

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職	
	みやした たけし 宮下 剛		長岡技術科学大学		准教授	
②研究 テーマ	名称	部分係数設計に向けた塑性化を考慮した鋼桁設計法の研究開発				
	政策 領域	[主領域] 政策領域4：コスト構造改革	公募 タイプ			
		[副領域]				
③研究経費 (単位：万円)	平成29年度	平成30年度	令和元年度	総合計		
※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと	1 8 9 1	2 3 9 9	2 3 1 1	6 6 0 1		
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏名	所属・役職 (※令和2年3月31日現在)					
小野 潔	早稲田大学・教授					
野阪克義	立命館大学・教授					
北根安雄	京都大学・准教授					
林 偉偉	Aalto University, Associate professor (研究当時：早稲田大学・准教授)					
⑤研究の目的・目標	<p>本研究は、断面の一部塑性化を許容した鋼桁の耐荷力特性を実験および解析により把握することを目的としている。さらに、各国の鋼橋の設計基準を分析し、現在の道路橋示方書では具体的に記述されていない、部材の一部塑性化を考慮した鋼桁の設計法の開発を行う。</p>					

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

H29年度は、合成桁設計法について、国内外の設計基準の調査、整理を研究者間で分担して実施した。また、合成桁の曲げ耐荷力に着目し、研究者間の議論を通じて実験計画を立案し、3体の合成桁曲げ試験体を外注製作した。そして、研究代表者が中心となって曲げ耐荷力実験を行うとともに、研究者間で分担しながら、有限要素法（以下、FEM）による実験の再現解析とパラメトリック解析を行った。

H30年度は、前年度の実験成果をふまえ、合成桁の床版ディテールの検討に向けて、1体の合成桁曲げ試験体を外注製作するとともに、合成桁の曲げ・せん断耐荷力に着目して、4体の合成桁曲げ・せん断試験体を外注製作した。そして、研究代表者が中心となって曲げ耐荷力実験と曲げ・せん断耐荷力実験を行うとともに、研究者間で分担しながら、FEMによる実験の再現解析とパラメトリック解析を行った。

R1年度は、橋システムとしての限界状態の設定ならびに既設橋梁の維持管理に関する知見を得ることを目的に、2体の合成2主桁の曲げ・せん断試験体を外注製作した。このうち1体については、載荷試験の前に、床版の定点移動移動疲労載荷試験を実施して試験パラメータとした。そして、研究代表者が中心となって曲げ・せん断耐荷力実験を行うとともに、研究者間で分担しながら、FEMによる実験の再現解析とパラメトリック解析を行った。さらに、これまでの検討結果をもとに、部分係数設計に向けた塑性化を考慮した鋼桁設計法案を提示した。よって、研究の目的は十分に達成されたと考えている。

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

「実験が本設計法の研究開発にどう結びつくのか。」「設計法の開発には、実験を行える試験体の数が限られているため、数値解析や理論的側面からの検討も不可欠である。」との指摘に対し、限界状態の設定ならびに設計法の開発に向けては、2主桁のケースも含め、はじめに、現行道示で設計された合成桁が有する性能を把握する必要があると考えた。一方、今後に向けては、コスト縮減に向けた構造の合理化や既設橋梁に対する維持管理上の知見を得ることも重要と考えた。本研究では、ウェブ幅厚比を緩和した試験体や事前に床版に損傷を与えた試験体等を製作して耐荷力実験を行うとともに、実験を補完するために、鋼種やウェブ幅厚比、コンクリート強度、曲げ・せん断比率等をパラメータとしたFEMによる多くのパラメトリック解析を実施した。その結果、限界状態の設定ならびに鋼桁の塑性化を許容した設計法に向けた多くの有益な情報を得ることができた。

「桁の設計思想、限界状態や特性値・制限値を整理するにあたり、工学指標や結果整理について、どのような新たな切り口が考えられるか。」との指摘に対しては、既設橋梁との整合性にも配慮する必要があると考え、現行道示で設計された合成桁ならびに塑性中立軸が床版内あるいは上フランジ内となるようにウェブ幅厚比を緩和した合成桁でも、全塑性モーメントに達することを実験と数値解析から確認し、従来の弾性設計を超えた強度を期待できることを明らかにした。さらに、大規模地震が多発するわが国では、非弾性域で、粘り強い構造とすることが重要と考え、床版ディテールの検討ならびに構造システムとしての性能把握に向けた合成2主桁の載荷試験、数値解析を実施した。

