

合成桁の負の曲げモーメントにおける残留回転角に関する研究

Studies on Permanent Rotation of Composite Girder under Negative Bending Moment

谷平 勉* 岡本 安則** 川上 順子***

Tutomu TANIHIRA Yasunori OKAMOTO and Yoriko KAWAKAMI

*工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科 (〒577東大阪市小若江3-4-1)

**工修 (株)川田建設 工事部 (〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)

***工修 阪神高速道路公団 神戸第二建設部 (〒650神戸市中央区東川崎町1-3-3)

In Auto-Stress Design Method specified by AASHTO for braced composite girder bridge, moment versus permanent rotation relationship by negative bending moment is important part of design procedure. This paper presents the comparison of experimental results, analytical results and Design curves specified in AASHTO's ASD. Test girders are fabricated as a portion of interior support of two span three girder bridge which is designed composite girder as live load. Then the slab concrete are placed after bend by dead load moment. As steel girder, rolled H beam on flange of which have embossed surface are used to be high composite performance. Numerical analysis takes into consideration of not only the composite performance also residual stress of rolled H beam. Furthermore the influence of yield stress of tensioned concrete and local buckling of flange are considered as the parameter on analysis. The experimental results show less permanent rotation than AASHTO's curves. The composite performance factor of test girder from which AASHTO's curves were derived are estimated by this analysis.

Keyword: composite girder, negative bending moment, residual rotation

1. まえがき

わが国の現行の道路橋設計示方書は、弾性理論を基本とした許容応力度設計法により定められている。しかし実際には構造物は、ある部材が降伏点を越えて局所的に塑性化しても一定の限界状態には至らない場合もある。その鋼材のある許容される塑性域を積極的に活用する設計法である塑性設計法の概念は今のところわが国の示方書において取り入れられていない。各国の設計示方書は許容応力度法から、設計の種々の段階に含まれる様々な不確定要素を考慮するために、荷重効果に対し部材または構造全体の強度を確保する限界状態設計法に移行しつつある。わが国でもその切り替えが進行中であるが、この中に塑性設計の合理性が組み入れられることが可能と考えられる。米国では、AASHTOにおいて塑性設計法の概念を取り入れた、より経済的な連続橋の設計を行うための設計法であるオートストレス設計法(ASD)¹⁾が規定された。本研究は、ASD法において重要な概念である、モーメント-残留回転角関係をわが国の道路橋設計示方書に従い設計された合成桁について実験的、解析的に求める事を目的とするものである。

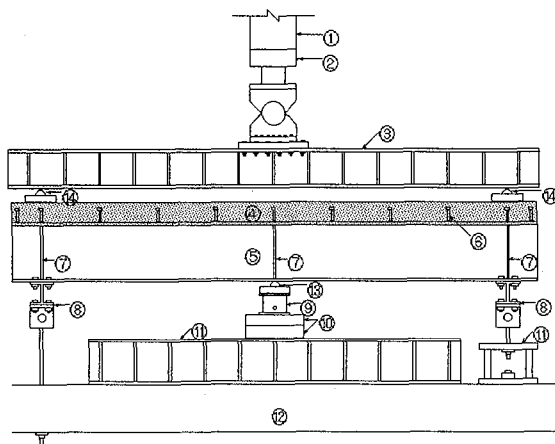
2. オートストレス設計法の概要

現行のAASHTOの荷重係数設計法(LFD)を含む米国の鋼橋の設計法は、部材の降伏による影響を考慮する場合もあるが、基本的には弾性理論に基づいている。ASD

法はLFD法の拡張であり、LFD法と同じく荷重レベルを供用荷重、超過荷重、最大荷重の3段階に分け、それぞれの荷重段階に応じた荷重係数と要求される構造的性能を設定している。LFD法と大きく異なる点は超過荷重の段階で連続合成桁の中間支点上の負モーメントが弾性域を越えて局所的に塑性化する事を容認することである。そしてこの時に生じる残留モーメントを支間モーメントに再分配する考えを取り入れる事により経済的な連続橋の設計を実現している。またこの時に生じる永久たわみはあらかじめ製作そりとして考慮している。従ってこの設計法を用いる場合は、あらかじめ合成桁の負モーメントによるモーメント-残留回転角関係を把握する必要がある⁴⁾。

