

高齢化した長大トラス橋のモデル化の検討と漸次崩壊挙動解析

Modeling and Progressive Failure Behavior Analysis of an Aging Truss Bridge

○西村 優希 宇都宮 智昭 坂野 昌弘 廣瀬 彰則 増田 寛四郎
Yuki NISHIMURA Tomoaki UTSUNOMIYA Masahiro SAKANO Akinori HIROSE Kanshiro MASUDA

ABSTRACT This research is a part of a research project on maintenance for a long span aging truss bridge. The project focuses on Yodogawa Bridge. In this research, several FEM models of the bridge are compared with the dynamic loading test's result and progressive failure analysis are simulated. From some progressive failure behavior analyses in this research, it is found that when all members of the bridge have strength as same as SS400 or more than its half, the failure of certain part did not lead to entire collapse.

Keywords: 長寿命化, 長大トラス橋, 崩壊解析

bridge's lifespan extension, long span truss bridge, failure behavior analysis

1. 研究背景および目的

高齢化を迎えた長大橋梁の診断と長寿命化に関する研究の一環として、本研究では万一の部材破断(当板補修部における脆性破壊等)が全体崩壊に至るかどうかの検討を行う。長期間使用され続けている既存の上路トラス橋において、腐食にともなう断面欠損部を有していることが多く、また、これら断面欠損部において溶接当板による補修を行っている実例がある。これら当板補修部においては疲労強度が著しく低い可能性があり、また、材料強度面からも、硫黄やリンを多く含んでおり、現代の鋼材に比べて靱性において劣ると考えられ、その安全性について詳細に検討する必要がある。一方、その架け替えが容易ではない場合、これらの部位の補修・補強法の検討とともに、万一の部材破断(当板補修部における脆性破壊等)が全体崩壊に至るかどうかの検討も並行して実施する必要がある。

そこで、本研究では、有限要素法による立体骨組

みモデルを作成し、このような上路トラス橋の部材破断による漸次崩壊(Progressive Failure)挙動の追跡をおこない、当該橋梁の安全性について解析的に検討する。

2. 解析対象部位

本研究では1926年に架設された30径間で構成される淀川大橋を対象橋梁とする。本解析の解析対象部位はP15,P16間の16径間目とする(図1, 図2)。

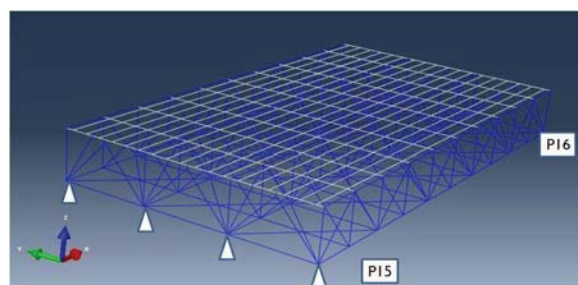


図1 解析対象部位 (FEMモデル)

* 修士(工学) 京都大学大学院修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

** 工博 京都大学大学院(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂) 第2種正会員

*** 工博 関西大学環境都市工学部(〒564-8680 吹田市山手町3-3-35) 第2種正会員

**** 工博 株式会社エイト日本技術開発(〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39)

***** 工修 国土交通省近畿地方整備局大阪国道事務所(〒550-0005 大阪市城東区今福西2-12-35)

3. 解析モデルの検討

はじめに、床版はモデル化せずに鋼トラスをトラス部材で作成しピン結合させたピン結合モデルと鋼トラスを一般梁要素でモデル化して剛結させた剛結モデルの2つを作成、動的載荷試験時の応力測定結果¹⁾との比較を行う。その後、床版はモデル化していないピン結合モデルと、床版をシェル要素でモデル化した床版ありピン結合モデルを作成、動的載荷試験時の応力測定結果との比較を行う。

