度は時間とともに小さくなる

➡ アタック因子 F を腐食深の関数として与える

$$F = F_0(1 - \gamma \rho^{v_i})$$

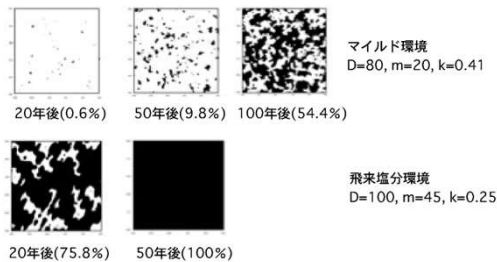
γ, ρ : 係数
 v_i : 腐食深

容易に実現象を
表現できる



塗膜劣化進展モデル

- ・ 防食機能の劣化も同じ考えで進行すると仮定すれば、防食工の劣化を考慮した腐食進展予測が可能になる。(F, n, βの値は同じ値では無い)

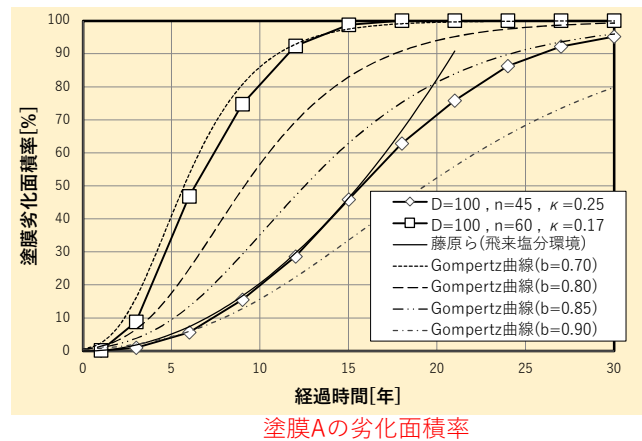


塗膜劣化にともなう地金の露出
(鋼板:200mm×200mm)
() 内の数値は劣化面積率

塗膜の防食能力 初期の能力 アタック因子の破壊力 影響半径

$$P_i = 100 - D \exp(-kd_i)$$

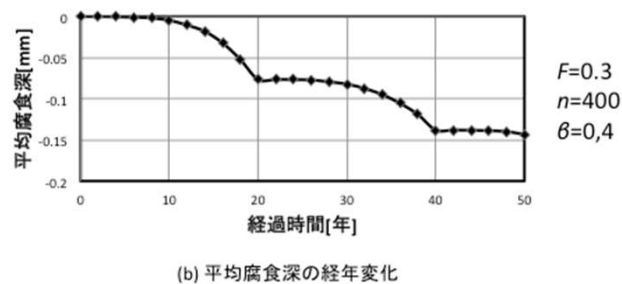
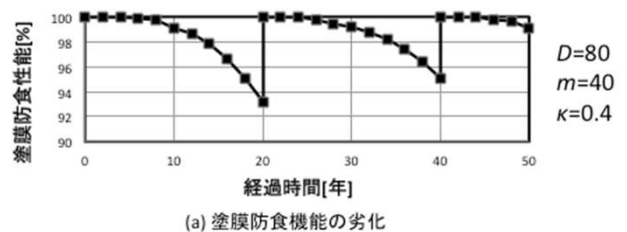
P_i が0になると腐食が始まる



解析結果(防食能力と平均腐食深)

解析条件

- ・ 防食能力:約10年
- ・ 20年毎に塗り替え

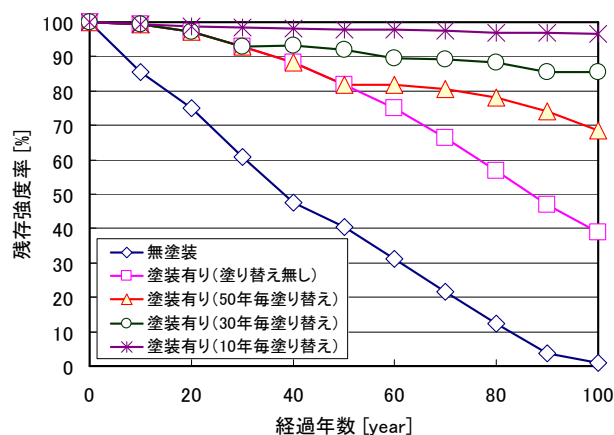


塗膜防食性能及び平均腐食深

解析結果(残存耐力劣化曲線)

