

現地レポート：道路構造物の強靱化に向けて

塑性化を考慮した鋼桁設計法の開発

宮下 剛・小野 潔

1. はじめに

道路橋の設計基準である道路橋示方書¹⁾（以下「道示」という。）は平成29年7月に改定され、設計体系が部分係数設計法及び限界状態設計法へと移行した。従来は、設計における安全余裕を許容応力度として一律で与えていたが、部分係数法が導入され、安全余裕が作用側と抵抗側それぞれでばらつきを与える要因ごとに、部分係数を設定して設計する体系となり、構造条件に応じて合理的な設計が可能となっている。

これに応じて、各部材もその損傷の過程が制御され、また、非弾性挙動についてもぜい性的な破壊を避けられるものについては、より大きな設計強度が見込めるように部分係数が設定された。本来、伸び性能や降伏後強度に優れた鋼桁についても、部材としての非弾性挙動特性を代表する工学指標（たとえば断面耐力等）を限界状態に当てはめることで、設計の合理化が期待されるところである。しかし、様々な材料や構造特性を有する桁部材について、多数の载荷実験は行われているものの、様々な組合せ断面力や繰返し特性を有する载荷条件に対して、残留変位や急激な強度低下を制御し、その信頼性を測れるだけの系統的なデータの取得・整理が行われてきていなかったのも実情である。結局、標準的な照査方法において鋼桁の限界状態を置き換えた工学指標は、桁を構成する板材の非弾性挙動の開始点が用いられたままとなっている。

そこで、本研究では、様々な組合せ断面力等に対する桁の限界状態を系統的に調べるための実験や数値解析の体系の提案と、それを鋼桁に適用して限界状態に対応する設計式（強度式）を提案しようとするものである。本報告では、検討の基礎データを得るために行った、鋼桁の载荷実験結果について報告する。

2. 鋼桁の非弾性挙動を制御した設計法を提案するための課題

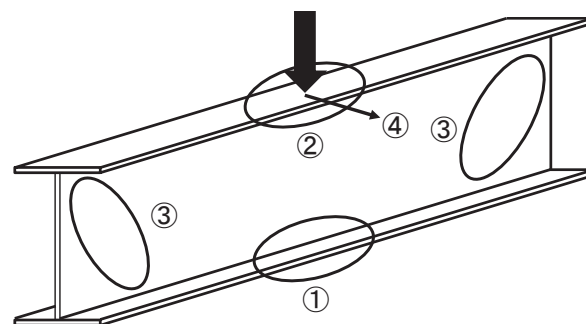
例えば、偏心（ねじり）がなく曲げ・せん断を受ける鋼I桁の剛性低下、耐荷力喪失メカニズムは以下のように単純化できる（図-1）。

- ①引張を受けるフランジの一部が降伏する。
- ②上フランジが座屈する。
- ③ウェブが座屈する。
- ④部材として横倒れが生じる。

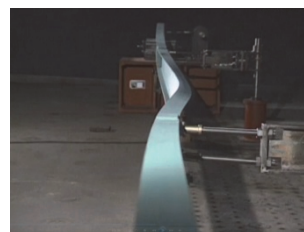
また、コンクリート床版も桁の一部として見込む「合成桁」では、①、③に加えて下記がある。

- ⑤上フランジと床版の接合部が損傷する。
- ⑥コンクリート床版が圧壊する。

横倒れを除けば、たとえば、鋼I桁を構成する板の引張試験、圧縮試験をベースに降伏、圧縮剛



②上フランジの座屈²⁾ ③ウェブのせん断座屈



④桁の横倒れ座屈³⁾

図-1 曲げ・せん断を受ける鋼I桁の剛性低下、耐荷力喪失メカニズム

性の変化（座屈）荷重を求め、それを板断面積で除した公称応力で実験結果を整理し、許容応力度が決められてきた。また、ウェブの許容値については、桁の載荷実験を行い、桁の耐荷力だけでなく、桁の荷重－変形関係、ウェブの面外変位やひずみの非線形性にも着目して、設定されている。