③研究成果

(1) 合成桁の曲げ耐荷力 (H29年度)

3体の合成桁試験体を製作し、4点曲げ試験ならびにFEM解析を実施した。1体目 (MY1) は現行道示に基づいてウェブの幅厚比を上限値 ($R_w=1.2$) としたもので、2体目 (MY3) は合理化設計に向けてウェブの幅厚比を大きくしたもので ($R_w=1.3$)、3体目 (MY4) は塑性中立軸位置が耐荷力特性に与える影響を把握するためにMY1の下フランジの幅を広くしたものである。得られた主たる知見は以下である。

- ・ 従来の道示設計で全塑性モーメントに達し、降伏モーメント以降の強度を期待できる。ただし、終局時に床版が圧壊して荷重が急減することから、靱性向上に向けては、床版ディテールの検討が必要である。
- ・ ウェブの幅厚比を緩和しても、塑性中立軸が床版あるいは上フランジ内にあれば、全塑性モーメントに達する。これは、コスト縮減に向けた構造の合理化に結び付くことから、国内外に与えるインパクトは非常に大きい。

(2) 合成桁の曲げ・せん断耐荷力 (H30年度)

1体の曲げ試験体と4体の曲げ・せん断試験体を製作し、載荷試験ならびにFEM解析を実施した。前者については、H29年度の結果を受け、MY1と同一諸元とし、床版内にグリッド筋を配置したものである。後者の内訳は、従来設計 (試験体A, $R_w=1.2$)、ウェブの幅厚比を大きくしたもので (試験体B, $R_w=1.4$)、曲げせん断比率を大きくしたもので (試験体C, $R_w=1.4$)、合成効果の検討に向けて試験体Bと同一諸元で鋼桁と床版間にはく離材を塗布したものである。検討結果から、得られた主たる知見は以下である。

- ・ 曲げ・せん断比率を大きくしたり、 R_w を緩和しても全塑性モーメントに達する。また、床版内の鉄筋配置により、床版圧壊 (最大強度) 以降も粘り強い構造にできる。大規模地震が多発するわが国では、有益な知見である。
- ・ いずれのケースでも曲げ耐荷力とせん断耐荷力の間に相関は見られない。
- ・ 床版と鋼桁の接触面にはく離剤を塗布して合成効果を低減させた試験体でも、剥離剤を塗布しない試験体と同様の荷重-鉛直変位関係ならびに破壊形態を示す。このような鋼桁と床版の合成効果に関する知見はこれまで得られていない。

(3) 合成2主桁の曲げ・せん断耐荷力 (R1年度)

H29年に改定された道示には、構造システムとしての冗長性を期待して、橋システムの限界状態についても言及されている。そこで、R1年度は、橋システムの限界状態の把握に向け、合成2主桁の載荷試験ならびに数値解析による検討を実施した。これまで、このような実験は、実施の難しさからほとんど行われていない。実験における載荷方法は、過年度の載荷試験と同様に、T荷重を模した3点曲げ載荷とした。また、RC床版については、既設橋の維持管理に関する知見も得るために、予め定点移動載荷試験を行い、疲労損傷を与えるケースを設けた。その結果、載荷方法や床版損傷の程度に依るものの、RC床版の損傷程度が異なる2体の試験体について、全体的な力が1本の合成桁と同様とな

⑧研究成果（つづき）

る傾向がみられた。これは橋システムの限界状態に関する知見のみならず、使用性に対しては注意が必要であるものの、大規模地震が発生したあとの緊急車両の走行に関する有益な知見が得られたと言える。このような知見は、これまで、特に実験から得られたことがないため、国内外に与えるインパクトは非常に大きい。