38

腐食凹凸表面を予測して、それを用いて耐力解析(有限要素解析等)を行えば、残存耐力の予測が可能となる



圧縮を受ける鋼管杭の残存耐力の予測例
(塗装の防食効果を考慮した強度低下予測の例)

ついでに 性能回復の基本姿勢

39

- 1) 損傷状況の把握
- 2) 損傷要因の究明
- 3) 損傷要因の除去
 - ・ 水分、塩分の浸入防止
(防食機能の向上, 構造詳細の改善)
 - ・ 応力集中の緩和, 欠陥の除去
 - ・ 荷重制限
- 4) 適する性能回復施術

5. 孔あき鋼板ジベル(PBL)のずれ耐荷力評価

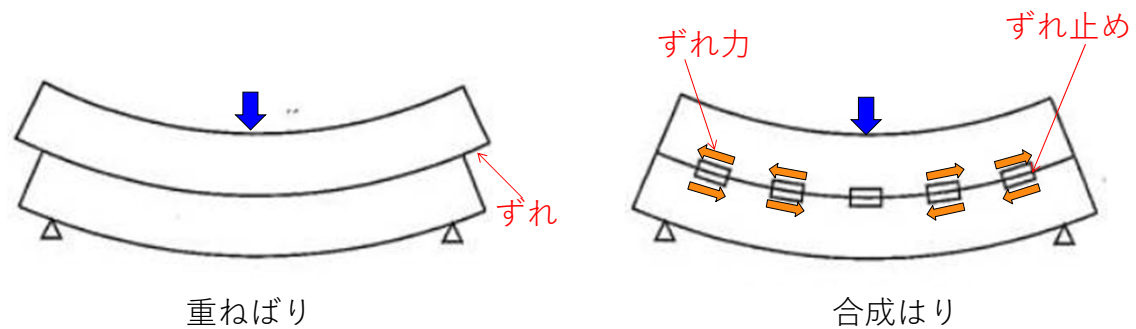
40

合成桁とは

矩形断面はリーフのたわみ: δ

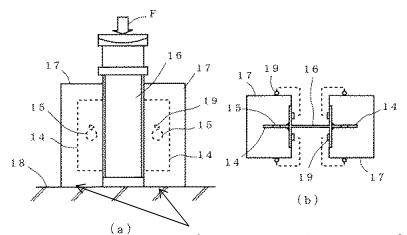
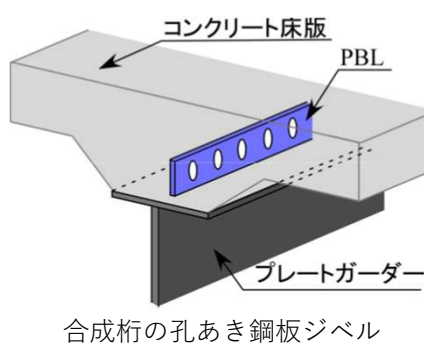
重ねはりのたわみ: $\delta / 2$

接着した合成はり: $\delta / 8$



孔あき鋼板ジベル(PBL)

41



ジェットモルタルor石膏

CT鋼押抜試験
(ずれ耐荷力実験)



CT鋼押抜試験

JSSC「頭付きスタッドの押し抜きせん断試験方法(案)」(1996)

