

論文 逆ランガー桁橋における鋼製補剛アーチリブの耐荷力に及ぼす充填コンクリートの効果

安 永日^{*1}・松村 政秀^{*2}・北田 俊行^{*3}

要旨: 本論文では、無補剛矩形鋼断面およびコンクリート充填矩形鋼断面からなる補剛アーチリブの逆ランガー桁橋を対象に、合理的なコンクリート充填構造について検討している。そのため、鋼断面補剛アーチリブにコンクリートを充填しない場合、部分的に充填する場合、および全長に渡って充填する場合の3ケースを対象に、骨組構造としての弾塑性有限変位解析を行っている。この解析結果により、コンクリート充填鋼管の耐荷力および剛性に及ぼす充填コンクリートの効果、および充填コンクリートへの鋼管による拘束効果について考察している。

キーワード: コンクリート充填鋼部材, 耐荷力, 補剛アーチリブ, 拘束効果

1. はじめに

コンクリート充填鋼管は、充填コンクリートにより鋼管の断面内方向への変形が拘束され、同程度断面の中空鋼管に比べると大きな変形性能、剛性、および耐荷力を有している。また、充填コンクリートの拘束効果により、単なる鋼管と充填コンクリートとの累加強度より高い耐荷力を得ることが可能である。そのため、コンクリート充填鋼管を用いると、作用断面力が同程度であれば、中空鋼管を用いた場合の断面(鋼管で囲まれた部分の断面積)より断面が小さくなる。

橋梁構造物では、たわみや断面寸法等の制約、地震荷重に対する変形性能、および車両衝突による鋼管の座屈防止などを目的とし、コンクリート充填鋼管構造は、橋脚、斜張橋の塔などに幅広く適用され¹⁾、今後もコンクリート充填鋼管を採用した橋梁構造物が増え続けるものと考えられる。ところが、コンクリート充填鋼管をアーチ橋に適用した事例、あるいはそれらに関する研究も少ないのが現状である²⁾。また、近年の交通量の急激な増加や車両の大型化、および耐震基準の更新に伴い、既設の橋梁に対して、

耐荷力および耐震性の向上を図る必要が生じている場合が多い。中空鋼管リブアーチ橋の場合、既存のアーチリブにコンクリートを充填することによって、耐荷力および変形性能を向上させることも合理的な補強方法であると考えられる。

このような背景をふまえ、本研究では、矩形断面鋼管の補剛アーチリブを有する既設の逆ランガー桁橋を対象とし、補剛アーチリブにコンクリートを充填しない場合、充填する場合、および部分的に充填する場合の耐荷力解析を行い、コンクリートを充填した効果、および鋼管による充填コンクリートへの拘束効果に着目して、各解析ケースの耐荷力および剛性について考察している。

2. 対象とした逆ランガー桁橋の概略

2.1 基本条件

解析対象とした逆ランガー桁橋は、図-1に示すように、1965年にTL-20の活荷重を考慮して設計された3径間連続逆ランガー桁橋であり、支間長 L は112,000mm、ライズ R は16,870mmである。補剛アーチリブの無補剛矩形断面のフランジには、基部からクラウン部方向に幅530mm、板厚は22mm, 19mm, および16mmの3

*1 大阪市立大学 大学院工学研究科 都市系専攻 橋梁工学研究室研修生 工修 (正会員)

*2 大阪市立大学 大学院工学研究科講師 工博

*3 大阪市立大学 大学院工学研究科教授 工博

種類の鋼板, ウェブには幅は 550mm, 板厚 25mm の SM490 材の鋼板が用いられている。

2.2 解析モデル

本研究では, 補剛アーチリブにコンクリートを充填することによる補剛アーチリブの耐荷力および剛性に与える効果について検討するため, 補剛アーチリブ, 横繋ぎ材, 支柱, および同一横断面内にある 2 本の支柱からなるラーメン構造の横梁は弾塑性梁柱要素, 床版を支える主桁, 縦桁, および横桁は弾性梁柱要素でモデル化した。なお, 床板とそれを支える主桁とは非合成構造であり, 解析において, RC 床板の剛性は考慮していない。また, アーチ基部はピン支持とし, 主桁と橋台との接続部はローラー支持とした。実際には, コンクリート充填鋼管の鋼管と充填コンクリートとの境界では剥離および局所的なひび割れなどの現象が生じることが推定できる。しかし, 本研究では, 鋼管と充填コンクリートとの接合は自然付着を対象としており, それらの現象は β というパラメータを用いて, 鋼管による充填コンクリートへの拘束効果とともに, 実験的に考察することとしている。耐荷力解析には, 立体骨組鋼橋構造物の弾塑性有限変位解析プログラム EPASS³⁾を用いた。