3. 1 解析モデル概要

3つの解析モデル（ピン結合モデル、剛結モデル、床版ありピン結合モデル）について表1~3に特徴を示す。境界条件は3つのモデルで共通であり、P15側の4点(図1)ではヒンジ支点、P16側の4点(図1)ではローラー支点としている。

3. 2 動的載荷試験を模擬した荷重の概要

動的載荷試験の試験車下り走行レーンでの荷重をそれぞれのモデルで模擬する(図3)。部材名の概略を図4に

示す。

荷重はピン結合モデルおよび剛結モデルでは直接縦桁に分布荷重として載荷、床版ありピン結合モデルの場合はシェルの表面要素に分布荷重として載荷する。各モデルともに合計が試験車の重さになるような分布荷重として載荷する。

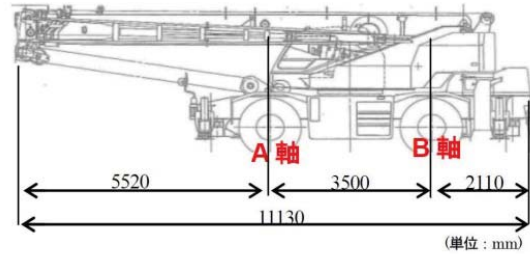


図3 試験車寸法および軸重

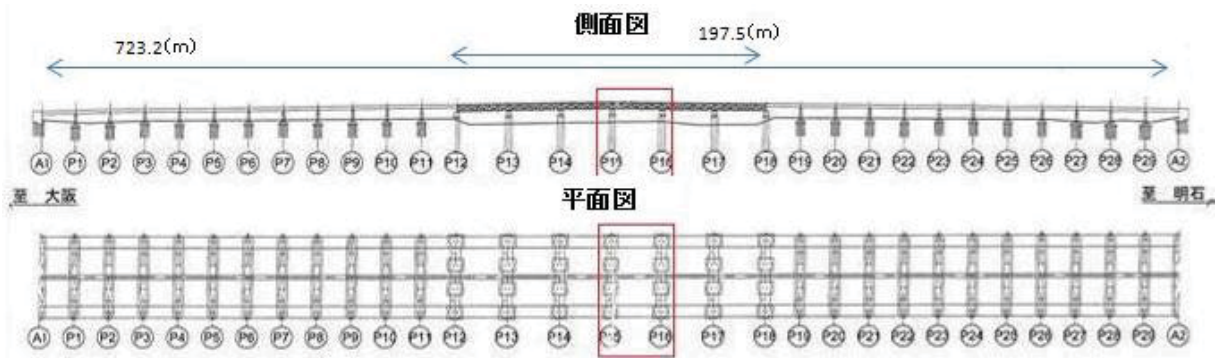


図2 対象橋梁一般図

表1 ピン結合モデルの概要

	要素の種類	断面2次モーメント	節点
縦桁・横桁	一般化梁要素	あり(床版の断面2次モーメントも加味)	剛結 (床版の影響を考慮)
それ以外の部材	トラス要素 (曲げは考慮しない)	なし	ピン結合

表2 剛結モデルの概要

	要素の種類	断面2次モーメント	節点
縦桁・横桁	一般化梁要素	あり(床版の断面2次モーメントも加味)	剛結 (床版の影響を考慮)
それ以外の部材	一般化梁要素	あり	剛結

表3 床版ありピン結合モデルの概要

	要素の種類	断面2次モーメント	節点
床版	シェル要素	あり	縦桁とZ方向の変位固定
縦桁・横桁	一般化梁要素	あり	剛結
それ以外の部材	トラス要素	なし	ピン結合