3. 実験

わが国の道路橋設計示方書に基づき3主桁2径間連続活荷重合成桁を設計し、その中桁の中間支点をはさむ負モーメント域4.5mに着目し実験桁として製作した。Fig. 1に試験体の載荷概要図を示す。図中⑧に示すような死荷重に相当する荷重を載荷するための部材を鋼桁の端部に取り付け、これを鋼棒により実験室の床に連結し、鋼桁のみの状態の時に床下で鋼棒を締め付ける事により鋼桁の端部を下方に引っ張り、設計計算により算出された所定の死荷重モーメントをかけた。この後、床版の打設を行う事により活荷重合成桁とした。本試験では載荷梁を



- | | |
|-------------------|-----------------------|
| ① 200tf Actuator | ⑧ Member of Loading |
| ② Load Cell | ⑨ Load Cell Dead Load |
| ③ Loading Beam | ⑩ Supporting Plate |
| ④ RC Floor Slab | ⑪ Supporting Base |
| ⑤ H-Section Steel | ⑫ Floor of Laboratory |
| ⑥ Stud | ⑬ Interior Support |
| ⑦ Stiffener | ⑭ Loading Support |

Fig. 1 Test Apparatus

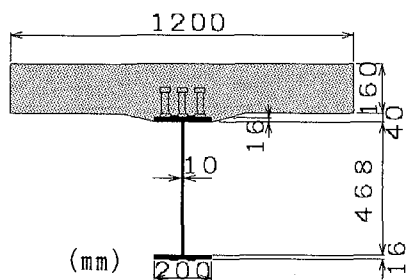


Fig. 2 Test Girder

Table.1 Specimen List

Specimen	Upper Flange	Stud	
		Shap Transversly Arrangement	
T. G. 1	Patterned	Type	3
T. G. 2	non-Patterned	Type	3
T. G. 3	Patterned	Type	2
T. G. 4	non-Patterned	Type	2
T. G. 5	Patterned	Type	1

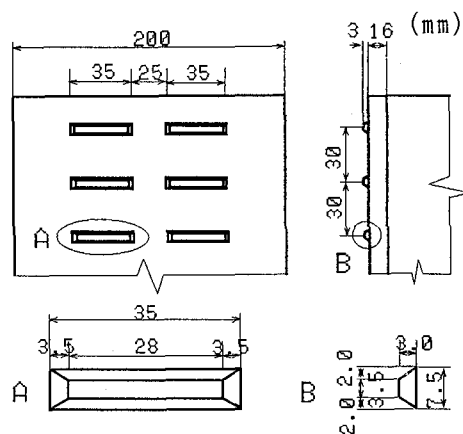


Fig. 3 Surface of Flange

通じて試験桁の両端に活荷重モーメントに相当する集中力を静的繰返し載荷し、試験桁の両端の残留たわみの和を桁長の半分で除したものを残留回転角とした。試験体の断面形状は、鋼桁高500mm、床版幅120cm、床版厚16cm、ハンチ高4cmとした。Fig. 2に断面図を示す。

合成桁における残留回転角は、鋼桁とコンクリート床版との合成作用の違いにより変化する。そこで本実験では合成作用の影響が異なるようにずれ止めの条件を変えた試験体を5体製作した。試験体1, 3, 5は、縞突起がフランジの表面に付いた鋼桁を、スタッドと併用する事により合成作用の強い試験体とした。縞突起の形状と配置をFig. 3に示す。試験体2, 4はスタッドのみを用いた試験体である。またそれぞれの試験体のスタッドの形状や本数の違いにより生じる残留回転角の相違も検討した。Type 1のスタッドはφ22、高さ10cmの頭つき普通丸鋼で通常よく用いられているものである。Type 2のスタッドはφ13、高さ18cmの異形棒鋼である。スタッドの橋軸方向の配置は各試験体とも同様で50cmピッチに配置し、橋軸直角方向に配置する本数を変化させた。Table. 1に各試験体の構成を示す。