解析に用いた鋼材のヤング係数は $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, ポアソン比は 0.3, および降伏点は 315N/mm^2 であり, ひずみ硬化は考慮していない。充填コンクリートのヤング係数は $2.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, ポアソン比は 0.167, および設計圧縮強度は 24N/mm^2 とした。また, 鋼管による拘束効果を考慮する場合, 充填コンクリートの圧縮強度⁴⁾は, 次式により求めた。

$$\sigma_{cc} = \sigma_{c0} + 4.1\sigma_r \quad (1)$$

$$\sigma_r = \beta\sigma_{sy} 2t / (B - 2t) \quad (2)$$

ここに, σ_{c0} はコンクリートシリンダ圧縮試験による 1 軸圧縮強度, σ_{sy} は鋼材の降伏点, B は鋼管の幅, t は鋼管の板厚, β は充填コンクリートへの拘束効果を示すパラメータで $\beta = 0.135$ である⁴⁾。

充填コンクリートの圧縮強度に対応するひず

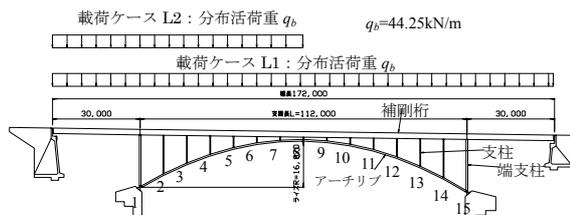


図-1 解析対象逆ランガー桁橋 (単位: mm)

表-1 解析ケースの内訳

解析モデル	荷重	コンクリート充填区間	
梁または柱モデル	P,	r0	—
	M	r1, r2*	全長
全橋モデル	L1, L2	R0	—
		R1, R2*	全長
	L1	R3*	格点(1-3,13-15)
		R4*	格点(1-5,11-15)

*は充填コンクリートの拘束効果を考慮

み ε_{cc} は次式により求める⁴⁾。

$$\varepsilon_{cc} = \{1 + 4.7(\sigma_{cc} / \sigma_{c0} - 1)\} \varepsilon_{c0} \quad (3)$$

ここに, ε_{c0} は σ_{c0} に対応するひずみである。

溶接による補剛アーチリブの残留応力は, 引張残留応力は降伏点, 圧縮残留応力は降伏点の 0.3 倍であると仮定した⁵⁾。

2.3 解析ケース

まず, 補剛アーチリブ(鋼断面)へのコンクリートの充填効果のみを考察するために, 表-1 に示すように, 中空鋼管 r0, 鋼管による拘束効果を考慮しないコンクリート充填鋼管 r1, および拘束効果を考慮したコンクリート充填鋼管 r2 に, それぞれ軸方向圧縮力 P および曲げモーメント M が単独に作用する場合の解析を行う。鋼管の断面は, フランジ板厚が一番小さい補剛アーチリブ断面とした。圧縮耐荷力解析の柱モデルとした鋼管の長さは, 補剛アーチリブの格点間長さとし, 両端ピン支持とし軸方向に圧縮力を漸増させた。曲げ耐荷力解析の梁モデルとした鋼管の長さは補剛アーチリブの格点間長さの 2 倍で, 両端は単純支持とし, 梁モデルの中央に集中荷重を作用させて, 曲げモーメントを漸増させた。

逆ランガー桁橋全体の耐荷力解析ケースの内

訳(5 ケース)も、表-1 に示す。表中、R0 は補剛アーチリブにコンクリートを充填しない基準となる解析モデルである。R1 は補剛アーチリブ全長にコンクリートを充填するが拘束効果を考慮しない解析モデルである。R2 は補剛アーチリブ全長にコンクリート充填し拘束効果を考慮する解析モデルである。R3 はアーチ基部付近(格点 1~3, および格点 13~15 の区間)にコンクリートを充填する解析モデルで、R4 は R3 の場合のコンクリート充填区間より長いアーチ基部付近(格点 1~5, および格点 11~15 の区間)にコンクリートを充填する解析モデルである。

