

土木学会 鋼構造新技術小委員会

終局耐力研究ワーキング

最終報告書

－ 概 要 版 －

平成 8 年 5 月 3 1 日

1. まえがき

終局耐力研究WGは、鋼構造物の使用範囲の拡大を支援するための技術革新を耐荷力の観点から推進することを目的とし、以下の3項目の課題を掲げて、それらを連携させながら調査研究を行った。

I. 鋼構造物の強度区分と耐荷力解析法に関する研究

鋼骨組構造物の部材断面を構成する板要素の幅厚比と部材の細長比によって、耐荷力解析法の仕訳を行う構造区分の考え方を導入し、区分の判定に使用する限界細長比と限界幅厚比の設定した。組立断面については断面を構成する個々の板要素に対して限界幅厚比を、円形鋼管断面については断面全体に対して限界径厚比を定めた。

鋼構造物あるいは部材は、それぞれに期待される機能を発揮できるように、強度および変形能に関する要求に対して断面決定される。さらに構造系としての変形や振動問題に関する制約条件が満たされなければならない。構造区分の考え方は、設計者の断面決定作業が容易になるように、強度と変形能に関する要求を満たす部材の細長比パラメータと構成板要素の幅厚比パラメータの限界値を、代表的部材および構成板要素についてあらかじめ定めておくものであり、多くの限界状態設計法に取り入れられている。

一方、耐荷力解析法としては設計実務での使用を前提として、弾性有限変位解析、接線弾性係数や局部座屈を考慮した $M-N-\Phi$ 関係を使用する簡易解析法の開発を行った。同時にこれらの計算法を適用する際の前提条件として、格点構造とボルト継ぎ手と構造区分の関係を整理した。

骨組構造を対象としたマトリックス変位法は設計実務の中で日常的に活用されている。幾何学的非線形性は比較的容易にマトリックス変位法のプログラムに取り入れることが可能である。そこで材料学的な初期不整（残留応力）と等価な幾何学的初期不整（初期たわみ）を予備的解析によって見出し、等価初期不整を有する骨組構造の幾何学的非線形解析（弾性有限変位解析）によって応力計算を行い、初期降伏強度を近似的に極限強度と見なす。この解析法では断面力として曲げモーメントが支配的な不静定構造物の塑性強度を評価できないことと等価初期不整の一般性に問題点が残されている。局部座屈を考慮した $M-N-\Phi$ 関係を使用する簡易解析法は、特定の断面については弾性領域から塑性領域までの極限強度を評価することができるが、 $M-N-\Phi$ 関係の一般性に問題がある。この種の近似的あるいは簡易解析法は汎用性の観点からの開発研究が必要である。

II. 高機能鋼材の機械的性質と活用に関する研究

鋼材の機械的性質を論ずるに先立ち、繰り返し塑性履歴を含む構成式を精度と実用性の観点から検討した。単調載荷曲線を基準とし、12個の材料定数を用いた西村らの構成式は各種の鋼材の繰り返し塑性履歴を精度良く表現できる。2曲面モデルに属する依田らの構成式は3個の材料定数に関係しており、実用的な表

現になっている。

開発された鋼材の構成式を各種の有限要素プログラムの中に導入して繰り返し塑性履歴を受ける鋼構造物の強度と変形能に関する検討を行っている。構成式の適用性に関しては一般的に以下のことが言える。

- ① 弾性あるいは弾塑性領域で局部座屈が生ずるような薄肉断面部材の繰り返し挙動に対しては幾何学的非線形性の効果が支配的であり、構成式の差は明瞭には現れない。
- ② 塑性座屈あるいは明瞭な座屈が現れない厚肉断面部材の繰り返し塑性履歴に対しては要素の応力-ひずみ関係が直接的に影響するので、構成式の精度が重要である。

高機能鋼材としては低降伏比高張力鋼と極低降伏点鋼を取り上げた。前者は高降伏比の従来型高張力鋼の靱性を改善することを目的として開発された鋼材であるが、断面あるいは部材としての座屈強度に対する靱性改善の効果を調査した。後者は降伏強度を極端に小さくする代わりに靱性を大きくした鋼材で、主として塑性履歴によるエネルギー吸収能に期待して建築物の制震・免震装置として利用されているが、橋梁構造への活用の可能性を調査した。

また新しい構造要素としてテーパプレート、サンドイッチ板および波形鋼板を取り上げ、それぞれの耐荷力特性を調査した。

テーパプレートについてはI形断面桁のフランジに適用して、桁の抵抗モーメントを作用モーメントに円滑に対応させることができる。板厚比と応力比の任意の組み合わせについて、フランジの局部座屈強度の評価が必要となる。そこで、アイソパラメトリックシェル要素を用いた変厚板の弾塑性有限変位解析により基礎資料を作成した。