なお 本試験に用いた各材料の強度は次の通りである。鋼桁の降伏応力は実験桁1, 3, 5では桁から切り出した試験片の平均値2590kg/cm²であり、試験体2, 4では3000kg/cm²、コンクリートの圧縮強度は同じく267kg/cm²、鉄筋の降伏応力は2980kg/cm²であった。

4. 実験結果と考察

Fig. 4に各試験体におけるモーメント比-残留回転角関係を示す。グラフの縦軸は各荷重サイクルの最大載荷荷重による中間支点におけるモーメントを全塑性モーメントMpで除した比である。全塑性モーメントMpは、床版コンクリートのコンクリートを無視し、橋軸鉄筋のみを考慮にいれて計算を行った値で、鋼材の強度試験の結果から試験体1, 3, 5（縞付きH鋼）ではMp=-82.7tfm、試験体2, 4（縞無しH鋼）ではMp=-99tfmであった。横軸はそ

の最大載荷荷重を除荷したときの残留たわみより求めた残留回転角 θ_p である。残留回転角はフランジの表面の縞突起の有無により傾向がはっきりと現れた。モーメント比0.5付近まではほぼ同じであるが、それ以降は縞のある試験体1, 3, 5の残留回転角は縞の無い試験体2, 4よりも小さくなっている。これは縞突起の効果が十分にあり、終局近くまで合成桁の合成作用がよく保たれたものと考えられる。縞付きH鋼を用いた試験体1, 3, 5では、モーメント比0.8付近まではほぼ同様の残留回転角が生じており、スタッドの形状や本数に依らない事からスタッドよりも縞の効果が大きい事を示すものと考えられる。縞無しH鋼を用いた試験体2, 4ではモーメント比0.3付近より残留回転角に違いが生じ、試験体2の方が生じる残留回転角が小さい。縞突起の無い場合はスタッドのみの効果となるので、より剛なスタッドである普通丸鋼を用いた試験体2の方が合成作用が強いためと考えられる。またモーメント比0.3付近は、コンクリート床版にひび割れが発生し始めた段階であり、この前後で床版コンクリートとフランジ上面の自然付着が消滅し、ずれが発生するという現象と一致する。

本実験の曲線と、AASHTOのGuide Specification²⁾に規定された曲線とを比較すると、終局付近において、そしてモーメント比0.2付近まではよく似た値を得た。しかしその他の部分では曲線の形が異なり、本実験において得られた残留回転角の方が小さい。このことよりAASHTOの実験桁の合成作用が、本実験の実験桁よりかなり弱いものと考えられる。

5. 解析

AASHTOのGuide Specification に規定されているモーメントー残留回転角関係の曲線はAASHTOの規定により設計された断面を用いた実験値によるものである。今後、わが国の道路橋設計示方書にこの設計法の概念を取り入れる場合、道示に基づく断面におけるモーメントー残留回転角関係を求める必要がある。本研究では解析によりモーメントー残留回転角関係を求める事を試みた。

解析方法は、桁断面を分割し、要素毎の材料の応力歪関係より中立軸を試行錯誤で探るという数値計算を用いた。この時に理想化された材料であるという条件で解析を行うと、残留回転角が実験値より小さくなる。そこで本研究では材料の特性としての鋼桁の残留応力、圧縮フランジの局部座屈、コンクリートの引張強度の評価の違いによる影響を考慮した。さらに床版と鋼桁の合成作用の影響を考慮して解析を行い、実験値との差異を検討した。Fig. 5にこれらの計算手順をフローチャートに示し、以下に説明を加える。