載荷条件は、死荷重(充填コンクリートの重量も考慮して、各節点に載荷)を載荷後、橋全長に分布活荷重を主桁上に載荷する場合(載荷ケース L1)、死荷重を載荷後、橋の片半分に分布活荷重を載荷する場合(載荷ケース L2)の 2 ケースとした。分布活荷重は、B 活荷重の等分布荷重 $p_1(10\text{kN/m}^2)$ を所定の区間の床版上に満載した。この分布活荷重は、実際の設計に用いられる活荷重よりも 3 倍ほど大きいものである。また、今回の解析では、対象とした橋梁の実際的な安全率を求めることが目的でなく、充填コンクリート、および周辺鋼管によるコンクリートの拘束が、対象橋梁の挙動や終局強度に及ぼす効果を調べることを目的としているため、解析作業の省力化のために、実際的な活荷重を対象としなかった。実際的な活荷重を対象とした実際的な安全率については、今後の課題とした。このような活荷重の採用は、死荷重に比べて活荷重を大きくし、半載分布活荷重である載荷ケース L2 の荷重効果を顕著にするためである。このようにして求めた分布荷重強度 q_b は 44.25kN/m であり、各解析結果の漸増する分布活荷重 q は q_b で無次元化した。なお、コンクリートを充填しないアーチリブの場合の全死荷重を補剛桁全長に均等に載荷すると仮定した場合の死荷重強度 q_D は 55.1kN/m である。

2.4 逆ランガー桁橋の細長比パラメータ λ_T

文献 6)において、逆ランガー桁橋の細長比パ

ラメータ λ_T は次式で与えられている。

$$\lambda_T = \frac{L_R}{\sqrt{(I_A + I_G)/A_A}} \quad (4)$$

ここに、 L_R は補剛アーチリブの長さ、 I_A は補剛アーチリブの断面 2 次モーメント、 I_G は主桁の断面 2 次モーメント、 A_A は補剛アーチリブの断面積である。

逆ランガー桁橋の座屈耐荷力は、細長比パラメータ λ_T の関数であり、 λ_T が小さいほど耐荷力は大きくなる。この式(4)は、4.2 節において、解析ケース L2 の考察に用いる。

3. 補剛アーチリブ断面の耐荷力および剛性に関する考察

解析ケース P-r0, P-r1, および P-r2 の解析結果の漸増圧縮荷重 P/P_{r0} - 柱モデル端部の軸方向変位 u 曲線を図-2 に示す。同図に示すように、補剛アーチリブにコンクリートを充填した解析結果 P-r1 の初期剛性は、充填しない場合の解析結果 P-r0 より 58%大きい。一方、充填コンクリートの拘束効果を考慮した解析結果 P-r2 と拘束効果を見捨てた解析結果 P-r1 との初期剛性はほぼ一致しているが、軸方向変位が大きくなると、解析結果 P-r2 の剛性低下は、充填コンクリートの拘束効果により、解析結果 P-r1 に比較して遅く現れることがわかる。さらに、各解析結果は、まず鋼断面の圧縮残留応力部分で、つぎに引張残留応力部分で圧縮応力が増加し降伏点に達した際に(変位 0.01m および 0.026m 付近)剛性大きく低下している。解析終了時、コンクリート充填による圧縮強度は、鋼断面のみの圧縮強度 P_{r0} と比較すると、圧縮強度 P_{r1} は 45%