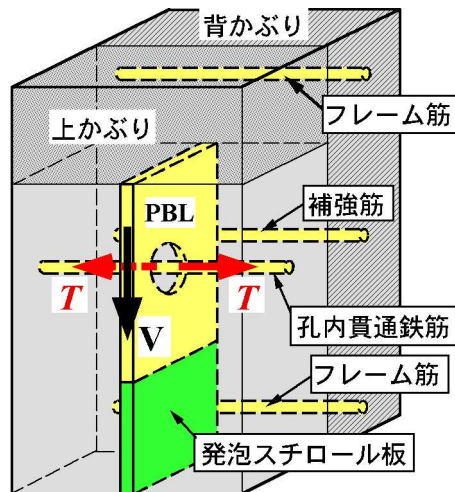
当時、我が国の要素試験はこれに準拠: CT鋼押抜試験



土木学会論文集A, Vol.64, No.2, 2008.

押し抜きせん断試験をしてみると

42

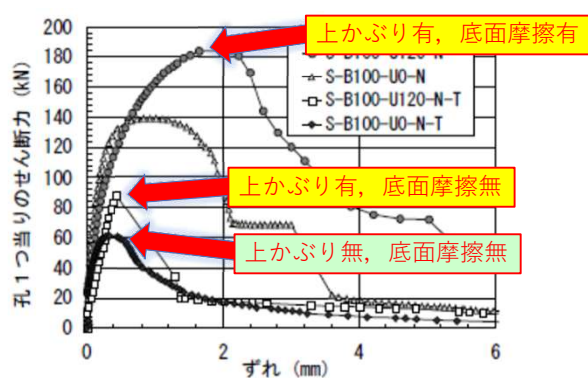


押し抜きせん断試験供試体

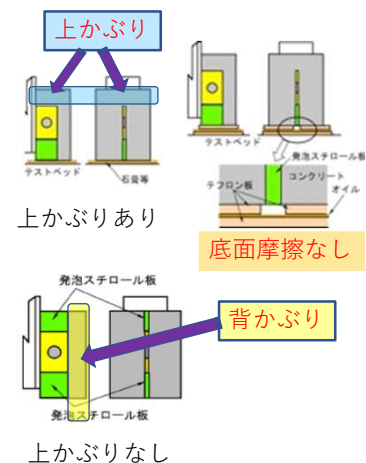
試験後の破壊状態
コンクリートが2つに分裂

ずれ力-ずれ曲線とずれ耐荷力(CT鋼押し抜き試験)

43



底面摩擦を除去 → ずれ耐荷力は 1/2
上かぶり除去 → ずれ耐荷力は 2/3



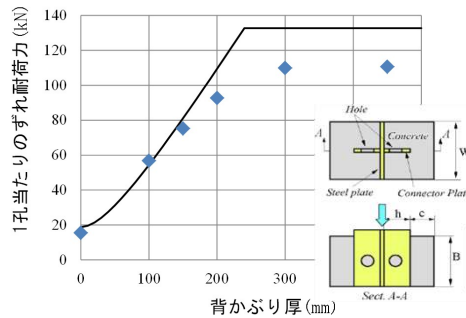
同じせん断試験でも，供試体形状や摩擦条件などに大きく影響される

→ 実際の合成桁のずれ挙動やずれ耐荷力は一体どうなの？

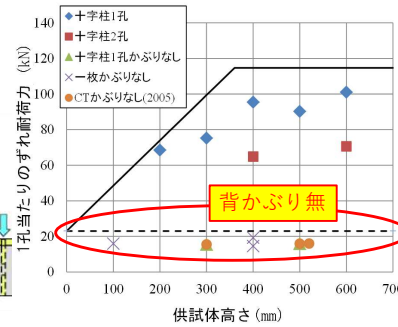
ずれ耐力は供試体形状に大きく影響される!