なお解析に用いた材料特性は、実験桁の材料試験に基づいた数値であり、鋼材のヤング係数は $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、コンクリートのヤング係数は $2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、応力歪み関係は完全弾塑性とした。

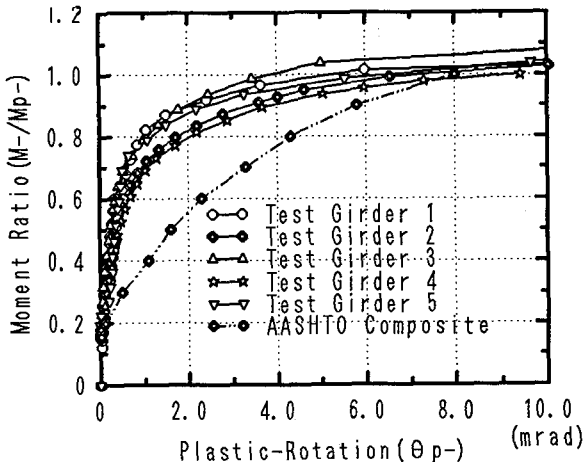


Fig. 4 Moment Ratio-Plastic Rotation

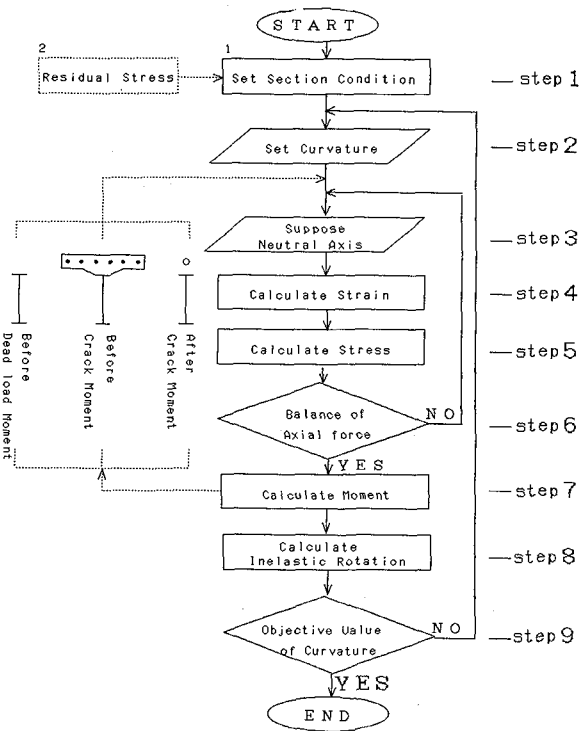


Fig. 5 Flow Chart

Step 1-1 断面条件の設定

断面の寸法を設定し、高さ幅方向に分割する。Fig. 6に要素分割模式図を示す。

各材料特性を設定する。局部座屈の影響は、下フランジの降伏応力を減じることにより考慮した。コンクリートの引張強度は圧縮強度のほぼ10分の1と推定されるが、実際には板としての二次元的な拘束や鉄筋との付着による影響によりそれより強くなると考えられる。そこで圧縮強度の10分の1を基準にその2倍、3倍の場合を検討した。

Step1-2 残留応力を見込む

鋼桁の残留応力に相当する残留歪はFig. 7のように分布する³⁾とし、各要素の歪の初期値として与える。

Step7 モーメントの算定

算定されるモーメントに対して解析対象となる断面が変化する。死荷重モーメント以前では鋼桁のみ、ひび割れモーメント以前では合成断面、それ以降は鋼桁と鉄筋のみを解析対象とする。断面が変わる事により中立軸の位置も変化するので中立軸を仮定し直し、力の釣合いが取れるまで計算を繰り返す。このとき合成作用の低下が生じた場合、床版及び鋼桁の軸力が減少し、それに伴って同じ曲げモーメントの値を維持するために曲率が増加する。この場合その軸力の減少率を1から差し引いた値を合成度として評価し、曲げモーメントー曲率関係を算定した。