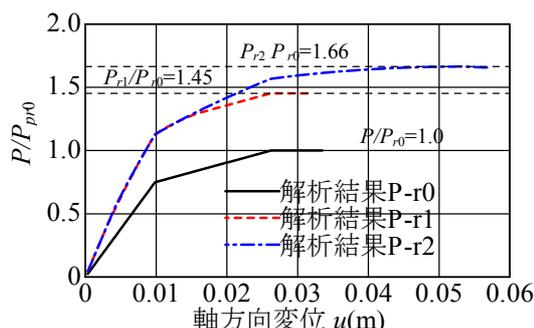


図-2 軸方向圧縮力-軸方向変位曲線

圧縮強度 P_{r2} は 66% 増加し、コンクリートの充填効果および拘束効果が顕著に現れていることがわかる。

解析ケース M-r0, M-r1, および M-r2 の梁中央に生じる曲げモーメント M/M_{r0} —梁モデル中央のたわみ δ_0 曲線を図-3 に示す。同図に示すとおり、解析ケース M-r1 の曲げ剛性は解析ケース M-r0 より 13% 大きい。解析ケース M-r2 は、解析ケース M-r1 とほぼ同じ挙動を示しているが、たわみ δ_0 が大きくなると解析ケース M-r2 の曲げモーメントが解析ケース M-r1 よりわずかに大きくなる。解析終了時、コンクリート充填による曲げ強度は、鋼断面のみの曲げ強度 M_{r0} と比較すると、曲げ強度 M_{r1} は 13%、曲げ強度 M_{r2} は 16% 増加し、充填効果は大きい拘束効果による増加量は 3% である。

4. 対象橋の耐荷力解析結果および考察

4.1 載荷方法

弾塑性有限変位理論による耐荷力解析において、対象とした逆ランガー桁橋への死荷重ベクトル q_d と活荷重ベクトル q_b との載荷方法は、以下の 2 種類がある。

$$\alpha(q_d + q_b) \quad (5)$$

$$q_d + \alpha q_b \quad (6)$$

ここで、 α は作用荷重を漸増させることを表す荷重パラメータであり、式(5)は死荷重および活荷重を同時に漸増すること、式(6)は死荷重を作用後に活荷重のみを漸増することを表す。

設計荷重($q_d + q_b$)に対して、どの程度の安全率があるかを調べるためには、載荷方法(1)が明確であると考えられる。そこで、本研究においては、まず、コンクリートを充填しない鋼断面の補剛アーチリブを有する逆ランガー桁橋を対象に、載荷方法(1)により、分布活荷重 L1 および L2 を載荷する 2 ケースの耐荷力解析を行った。解析の結果、終局状態時の最大の α である終局荷重パラメータ α_u は、L1 および L2 の場合、それぞれ 1.45 および 1.48 となり、対象橋にとって最も厳しい活荷重の載荷ケースは L1 であることがわかった。なお、これらの終局荷重パ

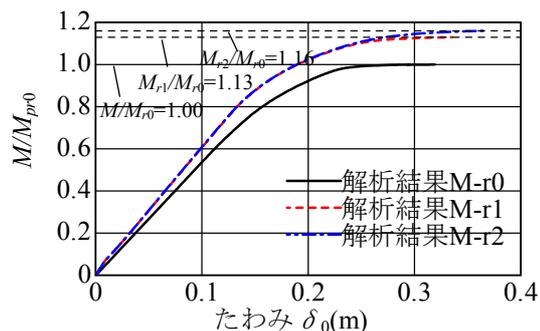


図-3 曲げモーメント—たわみ曲線

ラメータ α_u が道路橋示方書で期待する安全率 1.7 より小さくなっているのは、今回用いた分布活荷重強度 q_b が実際の設計に用いられたものよりも 3 倍程度大きいためである。

しかし、本研究においては、逆ランガー桁橋の座屈耐荷力に対して、最も厳しい半載活荷重を作用させた場合のコンクリート充填効果を調べるため、載荷方法(2)によって、全載荷である死荷重の効果が出にくい状態で耐荷力解析を行うことにした。後述の解析結果では、載荷ケース L2 の場合の α_u の方が、L1 の場合の α_u より小さくなった。

4.2 耐荷力に関する考察

各解析結果から得られた分布活荷重 q の最大値である耐荷力 q_u を表-2 に示す。載荷ケース L1 が作用する場合、補剛アーチリブ全長にコンクリートを充填し拘束効果を考慮しない解析ケース L1-R1 の耐荷力は、中空鋼管補剛アーチリブの解析ケース L1-R0 より 48.9% 大きくなっている。コンクリートの拘束効果を考慮した解析ケース L1-R2 の耐荷力は、解析ケース L1-R0 より 66.3% 大きくなり、解析ケース L1-R1 より 11.7% 大きくなっている。

表-2 逆ランガー桁橋の耐荷力

解析ケース	耐荷力 q_u (kN/m)		Ri/R0(%) (i=1~4)	
	L1	L2	L1	L2
R0	87.6	72.9	—	—
R1	130.4	75.2	148.9	103.1
R2	145.6	75.6	166.3	103.5
R3	92.0	—	105.6	—
R4	92.6	—	105.8	—