Ⅲ. 鋼製高橋脚橋梁の試設計

上述の2つの課題に関する研究成果を具体的な構造物に適用し、有効性を確認することとした。ターゲットとして選定された構造物は鋼製高橋脚3径間連続高桁橋で、高橋脚3径間連続PC桁橋の代替案である。現行の道路橋示方書に準拠して試設計を行ったが、ユニークな架設工法を採用しており、建設コストはPC橋梁と同等なものとなった。この試設計原案に対して上述の研究成果に加えて、鋼管部材の座屈強度の適正評価、鋼管脚部材の座屈長、レベル2相当の耐震検討、さらに景観検討を加えた。

3. 高機能鋼材の機械的性質と活用に関する研究

3. 1 概説

強度、靱性、耐腐食性、耐疲労性などに関する諸機能を改善した鋼材を高機能鋼材と称している。ここでは低降伏比高張力鋼と極低降伏点鋼を取り上げている。これらの高機能鋼材の機械的性質や部材強度特性を論ずるに先立ち、特に部材あるいは断面の塑性強度と変形能の評価に必要となる繰り返し塑性履歴構成式を検討した。

対象とする鋼材が普通鋼、高張力鋼、低降伏比鋼および極低降伏点鋼であり、それらの応力-ひずみ関係がかなり異なることから、それぞれの鋼材の応力-ひずみ関係を精度良く評価するために、鋼材の単調載荷曲線を基にした構成式を開発した。この構成式は3種の材料試験によって決定される12個の材料定数を必要とする。

単軸の引張・圧縮試験による鋼材の塑性履歴特性は以下の特徴がある。

- ① 塑性ひずみの繰り返しによる弾性域の縮小は普通鋼、高張力鋼および低降伏比鋼については有為な差は見られない。これに対して、極低降伏点鋼は弾性域の縮小が小さく、応力-ひずみ関係のループが大きい。このことはエネルギー吸収能に優れている極低降伏点鋼の特長と言える。
- ② 単調載荷曲線においてひずみ硬化が顕著に現れる普通鋼と極低降伏点鋼では繰り返し硬化による応力の上昇が著しい。高張力鋼や低降伏比鋼では繰り返し硬化は僅少であり、Dafalias-Popovの2曲面モデルを適用することができる。

低降伏比高張力鋼を用いた部材の圧縮あるいは曲げに対する強度と変形能について、実験的および解析的に検討を行い、応力-ひずみ関係の相違がこれらの特性に与える効果を明らかにした。何れも単調載荷の下での座屈問題を論じており、座屈強度に関しては特筆するような低降伏比高張力鋼の特徴は現れないのは当然と言える。塑性ひずみが大きくなる除荷域の勾配が高張力鋼に比べて緩やかになることと、曲げを受ける場合の全塑性強度を確保できる限界幅厚比が高張力鋼より若干大きく取ることができる程度である。低降伏比高張力鋼の材料特性は高次不静定構造物の塑性崩壊機構を確実に形成することなど、塑性領域における変形能を活用することにより始めて発揮させることができる。中間報告書で述べたように低降伏比高張力鋼の応力-ひずみ関係には、ラウンド型と称する降伏棚を持たない場合と明瞭な降伏棚を有する場合とが存在する。塑性崩壊機構を確実に形成するには後者の明瞭な降伏棚を有する応力-ひずみ関係が望ましい。

極低降伏点鋼はその良好な靱性を活用して建築構造物の吸振材として利用され始めているが、橋梁への適用の可能性を検討した。極低降伏点鋼を使用し耐震性を改善する鋼橋の部位としては地震時に作用力が集中する支承および橋脚が考えられる。ただし、極低降伏点鋼を使用した部材は常時荷重によっては過大な応

力を受けない特殊構造とする必要がある。ここでは連続桁橋の端支点部に設置して地震時に橋軸方向変位に対してのみ効果を発揮する吸振装置を考案し、各種の強震記録に対する応答変位の低減を検討した。

さらに、新しい構造要素としてテーパプレート、サンドイッチ板、波形鋼板について、座屈・耐荷力の観点からの調査研究を行った。

テーパプレートについてはI形断面桁のフランジに適用して、桁の抵抗モーメントを作用モーメントに円滑に対応させることができる。板厚比と応力比の任意の組み合わせについて、フランジの局部座屈強度の評価が必要となる。そこで、アイソパラメトリックシェル要素を用いた変厚板の弾塑性有限変位解析により基礎資料を作成した。