一方で、コンクリート床版の耐久性向上も図られた現在、コンクリート床版によって上フランジの座屈を防止し、また、ウェブ厚を厚くすることで、曲げ・せん断に対して下フランジの引張降伏を先行させ、かつ、その後も剛性が低下しても強度低下が生じないような部材断面を設計することで、変位及び残留変形が顕著でなく、最大強度に対しては余裕を有した状態を保ちつつも、供用期間中に鋼桁材料の降伏が繰り返し生じることを許容することで、桁断面を縮小しようとする試みが行われてきている。諸外国では、たとえばこのような考え方が許容された道路橋の技術基準も提案されている^{4),5)}。例えば、米国などではこのような概念で設計した桁に大型車を何度も走らせ、繰り返し材料の一部が降伏しても残留変形が累積しないようなことまで確認したり⁶⁾、床版の損傷が先行することがない条件を安全側に設定できるような条件（ductility条件という）が提案されている。ただし、残留変位の累積に関する検証方法は確立されておらず、またductility条件の安全余裕のとり方も考え方は明らかにされておらず、たとえば米国と欧州ではductility条件が異なっている。

特に、わが国では熊本地震でみられたように、外力条件として地震と地盤変位の組み合わせがあり、これらを設計で適切に制御することが難しい。このため、構造物の最大強度点を明確にして、それを超えた後もできるだけ急激に破綻しないような構造が望ましいと言える。一方、学協会を中心に、載荷試験や数値解析による研究が行われているものの、道路橋の技術基準にて取り込むためには以下の点で検証が不足している。

(1) 繰り返し載荷の累積を制御するために、どの程度の損傷状態を超えてはならないのか、いわゆる限界状態を設定するための試験方法や試験結果に十分な知見がない。例えば、道示におけるPC桁のせん断の許容応力度は繰り返し載荷を行い、急激に強度が落ちないかどうか検討しながら実験結果を整理しているが、鋼桁について、このよ

うな着眼で実験されたデータはない。

(2) 道示の部分係数では、部材耐荷力式の推定精度については抵抗係数で、また塑性化後の非弾性挙動特性（正の剛性を有するか負の剛性を有するか）が構造・部材係数として反映されることになる。特に後者については、鋼材の機械的性質やウェブの板厚（後座屈挙動特性）に依存するが、これらの関数として耐荷力式や構造・部材係数を作成することはできない。

(3) 地震時には、死荷重等による曲げ・せん断と水平力による断面方向の変形を受けることが想定されるが、これに対する実験結果がない。たとえば、これまで板単位で十分な安全率を有する許容応力度法で設計されてきた桁は、地震時に変状が生じても落橋にいたるようなぜい性的な破壊を示さなかったが、今後、従来諸元から変わる桁を設計することが前提になるのであれば、組み合わせ荷重に対して損傷を制御することの必要性を見極める必要がある。特に、欧米のDuctility条件ではこのような載荷モードは想定されていない。

3. 合成桁の曲げ耐荷力実験

3.1 供試体の設計および製作

本研究では、鋼桁の剛性低下、耐荷力喪失メカニズムとして図-1の①を対象とし、さらに前節で述べた課題のうち、主として(1)と(2)のデータ取得を行う。

曲げを受ける合成桁では、下フランジが降伏する降伏荷重に達したあと、降伏領域が床版に向かって上昇する。そして、最も大きな圧縮力を受ける床版上縁が圧壊せずに、鋼桁断面が全て降伏したと仮定すると、全塑性モーメントと呼ばれる状態に至り、合成桁としての強度が最大限に活かされる。つまり、床版が圧壊すると荷重が急激に低下することから、全塑性モーメントに達してから、床版が圧壊するように損傷を制御することが求められる。これを満たす条件として、欧米ではDuctility条件が与えられている。

ここで、このような損傷に最も影響を与えるのが、鋼桁断面が全て塑性化したときに応力の正負が変化する位置を表す塑性中立軸位置である。塑性中立軸位置が上フランジあるいは床版内にあれば、鋼桁断面は全塑性モーメント時に全て引張応力を受ける。逆に、塑性中立軸位置がウェブ内に

あれば、ウェブの一部は全塑性モーメント時に圧縮応力を受けるため、座屈が発生する恐れがある。

そこで、本研究では、三体の合成桁試験体を製作し、図-2に示す四点曲げ試験を実施することとした。試験体の評価区間は等曲げ区間とし、図-3に示す断面を有する供試体を製作した。図-3の D_t は供試体の高さ、 D_p はコンクリート床版上面から塑性中立軸までの距離である。