Step8 残留回転角の算定

前ステップまでに得られたモーメントー曲率関係から荷重を除荷したときの残留曲率とモーメントの関係を求める。残留回転角は微小長さにおける残留曲率を桁の全長に渡って積分することにより求められる。

6. 解析結果と考察

Fig. 8に実験値、解析値、AASHTOに規定されている値のモーメント比-残留回転角関係を示す。図の横軸は残留回転角を、縦軸は載荷モーメントを全塑性モーメントで除した値を示している。解析における縦軸は算定されるモーメントを圧縮フランジの局部座屈を考慮した曲げ強度により除した値である。Analysis1は本実験に用いた断面を解析したものである。Analysis2は米国Turner-Fairbank連邦高速道路局研究センターにおける実験に用いられたプレストレストコンクリート床版を用いた合成桁を解析したものである。図中に α 、 β 、 γ 、 δ とあるのはこの解析に用いたパラメーターである。 α は鋼桁の残留応力 σ_r が降伏応力 σ_y に対してどの程度の割合で存在するかを示す係数($\sigma_r = \alpha \times \sigma_y$)である。 β は下フランジの局部座屈の影響を考慮するために下フランジの降伏応力にかかる減少係数である。 γ はコンクリートの引張強度が圧縮強度の10分の1を基準にその何倍の強度を持つかを示す係数である。 δ は床版と鋼桁の合成度を示す。

LFD法では、負のモーメントに対するフランジの応力を $0.8 \times \sigma_y$ に制限している。よってFig. 8では、 $\beta = 0.8$ を基準に考え、残留応力が降伏応力と等しく存在する場合(図中 $\alpha = 1.0$ 、点線)、残留応力が存在しない場合(図中 $\alpha = 0.0$ 、実線)、また、残留応力が存在せず下フランジの局部座屈の影響も考慮しない場合(図中 $\alpha = 0.0$ 、 $\beta = 1.0$ 、二点破線)について解析を行った。まず β を等しくし、残留応力の有無によって解析を行ったもの(図中、点線と実線)の比較を行う。図に示されているように弾塑性域において生じる残留回転角がかなり異なる。このことより残留応力の存在により残留回転角が大

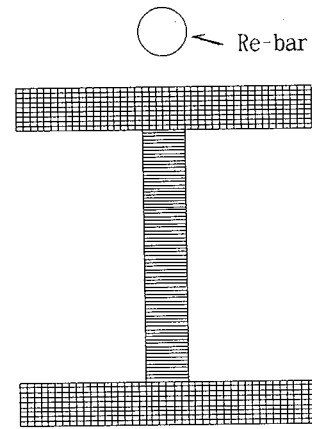


Fig. 6 Divided Section

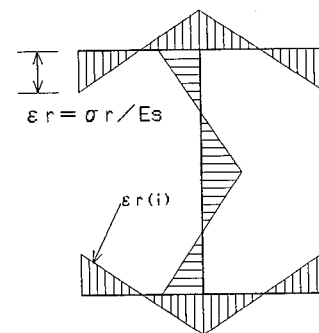


Fig. 7 Residual Strain

きくなる事が分かる。次に残留応力が存在しないとした時($\alpha = 0.0$)の、局部座屈の影響を考慮した場合と考慮しない場合(図中、実線と二点破線)の比較を行う。終局近く若干、局部座屈の影響を考慮した時の方が生じる残留回転角が大きいが、ほぼ同様である。逆に弾性域を越えた辺りの残留回転角は残留応力を考慮しない時の方が大きく、下フランジの強度がこの領域にも影響を及ぼすことが分かる。

次に材料特性の個々の影響について検討した。

残留応力の影響について

Fig. 9に下フランジの降伏応力の減少係数を $\beta = 0.8$ に固定し、残留応力の係数が $\alpha = 1.0$ 、 $\alpha = 0.5$ 、 $\alpha = 0.3$ の場合の解析結果を示す。 $\alpha = 0.3$ の時と $\alpha = 0.5$ の時では残留回転角の差は殆ど無いが、 $\alpha = 1.0$ の時ではかなり大きくなる。過去のデータでは鋼桁に存在する残留応力は降伏応力の50%程度であると言われており、これを上限に残留応力を見込むのが妥当と考えられる。