44

例えば



背かぶり厚 c とずれ耐力の関係



コンクリート高さ B とずれ耐力の関係

背かぶりの厚さ c が大きいほどずれ耐力は大きくなる

背かぶりの高さ B が大きいほどずれ耐力は大きくなる

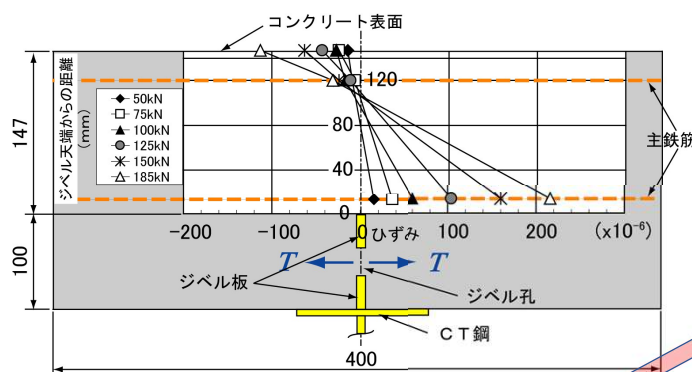
→ どちらもある値以上になると耐力上昇は無くなる

背かぶりが無い場合、ずれ耐力は一定 $V_{int} = A \tau_{ct}$!?

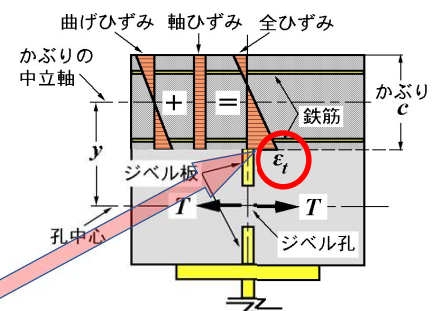
背かぶり内の橋軸直角方向軸ひずみ分布

45

孔部には押し広げ力 T が発生するのではないか!?



コンクリートのかぶり部のひずみ分布
実験結果



コンクリートかぶり部のひずみ

コンクリート背かぶり部には、曲げモーメントと軸引張力が発生!!

→ かぶりの下縁応力が引張強度に達した時に破壊する?!