(4) 塑性化を考慮した鋼桁設計法の開発

載荷実験を通じて、剛性の再帰性は、 δ_y を降伏変位とすると、少なくとも $2.0\delta_y$ まで確認されており、この再帰性は床版にひび割れが発生する最大荷重 P_{max} まで有する。床版にひび割れが発生すると、荷重は増加せず、変位が増加する。そして、変位が $3.0\delta_y$ となるあたりで、荷重が急激に低下する。これ以降に、いくつかの試験体では繰り返し載荷を実施したところ、損傷が進行し、剛性の再帰性はみられていない。これらを考慮すると、道路橋示方書にある部材としての限界状態は、以下とすることが考えられる。

- | | |
|-------|--|
| 限界状態1 | P_y (降伏荷重) |
| 限界状態2 | P_p (全塑性モーメントに達する荷重) あるいは床版上段鉄筋の降伏点 |
| 限界状態3 | P_{max} (最大荷重点) , ただしDuctility条件を設ける |

ここで、限界状態2については、コンクリートの材料としての機械的性質のばらつきが鋼材のそれと比較して大きいことから、全塑性モーメントに達する荷重 P_p ではなく、床版上段鉄筋の降伏点とすることも考えられる。限界状態3については、RC床版コンクリートの圧壊ひずみに達する荷重と考えてよい。ただし、AASHTOならびにEurocodeを参考に、コンパクト断面の条件を満たす場合でも、コンクリートの圧壊により全塑性モーメントに到達できない場合があるため、Ductility条件を設けるのが良い。また、AASHTOならびにEurocodeでは、このDuctility条件の前提条件として、終局限界状態の照査におけるコンパクト断面の曲げ耐力評価に、鋼種に対する制限を設けている。例えば、AASHTOでは鋼材の降伏強度の規格値が 485 N/mm^2 を上回らないこととしている。これをふまえると、わが国では、降伏点の規格値が 500 N/mm^2 以上であるSBHS500を用いた合成桁に対しては、十分なデータの蓄積が必要といえる。また、鋼桁腹板の最小腹板厚については、検討結果にもとづくと、SM490Yについて、 $b/124$ から $b/143$ への緩和が可能と言える。ただし、垂直補剛材と鉛直補剛材の配置は道路橋示方書に従うとする。この結果は、鋼重低減に結び付くため、鋼系橋梁の競争力を向上させる。

一方、全塑性モーメントを越え、床版が圧壊して最大荷重に達した以降でも、耐力が急激に減少しなければ、橋の構造的機能は失われていない。さらに、構造部材ではなく、構造システムとして橋構造を考えると尚更である。この場合、上記の限界状態2を部材の P_{max} よりも大きくすることができ、可能性がある。そこで、R1年度には、橋の構造システムとしての限界状態の把握ならびに既設橋の維持管理に対する知見を得ることを目的として、事前に定点移動疲労載荷試験を行うことで損傷を与えたRC床版を有する合成2主桁試験体の3点曲げ試験を行った。その結果、RC床版の損傷程度が異なる2体の試験体について、全体的な力学的挙動が同様となる傾向がみられ、数値解析による検討ともあわせ、橋の構造システムとしての限界状態を設定する上で、有益な知見が得られた。

⑨研究成果の発表状況

- Yuxiang Zhang, Weiwei Lin and Heang Lam: NUMERICAL STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF INTACT COMPOSITE TWIN I-GIRDER BRIDGES, Proceedings of the 12th Pacific Structural Steel Conference (PSSC2019), 2019.11.
- 佐藤悠樹, 宮下剛, 小野潔, 方超越, 白戸真大, 橘肇: 限界状態設計法に向けた合成桁の曲げ耐荷力実験, 第33回日本道路会議, 2019.11.
- Kang LIU, Weiwei LIN, Kiyoshi ONO, Takeshi MIYASHITA, Masahiro SHIRATO : NUMERICAL STUDY OF COMPOSITE BEAMS SUBJECTED TO COMBINED SHEAR AND BENDING, 第13回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2019.11.
- 方超越, 小野潔, 宮下剛, 白戸真大, 佐藤悠樹, 橘肇: RC床版と鋼桁上フランジの付着が合成桁の弾塑性挙動に与える影響に関する実験的研究, 第13回複合・成構造の活用に関するシンポジウムに関するシンポジウム, 2019.11.
- 宮下剛, 松澤和憲, 中村洋介, 小野潔, 林偉偉, 野阪克義, 北根安雄, 白戸真大, 橘肇: 限界状態設計法に向けた合成桁の載荷実験, 第37回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, 2019.11.
- 高橋誠汰, 宮下剛, 小野潔, 林偉偉, 野阪克義, 北根安雄, 白戸真大, 橘肇: 床版ディテールが合成桁の曲げ耐荷力に与える影響, 第74回土木学会年次学術講演会, 2019.9.
- 宮下剛, 松澤和憲, 小野潔, 林偉偉, 野阪克義, 北根安雄, 白戸真大, 澤田守, 橘肇: 部分係数設計に向けた合成桁の曲げ耐荷力実験, 第73回土木学会年次学術講演会, 2018.8.
- Heang Lam, Jiawei Chen, Weiwei Lin, Kiyoshi Ono, Takeshi Miyashita: Numerical Study on the Mechanical Behavior of the Steel-Concrete Composite Beam, 第73回土木学会年次学術講演会, 2018.8.