局部座屈の影響について

Fig. 10に残留応力の係数を $\alpha = 0.5$ に固定し、下フランジの降伏応力を、 $\beta = 1.0$ 、 $\beta = 0.9$ 、 $\beta = 0.8$ の場合の解析結果を示す。終局近くで僅かに差があるものの、ほ

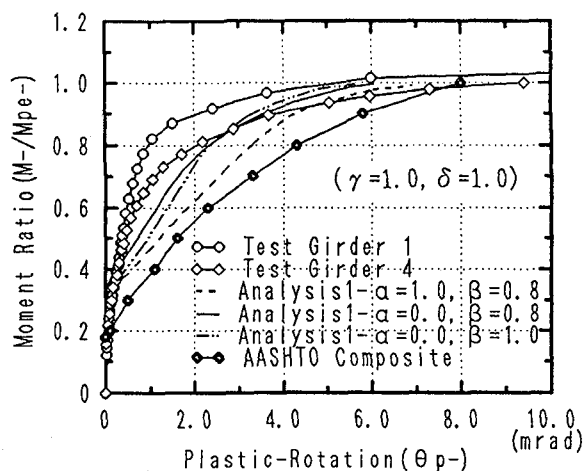


Fig. 8 Moment Ratio-Plastic Rotation

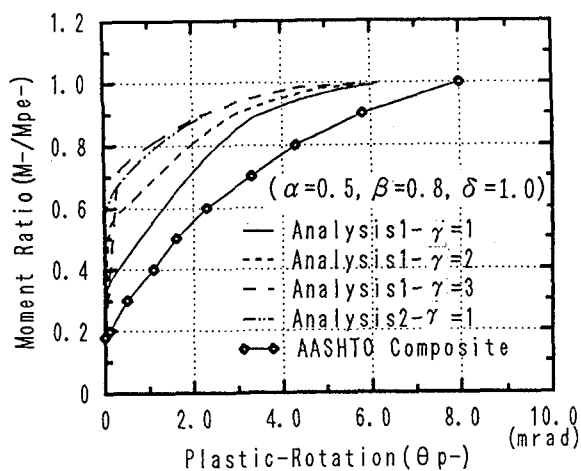


Fig. 11 Moment Ratio-Plastic Rotation

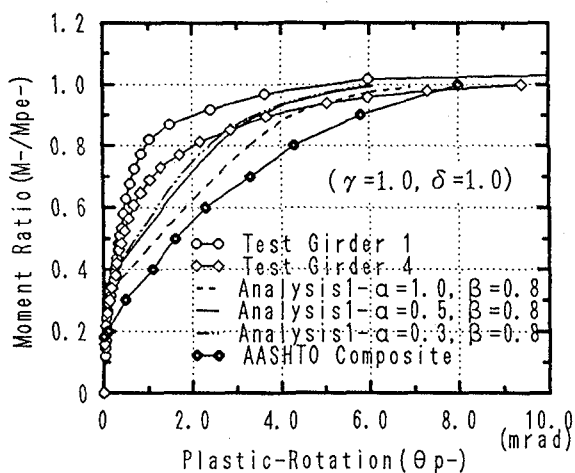


Fig. 9 Moment Ratio-Plastic Rotation

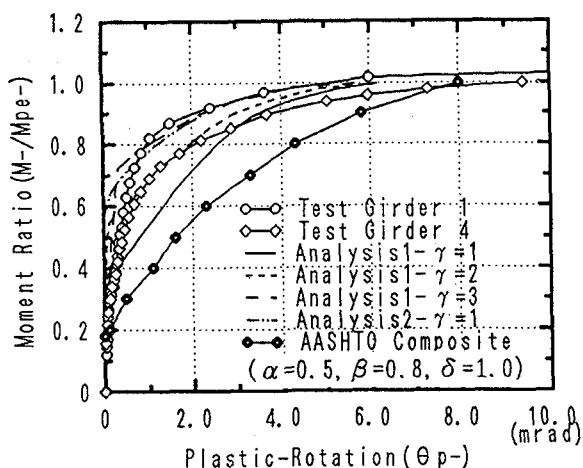


Fig. 12 Moment Ratio-Plastic Rotation

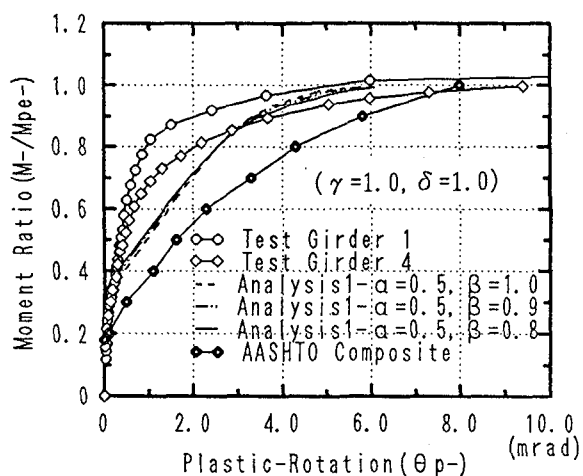


Fig. 10 Moment Ratio-Plastic Rotation

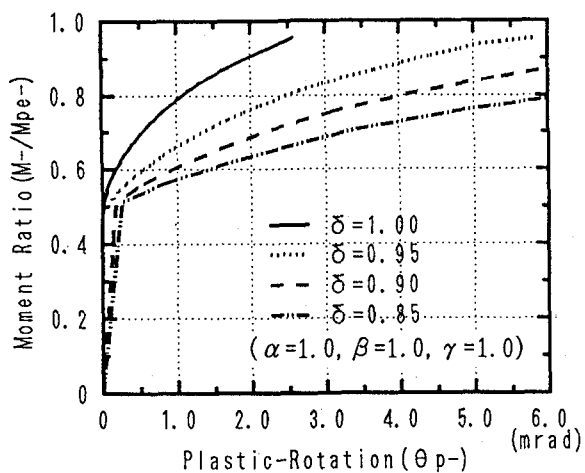


Fig. 13 Moment Ratio - Plastic Rotation

ば同様の曲線を得た。

コンクリートの引張強度の影響について