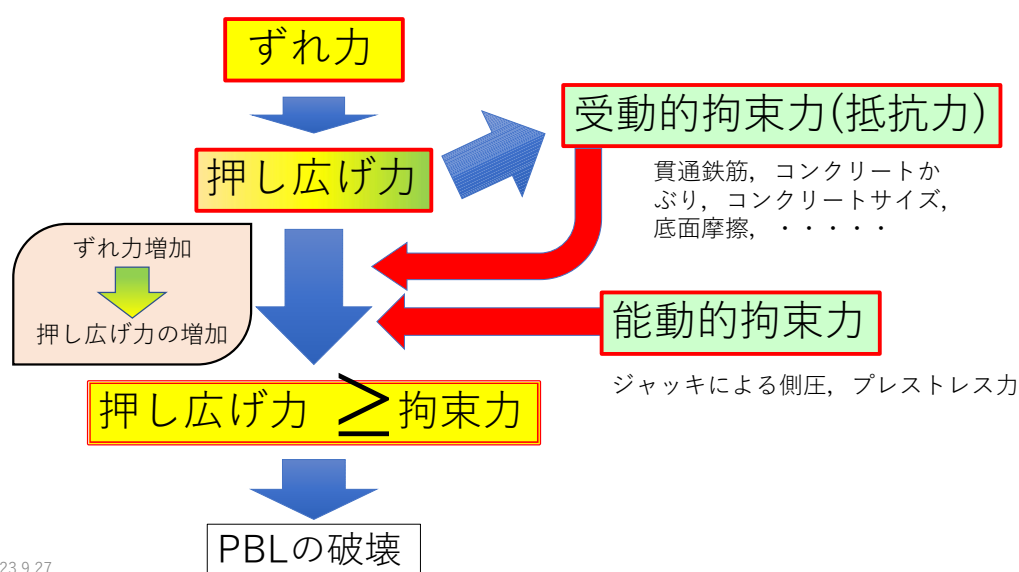
46

PBLの破壊メカニズム

- 1) 孔あき鋼板ジベルにずれ力 V が作用すると、孔付近のコンクリートを割裂させようとする力(押し広げ力) T が発生する。
- 2) 押し広げ力は、ずれ力の増加とともに増加し、これがコンクリートの破壊に起因するジベルの破壊(孔内および孔周辺のコンクリートのひび割れ)を発生させる。
- 3) 一方、押し広げ力に対して、コンクリート等の拘束因子による抵抗力が発生する。
拘束因子：ずれ耐力試験においては、孔内貫通鉄筋、上かぶり、背かぶり、かぶり内に配置された補強筋やフレーム筋、押し抜き試験では供試体の底面摩擦力がある。
もし、これらの拘束がなければ、ずれ耐力は、ジベル孔面のコンクリートのせん断強度 V_{int} のみで決まる。
- 4) PBLの破壊は、押し広げ力が種々の拘束因子による抵抗力を上回ったときに起こる。PBLのずれ耐力(最高荷重)は、ジベル孔コンクリートにひび割れが発生した時点、あるいは孔あき鋼板ジベルプレート为天端にひび割れが発生した時点に対応する。
- 5) 最高荷重後は、押し広げ力がその時点での拘束因子による抵抗力に釣り合うまでずれ耐力は低下し、ずれは増加する。
もしも、最高荷重後において、抵抗力がなければ急激なずれ耐力低下を起こす。貫通鉄筋などにより抵抗力が持続できる場合には、ずれ耐力は緩やかに低下する。

47

PBLの破壊機構とモデル化

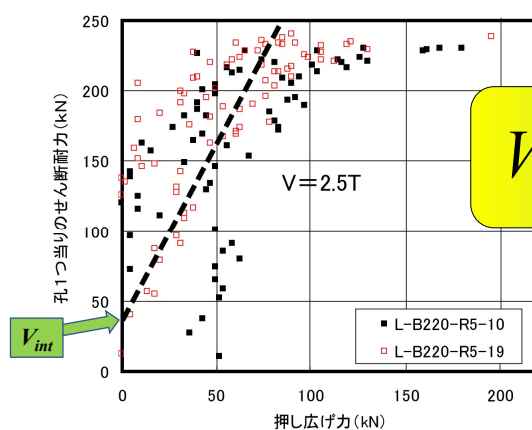


2023.9.27

47

48

ずれ力(せん断力)と押し広げ力の関係



$$V = V_{int} + 2.5T$$

- V : ずれ力
- V_{int} : 切片(「かぶり無し」のずれ耐荷力)
- T : 押し広げ力

孔内貫通鉄筋のひずみから押し広げ力を求めた

49

V_{int} : 拘束力が無い時のずれ耐荷力

- 2面せん断破壊の場合

$$V_u = V_{int} + 2.5T_R$$

$$V_{int} = 2 \left\{ \frac{\pi d^2}{4} + (n-1)A_s \right\} \tau_{ct}$$

- d : ジベル孔の直径,
 A_s : 貫通鉄筋の断面積,
 n : 鉄筋とコンクリートの弾性係数比
 τ_{ct} : コンクリートのせん断強度
 (=コンクリートの引張強度 f_{ct})

T_R : 押し広げ力に対する抵抗力

50

$$V_u = V_{\text{int}} + 2.5T_R$$

$$T_R = T_s + T_{cb} + T_{cu} + T_f + P$$

- T_s : ジベル孔貫通鉄筋による拘束力
 T_{cb}, T_{cu} : かぶり(背かぶり, 上かぶり)による拘束力
 T_f : 供試体の底面摩擦による拘束力
 P : 能動的拘束力 (プレストレス力等)