また、ウェブの座屈はその板厚と高さで決まり、これを代表する無次元量として鋼構造では幅厚比を含む関数である幅厚比パラメータ R_w という指標がある。道示ではこの上限値が設定されている。MY1は R_w を上限値(=1.2)としたものである。一方、MY3とMY4は、塑性中立軸位置が曲げ耐荷力や繰り返し載荷による累積損傷に与える影響を把握するためのものである。MY4はMY1の下フランジの幅を広くしたものであり、MY3はMY1よりもウェブ高に対して相対的にウェブ厚を薄くしたもの($R_w=1.3$)である。

図-3に実験実施断面の塑性中立軸位置を示す。ここでは、鋼材の降伏点ならびにコンクリートの圧縮強度として、表-1に示す値を用い、鋼材とコンクリートのヤング係数比は7とした。塑性中立軸位置は、一体目と二体目が上フランジ内、三体目はウェブ内となった。

3.2 実験

載荷には土木研究所が有する30MN載荷試験機を用いた。載荷方法は荷重－変位関係等の非線形性や累積損傷をみるため、降伏荷重付近の荷重領

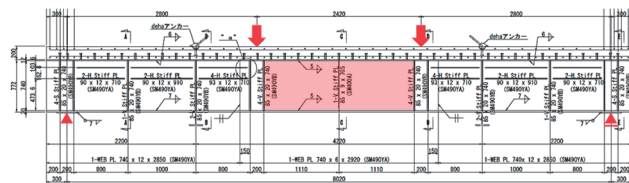


図-2 載荷方法

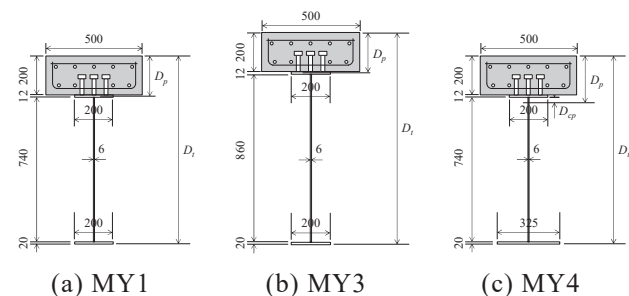


図-3 供試体断面 (実施断面)

表-1 鋼材とコンクリートの材料強度

		MY1	MY3	MY4
鋼 材 降伏点 (MPa)	上フランジ	405		
	ウェブ	424		
	下フランジ	392		
コンクリート 圧縮強度(MPa)		37.8 (35日)	39.6 (48日)	39.0 (42日)

域まで載荷、除荷を荷重制御で数回繰り返した。その後、変位制御とし、床版に破壊が見られた時点で荷重を保持して観察を行ったあと載荷を続け、荷重が落ち始めたのを確認してから除荷した。

4. 実験データの分析・評価

4.1 荷重－変位関係

図-4に各試験体の荷重－鉛直変位関係を示す。鉛直変位の計測位置は試験体中央である。また、図-5に繰り返し載荷部分を除いた全試験体の荷重－鉛直変位関係を示す。ただし、荷重は実験実施断面の降伏荷重 P_y で正規化している。いずれの試験体でも鋼桁が降伏した後、荷重が漸増して床版が圧壊して最大荷重を向えた(図-6)。

もう少し詳しくみると、塑性中立軸が上フランジ内にあったMY1とMY3では、床版にひび割れが発生した後に荷重が低下し、ひび割れの進行とともに僅かながら荷重を保持しながら鉛直変位が増加した。そして、ひび割れが床版を貫通すると同時に荷重が大きく低下した。一方、塑性中立軸がウェブ内にあったMY4ではMY1とMY3とは異なり、床版にひび割れが発生するとともにウェブの圧縮領域に座屈が発生し(図-7)、荷重が大きく低下した。