当初は理想化された材料であるという条件で解析を行うと得られる残留回転角が実験値よりも小さくなると予想した。そして合成桁の耐力に影響を及ぼす因子として残留応力と局部座屈に着目し、これを解析に盛り込む事により実験値に近づけようというのがねらいであった。しかしFig. 8に示したように解析結果は終局近くでは比較的近い値をもつものの、弾性限界を越える辺りの残留回転角は実験値よりも大きくなった。これにより弾塑性域における材料の強度のうち特にコンクリートの引張強度の影響が大きいことが判明しその影響をパラメータ的に扱うことにした。

Fig. 11に $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.8$ 、 $\delta=1.0$ に固定し、コンクリートの引張強度を変化させた場合の解析結果を示す。Analysis1の三本の曲線を比較すると終局では生じる残留回転角はほぼ同様であるが、モーメント比0.4付近から終局近くまでは、コンクリート強度を上げる毎に生じる残留回転角は小さくなっている。これよりコンクリートの引張強度が解析結果にかなり影響を及ぼす事が分かる。Analysis2は、断面の形状が今回の解析に用いた断面と異なるが $\gamma=3.0$ の時の曲線とよく似ている。Analysis2は、プレストレストコンクリート合成桁を解析したものである。コンクリートにプレストレストがかけられており、Analysis1の場合のコンクリート引張強度を強くしたときの曲線と形が似たものと考えられる。