T_s : ジベル孔内貫通鉄筋による拘束力

51

$$T_s = E_s A_s \varepsilon_s$$

- E_s : 貫通鉄筋の弾性係数
 A_s : 貫通鉄筋の断面積 (貫通鉄筋のない場合 $A_s = 0$)
 ε_s : 貫通鉄筋によるひび割れ拘束ひずみ
 $\varepsilon_s = 400\mu$ (種々の試験における貫通鉄筋の最高荷重時のひずみは概ね $300 \sim 500\mu$ であることから決めた)

T_{cb} : 背かぶりコンクリートの拘束力

52

$$T_{cb} = \frac{f_{ct}}{\frac{e_b y_b}{I_{cb}} + \frac{1}{A_{cb}}}$$

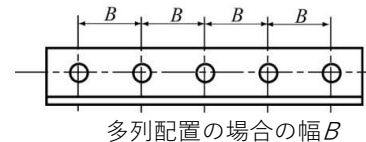
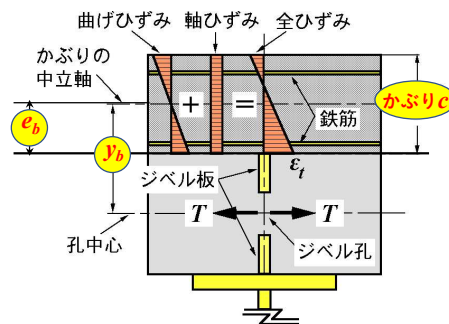
f_{ct} : コンクリート引張強度

I_{cb} : 背かぶりの断面2次モーメント
鉄筋のない場合

$$I_{cb} = Bc^3 / 12$$

A_{cb} : 背かぶりの断面積

$$A_{cb} = Bc$$



多列配置の場合の幅B

T_{cu} : 上かぶりの拘束力

53

$$T_{cu} = \frac{f_{ct}}{\frac{e_u y_u}{I_{cu}} + \frac{1}{A_{cu}}}$$

注意：実際の合成桁では上かぶりは無い

I_{cu} : 上かぶりの断面2次モーメント
鉄筋の無い場合

$$I_{cu} = hc_u^3 / 12$$

A_{cu} : 上かぶりの断面積

$$A_{cu} = hc_u$$

e_u : 上かぶりの中立軸からジベル上縁までの距離

y_u : ジベル孔中心から上かぶりの中立軸までの距離

54

T_f ：底面摩擦による拘束力

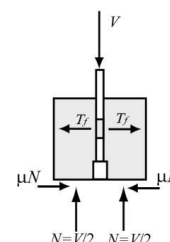
注意：実際の合成桁では底面摩擦は無い

$$T_f = \mu N$$

上式をずれ耐力式

$$\begin{aligned} V_u &= V_{\text{int}} + 2.5T \\ &= V_{\text{int}} + 2.5(T_s + T_{cb} + T_{cu} + \mu V_u/2) \end{aligned}$$

に代入して、ずれ耐荷力 V_u を求めると・・・



μ ：摩擦係数
 N ：垂直抗力
 $= V_u/2$

55

CT鋼押し抜き試験における
 1孔当たりのPBLずれ耐荷力評価式

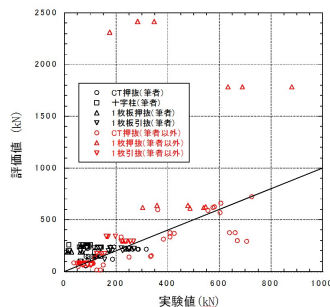
$$V_u = \frac{V_{\text{int}} + 2.5(T_s + T_{cb} + T_{cu})}{1 - 1.25\mu}$$

が得られる。

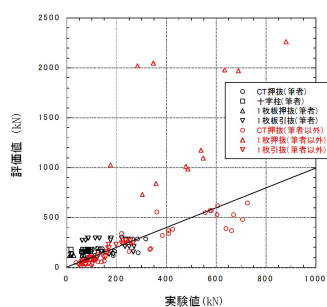
上式は、押し抜き試験における貫通鉄筋と上かぶりおよび背かぶりがある場合の、PBLずれ耐荷力評価式です。もし他の拘束力がある場合は、さらにそれらを考慮して V_u を求めれば良い。なお、底面摩擦の摩擦係数は供試体底面の支持状態によって決まります。