⑩研究成果の社会への情報発信

研究室HP :

<https://whs.nagaokaut.ac.jp/struct/>

<http://www.ono-lab.sci.waseda.ac.jp/index.html>

⑪研究の今後の課題・展望等

我が国では、コスト削減に向けた構造の合理化とともに、大規模地震が多発することから、床版が圧壊したとしても、桁構造で機能を確保するといったように、粘り強い構造とすることが強く求められる。これに向けては、実験も含めた以下の検討が求められる。

(1) 水平補剛材を有する合成桁の曲げ耐荷力の把握

現状では、ウェブに配置した水平補剛材が曲げ耐荷力に与える影響についての知見が不足している。このため、H29年度の検討で、ウェブに座屈が見られた試験体をベースに、ウェブに水平補剛材を設け、載荷試験を行い、粘り強い構造を目指すことが考えられる。結果として、ウェブ幅厚比の緩和も期待される。また、数値解析による実験結果の補完も必要である。

(2) 水平補剛材を有する合成桁の曲げ・せん断耐荷力の把握

H30年度の曲げ・せん断耐荷力に関する検討では、曲げが卓越する試験体で、最大荷重を超えた以降にウェブの座屈が見られた。このため、(1)と同様に、粘り強い構造を目指して、水平補剛材が耐荷力に与える影響について把握することが考えられる。

⑫研究成果の道路行政への反映

- ・ 本研究の成果にもとづいて、限界状態や設計法を道路橋示方書に反映することで、部分係数設計法が導入された道路橋示方書の改定効果を最大化することができる。また、その結果、我が国の道路橋設計の国際的な競争力の向上に結び付く。
- ・ 床版に疲労損傷を与えた合成2主桁の曲げ・せん断耐荷力の検討から、使用性に対しては注意が必要であるものの、大規模地震が発生したあとの緊急車両の走行や既設橋梁の維持管理に関する有益な知見が得られたと言える。

⑬自己評価

本研究から得られた新たな主たる知見を以下にまとめる。

- ・ 現行道示で設計された合成桁ならびに塑性中立軸が床版内あるいは上フランジ内となるようにウェブ幅厚比を緩和した合成桁でも、全塑性モーメントに達し、従来の弾性設計を超えた強度を期待できる。
- ・ 従来、知見がなかった曲げ・せん断比率の範囲で合成桁の耐荷力に関する検討を行い、曲げ耐荷力とせん断耐荷力の間に相関は見られないことを明らかにした。
- ・ 床版と鋼桁の接触面にはく離剤を塗布して合成効果を低減させた試験体でも、剥離剤を塗布しない試験体と同様の荷重-鉛直変位関係ならびに破壊形態を示した。これは、鋼桁と床版の合成効果に関して、特に実務に向けた有益な知見と言える。
- ・ 橋の構造システムとしての限界状態の把握に向けた合成2主桁の検討から、荷重方法や床版の損傷程度には依るとされるものの、橋システムの限界状態に関する知見のみならず、大規模地震が発生したあとの緊急車両の走行に関する有益な知見が得られた。

以上、これまでにない知見や今後により有益となる知見が多く得られたことから、本研究に対する投資効果は十分にあったものと判断する。