Fig. 12にこれらの曲線と実験結果を比較したものを示す。最初のコンクリートの引張強度の設定($\gamma=1.0$)では実験値とかなり曲線の形が異なるが、コンクリートの引張強度を2倍、3倍($\gamma=2.0, 3.0$)に設定する事により実験値とかなりよく似た曲線を得た。これより本解析の弾塑性域における材料の強度の評価のうち、コンクリートの強度が実際より少なく見積もられていると考える事ができる。本解析では、床版のコンクリートが引張強度を越えてひび割れを起こした後はコンクリートの強度を0として解析を行っている。しかし実際はコンクリートがひび割れを起こした後も、ひび割れとひび割れの間の部分では、ある程度、強度を維持しながら合成作用に寄与していると考えられる。その場合のコンクリートの強度を合成作用に加える必要があると考えられる。従って今後の課題として、床版コンクリートのRC部材としての強度低下の過程のメカニズムを定式化し、今回行った解析に盛り込むことで、より実験値に近づけることができると考えられる。

合成作用の影響について

実験結果より合成桁の合成作用の違いが生じる残留回転角に影響を及ぼす事が判明している。そこで $\alpha=1$ 、 $\beta=1$ 、 $\gamma=1$ という条件下で合成度を変化させ解析を行った。Fig. 13にその解析結果を示す。断面条件はAnalysis2に用いたものと同じである。これにより合成作用の強い合成

桁ほど生じる残留回転角が小さくなる事が定性的に表現できた。

7. 結論

- 1) 合成作用の違いが、合成桁に生じる残留回転角に影響を及ぼす。合成作用の強い合成桁ほど生じる残留回転角は小さい。
- 2) 断面を要素に分割し要素毎の材料の応力歪関係から断面の中立軸の位置と曲率を試行錯誤で探るという数値計算により、これまで実験によってのみ得られていたモーメント-残留回転角関係にある程度、解析により求める事ができたと考えられる。
- 3) 実験値と比較して、解析値は弾塑性域において生じる残留回転角が大きい。本解析ではコンクリートが引張強度を越えた後、コンクリートの強度を無視しているが、実際はそれ以降もコンクリート床版はある程度強度を維持し、合成作用に寄与していると考えられる。今後の課題として、このコンクリート床版のRC部材としての強度低下のメカニズムを定式化し、今回行った解析に盛り込むことで、より実験値に近づける事ができると考えられる。
- 4) 合成作用の違いにより、生じる残留回転角が変化する事を解析により定性的に求める事が出来た。今後は実験で用いたスタッドの密度と合成作用の関係について定量的に捉え、解析に盛り込む必要があると考えられる。
- 5) モーメント比-残留回転角関係は、合成桁の種々の条件の違いにより、かなり曲線の形が異なる。しかし、AASHTOのGuide Specificationでは、オートストレス設計を行う場合、一つの曲線をもって任意の断面に対して基準としているように受け取れる。そこで今後この設計法の概念を取り入れる場合、種々の条件の断面に対するモーメント-残留回転角関係が定式化される必要があると考えられる。その際に、実験によるだけでなく本研究で示した解析法が役立つものと考えられる。

(参考文献)

- 1) Geerhard Haaijer, Phillip S. Carskaddan, Michael A. Grubb; Autostress Design of Steel Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.109, No.1, pp.188-199, January 1983
- 2) Guide Specification for Alternate Load-Factor Design Procedures for Steel Beam Bridges Using Braced Compact Sections; American Association of State Highway and Transportation Officials, Draft copy, 1985
- 3) C.S. Cai, X.L. Liu, and W.F. Chen, Further Verifications of Beam-Column Strength Equations, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.117, No.2, pp.501-513, February 1991
- 4) T. Tanihira, W. Hong, P. Albrecht; Permanent rotation of composite girders under negative bending moment, Proceedings of the 4th ASCCS International Conference of Steel-Concrete Composite Structures, 1994 (1994年9月14日受付)