56

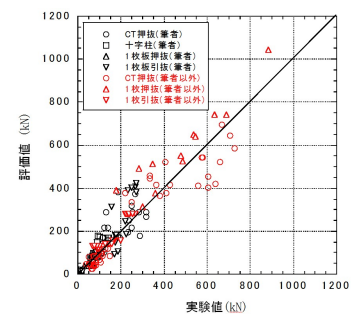
ずれ耐力(せん断耐力)評価結果と試験結果の比較



Leonhardt



複合構造標準式



本提案式

図から、本提案式は実験結果をうまく捉えているようにみえます。

以上、PBL押し抜き試験結果について、仮定とモデル化の一つの考えを示しました。アプローチの仕方は多様ですが、力学的に説得できれば一層良いと思います。

57

さて、合成桁の1孔当たりのPBLずれ耐力評価式は

$$V_u = V_{int} + 2.5 (T_s + T_{cb})$$

ここに、

V_u : 1孔当たりのずれ耐力,

V_{int} : ジベル孔のせん断耐力,

$$V_{int} = 2 \left\{ \frac{\pi d^2}{4} + (n-1) A_s \right\} \tau_{ct}$$

T_s : 貫通鉄筋の拘束力,

$$T_s = E_s A_s \varepsilon_s$$

T_{cb} : 背かぶりの拘束力,

$$T_{cb} = \frac{f_{ct}}{\frac{e_b y_b}{I_{cb}} + \frac{1}{A_{cb}}}$$

d : ジベル孔径,

E_c : コンクリートの弾性係数,

E_s : 貫通鉄筋の弾性係数,

$$n = E_s / E_c$$

A_s : 貫通鉄筋の断面積,

$\varepsilon_s = 400$: ひび割れ拘束ひずみ

(実験結果より決定)

最高荷重では、ひずみは300~500 μ を考慮,

τ_{ct} : コンクリートのせん断強度 = f_{ct}

f_{ct} : コンクリート引張強度,

I_{cb} : 背かぶりの断面2次モーメント

鉄筋のない場合: $I_{cb} = Bc^3 / 12$

A_{cb} : 背かぶりの断面積: $A_{cb} = Bc$

B : ジベル孔間隔

c : かぶり(背かぶり)厚

合成桁用ずれ耐力式へ修正

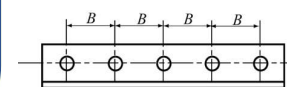
押し抜き試験のずれ耐力式:

$$V_u = \frac{V_{int} + 2.5(T_s + T_{cb} + T_{cu})}{1 - 1.25\mu}$$

ところが、合成桁では、

1) 上かぶりが無い $\rightarrow T_{cb} = 0$

2) 底面の摩擦は発生しない $\rightarrow \mu = 0$



ジベル孔配置

結局（年寄りのたわごと……!?)

「仮定の設定」「モデル化」を行うためには、

- ・破壊や挙動など、**実現現象を緻密に観察**し、
- ・**現象を理解・消化**して、**一般化・体系化**し、
- ・幾つかの**仮定を導入**して、その概念を簡単な**数学モデル**で表現する
- ・現象を再現するためのモデルは、できるだけ**単純**かつ**簡単**なものがよい
- ・結果は使えるほどの正確さがあれば良い(実務で使える)

そのためには、**実験がとても重要**です。

それができれば

- ・**寿命の長い論文**が書ける(いつまで論文が生き続けられるか?)
- ・「〇〇式」「△△モデル」が**長期間に亘って社会に貢献できる**のではないのでしょうか!!

雑駁な話しにお付き合いいただき、ありがとうございました

皆様が、構造物のモデル化と解析に
少しでも興味を持って戴ければ幸甚です