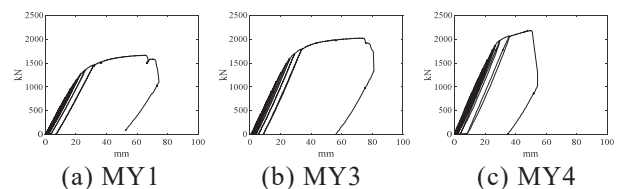


図-4 荷重－鉛直変位関係

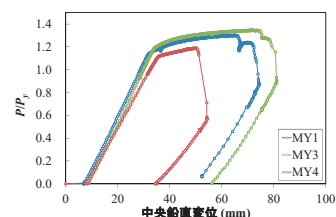


図-5 荷重－変位関係 (繰り返し載荷部分は除く)



図-6 床版の圧壊



図-7 ウェブの座屈

4.2 曲げ耐力

表-2に曲げ耐力の総括を示す。 P_p の計算値は、全塑性モーメントに達するときの載荷荷重であり、鋼桁断面が全て塑性化したとし、コンクリート強度を圧縮強度の0.85倍とした等価ブロックにもとづいて、表-1に示す材料試験結果を用いて計算した。 P_u の計算値はAASHTOとEuro Code (EC)で曲げ耐力を与える載荷荷重であり、それぞれのDuctility条件を用いて計算した。実験値の P_u は載荷荷重の最大値である。表-2から全ての試験体で全塑性モーメントに達したことがわかる。そして、全塑性モーメントに達してから床版が圧壊したこと、欧米が想定する損傷モードと同様となった。しかし、床版が圧壊して荷重が急激に低下することから、2章で述べた課題(3)の観点からは課題があるといえる。

表-2 曲げ耐力

供 試 体	計 算 値				実 験 値	
	D_p/D_t	P_p (kN)	P_u (kN)			P_u (kN)
			AASHTO	EC		
MY1	0.213	1,606	1,479	1,545	1,667	
MY3	0.191	1,930	1,807	1,883	2,028	
MY4	0.247	2,130	1,911	2,006	2,185	

5. まとめ

本研究では、塑性化を考慮した鋼桁設計法の開発に向け、コンクリート床版を有する鋼桁（合成桁）の曲げ耐力実験を行った。

四点曲げ載荷を行った結果、いずれの試験体についても、鋼桁断面の全てが降伏する全塑性モーメントを超え、床版が圧壊して最大荷重に達するまで、荷重が急激に低下することはなかった。また、繰り返し載荷による影響についても、降伏荷重を超えてから残留変形は生じるものの、初期剛性に変化はみられず、また、床版が圧壊して最大荷重に至るまで変状はみられなかった。

よって、現行道示で鋼桁断面を設計し、塑性中立軸が上フランジあるいは床版内にあるようにすれば、非弾性挙動の開始点を超えた強度が期待できる。これは、合成桁設計された既設橋の維持管理の合理化にもつながる知見と言える。また、現行道示よりもウェブの厚さをその高さに対して相対的に薄くした鋼桁断面でも塑性中立軸が上フランジあるいは床版内にあるようにすれば、非弾性挙動の開始点を超えた強度が期待できる。これは、設計の合理化へと結び付く。

今後は、設計法の構築に向けて、図-1の③と⑤を対象とした実験ならびに実験ケースの補間を目的として有限要素法によるパラメトリック解析を行う。

謝 辞

本研究は平成29年度道路政策の質の向上に資する技術研究開発の助成研究として実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編、2017
- 2) 野坂克義、奥井義昭、小室雅人、宮下剛、野上邦栄、長井正嗣：SBHSを用いた鋼I桁の耐力特性に関する実験的研究、構造工学論文集A、Vol.59、pp.70-79、2013.3.
- 3) 日本鉄鋼連盟：鉄骨建築ビデオ教材シリーズ、座屈編、2010.4.
- 4) AASHTO: LRFD bridge design specifications、Eighth Edition、2017
- 5) CEN: Eurocode 3、Design of steel structures、2003
- 6) The National Academies Press: Bridges for Service Life Beyond 100 Years: Service Limit State Design、2015

宮下 剛



長岡技術科学大学大学院
工学研究科環境社会基盤
工学専攻 准教授、博士
(工学)
Dr.MIYASHITA Takeshi

小野 潔



早稲田大学大学院創造
理工学研究科建設工学
専攻 教授、博士 (工
学)
Dr.ONO Kiyoshi