サンドイッチ板は面内圧縮荷重を受ける場合、波形鋼板は面内せん断力を受ける場合について、それぞれ基本的な座屈強度特性を論じた。

5. まとめ

以上述べたように、終局耐力研究ワーキングは

I. 鋼構造物の強度区分と耐荷力解析法に関する研究

II. 高機能鋼材の機械的性質と活用に関する研究

III. 鋼製高橋脚橋梁の試設計

の3つの課題を掲げ、課題IおよびIIの成果を課題IIIの試設計橋梁の合理化に反映すべく研究を進めたが、課題IおよびIIの成果の取りまとめに時間を費やしてしまい、試設計橋梁に新しい情報を組み込む作業は今後の検討課題として残された。

現時点で得られた研究成果ならびに今後の検討課題を列举すると以下の通りである。

I. 鋼構造物の強度区分と耐荷力解析法に関する研究

－研究成果－

- ・部材の細長比と構成板要素の幅厚比をパラメータとして鋼構造物の強度限界状態を区分する考え方を示し、区分の限界値を周辺支持板と自由突出板について提示した。
- ・等価初期不整を考慮した弾性有限変位解析による初期降伏強度を鋼構造物の極限強度と評価する方法を提案した。
- ・接線弾性係数を用いた修正E f法による骨組構造部材の有効座屈長を求める方法を提案し、平面骨組構造への適用性を示した。
- ・構成板要素の局部座屈を考慮したM - N - ϕ 曲線を用いた骨組構造の極限強度の簡易解析法を提案した。
- ・隅角部の強度と変形能に関する基礎資料を提示し、構造区分との関連を説明した。
- ・高力ボルト継手の強度評価法を提示し、構造区分との関連を説明した。

－今後の課題－

- ・実務設計での構造区分の使用方法に関する検討
- ・汎用性のある簡易耐荷力解析法の開発

II. 高機能鋼材の機械的性質と活用に関する研究

－研究成果－

- ・単調載荷曲線に基づいた鋼材の繰返し塑性履歴に関する精度の良い構成式を提案した。
- ・3つの材料定数のみからなる鋼材の繰返し塑性履歴に関する2曲面モデルを定式化した。
- ・低降伏比高張力鋼材からなる薄肉断面の圧縮強度と変形能を実験的に明らかにした。
- ・低降伏比高張力鋼材からなる薄肉I形断面はりの横ねじれ座屈強度特性を明らかにした。

- ・橋梁に対する極低降伏点鋼を用いた吸振装置の制振効果を明らかにした。
- ・任意の板厚比と応力比の組み合わせに対するテーパ自由突出板の極限強度特性を明らかにするとともに、極限強度の評価式を与えた。
- ・面内圧縮力を受けるサンドイッチプレートの座屈実験により、フェイスプレートとコアの剛比、極限強度に及ぼす接着層の影響などを明らかにした。
- ・面内せん断力を受ける波形鋼板の弾性座屈荷重の計算式を示した。

－今後の課題－

- ・低降伏比高張力鋼を用いた部材の耐震性能に関する研究
- ・極低降伏点鋼の橋梁制振効果に関する実証実験

III. 鋼製高橋脚橋梁の試設計

－研究成果－

- ・鋼製高橋脚を有する山岳橋梁（連続鋼桁橋）の試設計を行い、PC橋と同程度の経済性が達成できることを示した。
- ・試設計においてユニークな回転式桁架設工法の提案を行った。
- ・修正E f法を適用して橋脚部材の有効座屈長を求めたところ、圧縮部材について現行の設計規準よりも有利な設計ができることを明らかにした。
- ・橋脚に用いる鋼管部材の製作過程において導入される残留応力や加工硬化による降伏点の変化を考慮して圧縮強度特性を調べ、径厚比の小さな部材ではE C C S柱曲線のcurve b以上の耐荷力曲線が適用できることを明らかにした。
- ・橋脚の繰り返し塑性履歴を考慮した弾塑性有限変位地震応答解析により試設計橋梁のレベルII地震に対する安全性の確認を行った。
- ・一定圧縮力と繰り返し曲げを与える実験により、鋼管部材の耐震性能を確認した。
- ・試設計橋梁のパースを作成して、橋脚形状、横はり間隔、色彩などについて検討を行った。

－今後の課題－

- ・新しい研究成果を反映した試設計の修正
- ・橋軸直角方向地震における応答変位を低減するための吸振装置の開発

最後に、5カ年にわたる研究活動の機会を与えていただいた鉄鋼5社の関係各位ならびにワーキングの研究の推進にあたり貴重な助言を頂いた当小委員会の伊藤学委員長を始めキャビネット委員である倉西茂、福本嘯士、西野文雄の先生方に深甚なる謝意を表します。