補剛アーチリブにコンクリートを部分的に充填した解析ケース L1-R3 および解析ケース L1-R4 は、それぞれ解析ケース L1-R0 の耐荷力の 105.0%および 105.8%であり、大幅な耐荷力の上昇は認められない。これは、補剛アーチリブにコンクリートを部分的に充填する場合には、コンクリート充填部分が全塑性圧縮強度に到達する前に、中空鋼管断面部分の補剛アーチリブが先に全断面降伏に至るためである。

荷重ケース L2 が作用する場合、解析ケース L2-R1 の耐荷力は解析ケース L2-R0 より 3.1%しか大きくない。この分布活荷重が作用する場合、補剛アーチリブにコンクリートを充填しても、耐荷力が大幅に上昇していないことがわかる。対象とした逆ランガー桁橋の主桁の断面 2 次モーメント I_G は、補剛アーチリブの断面 2 次モーメント I_A の約 13.7 倍であり、式(4)の $(I_A + I_G)$ は若干大きくなるが、 I_A の効果は無視できる程度である。補剛アーチリブの断面積がコンクリート充填により大きくなるため、式(4)で与えられる細長比パラメータ λ_T は、コンクリートを充填することによって逆に若干大きくなる傾向がある。これにより、荷重ケース L2 の場合は、補剛アーチリブにコンクリートを充填しても、 λ_T の変化は小さく、耐荷力が大幅に上昇しないことになる。

4.3 荷重—変位曲線に関する考察

解析ケース L1-R0, L1-R1, L1-R2, L1-R3, および L1-R4 の分布活荷重 q/q_b (=式(6)中の α)—鉛直変位 δ_c (格点 8)曲線を図-4 に示す。同図に示すように、解析ケース L1-R0 と解析ケース L1-R1 とを比較すると、補剛アーチリブにコンクリートを充填すると、橋梁全体の初期剛性および耐荷力はかなり増加することがわかる。また、解析ケース L1-R2 と解析ケース L1-R1 とを比較すると、両曲線の剛性がほぼ一致するが、変位が大きくなると解析ケース L1-R1 の q/q_b — δ_c 曲線が解析ケース L1-R2 のそれより早期に剛性低下が生じる。これは、解析ケース L1-R2 で鋼管による充填コンクリートへの拘束効果を

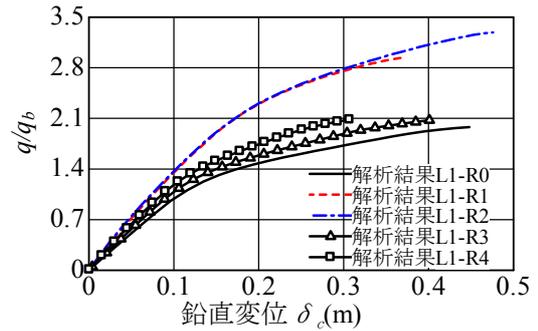


図-4 分布活荷重—鉛直変位曲線(1)

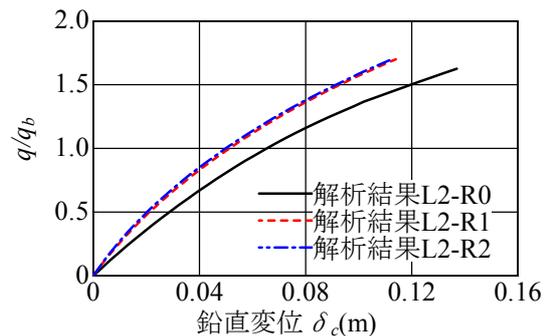


図-5 分布活荷重—鉛直変位曲線(2)

考慮しているためである。さらに、解析ケース L1-R3 および解析ケース L1-R4 により、コンクリートの充填区間長さが長いほど初期剛性が大きくなっていることがわかる。しかし、コンクリートを充填することによって、耐荷力は大きく上昇しないが、コンクリートの充填区間長さが大きいほど、最大荷重時でのアーチクラウン(格点 8)の鉛直変位が小さくなっていることがわかる。

解析ケース L2-R0, L2-R1, および L2-R2 の分布活荷重 q/q_b (=式(6)中の α)— δ_c 曲線を図-5 に示す。図-5 によると、補剛アーチリブ全長にコンクリートを充填するが拘束効果を考慮しない解析ケース L2-R1 の剛性は、最大分布活荷重に至るまで、中空鋼管補剛アーチリブの解析ケース L2-R0 より大きい。これはコンクリート充填により、補剛アーチリブの剛性が大きくなるためである。補剛アーチリブ全長にコンクリートを充填し充填コンクリートの拘束効果を考慮した解析ケース L2-R2 は、解析ケース L2-R1 とほぼ同じ挙動を示しており、拘束効果がほとんどないことがわかる。

5. 結論

本研究では、支間長 112m, ライズ 16.87m の既設鋼逆ランガー桁橋を対象とし、補剛アーチリブにコンクリートを充填する場合、部分的に充填した場合、および充填コンクリートの拘束効果を考慮する場合と考慮しない場合の解析を行い、以下の結果を得た。

- (1)対象とした逆ランガー桁橋の補剛アーチリブ断面の圧縮強度は、中空鋼管断面に比較して、コンクリートを充填することによって 45%、さらに鋼管による拘束効果を評価することによって 66%上昇することがわかった。また、初期軸方向剛性は、コンクリートを充填することによって 58%上昇するが、拘束効果はほとんどなかった。
- (2)補剛アーチリブ断面の曲げ強度は、コンクリートを充填しない鋼管断面に比較して、コンクリートを充填することによって 13%、コンクリートを充填し鋼管による拘束効果を評価することによって 16%上昇した。また、初期曲げ剛性は、コンクリートを充填することによって 13%上昇するが、拘束効果はほとんどなかった。
- (3)橋全長に分布活荷重を載荷する際、補剛アーチリブ全長にコンクリートを充填すると、中空鋼管補剛アーチリブの場合に比較して、その耐荷力は、拘束効果を考慮しない場合は 149%、拘束効果を考慮する場合は 166%であり、補剛アーチリブへのコンクリート充填効果および拘束効果が顕著に現れた。
- (4)しかし、橋の片半分に分布活荷重を載荷する場合、補剛アーチリブ全長にコンクリートを充填すると、その耐荷力は、中空鋼管補剛アーチリブの場合に比較して大幅な上昇は生じなかった。これは、対象とした逆ランガー桁橋の主桁の断面 2 次モーメントが補剛アーチリブの断面 2 次モーメントの約 14 倍であり、補剛アーチリブにコンクリートを充填しても、式(4)によるアーチ橋の細長比の変化は小さく、橋全体の座屈耐荷力があまり変化し

ないためであることがわかった。

- (5)補剛アーチリブに部分的にコンクリートを充填すると、コンクリート充填断面よりコンクリートを充填していない鋼管断面の補剛アーチリブ部分が先に全断面降伏するため、その耐荷力は、中空鋼管補剛アーチリブの場合より若干上昇するのみであった。
- (6)補剛アーチリブにコンクリートを全長、または部分的に充填しても、橋全体の剛性は中空鋼管の場合より大きくなることがわかった。

参考文献

- 1)日本鋼構造協会：土木分野におけるコンクリート充填鋼管構造の現状と今後の課題，1998.8
- 2)佐々木保隆，大森邦雄，田中忠夫，中井 博：コンクリートを充填した鋼補剛アーチリブを用いたアーチ橋の構造特性に関する検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.40A，pp.1425-1427，1994.3
- 3)北田俊行，大南亮一，丹生光則，田中克弘：ケーブルを用いた鋼橋の耐荷力解析用の汎用プログラムの開発，構造工学における数値解析シンポジウム論文集，日本鋼構造協会，第 13 巻，pp.89-94，1989.7
- 4)安 永日，北田俊行，松村政秀：圧縮，曲げ，およびねじりが作用するコンクリート充填鋼管断面の部材軸方向応力・ひずみ関係に関する実験的研究，鋼構造論文集，日本鋼構造協会，No.50，pp.83-93，2006.6
- 5)小松定夫，牛尾正之，北田俊行：補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.265，pp.25-35，1977.11
- 6)Kuranishi, S., Sato, T. and Otsuki, M : Load Carrying Capacity of Two Hinged Steel Arch Bridge with Stiffening Deck, Proceedings of JSCE, No.300, pp.121-129, 1980.8