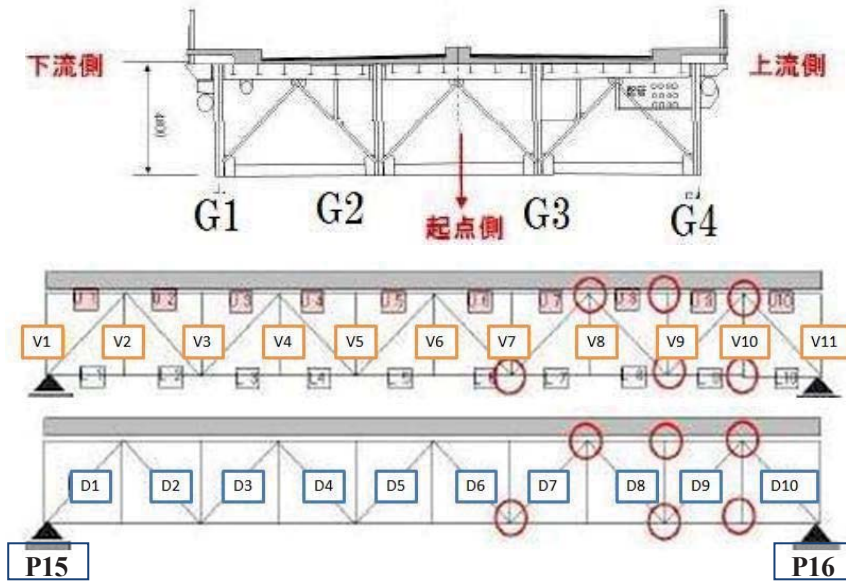


図4 部材名概略

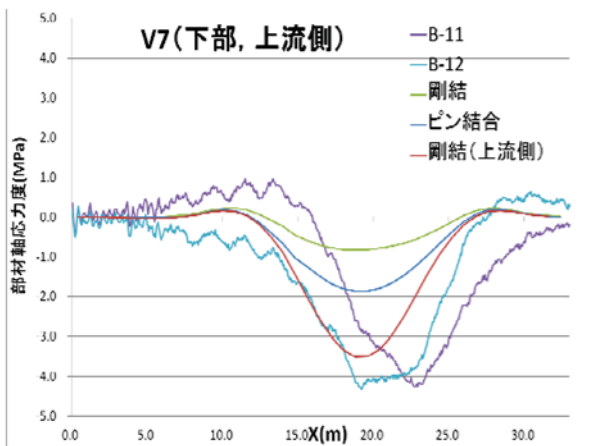


図5 V7 下部上流側での応力度

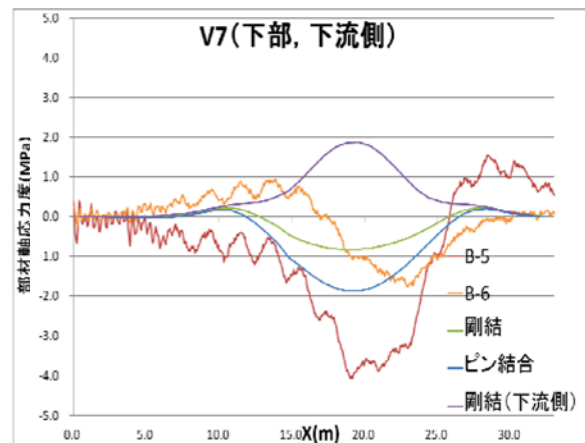


図6 V7 下部下流側での応力度

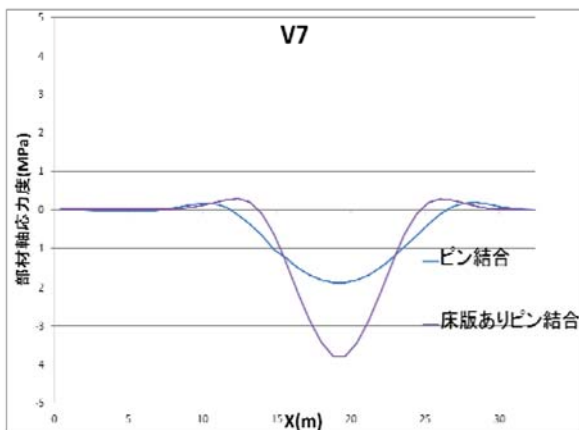


図7 V7での解析結果比較

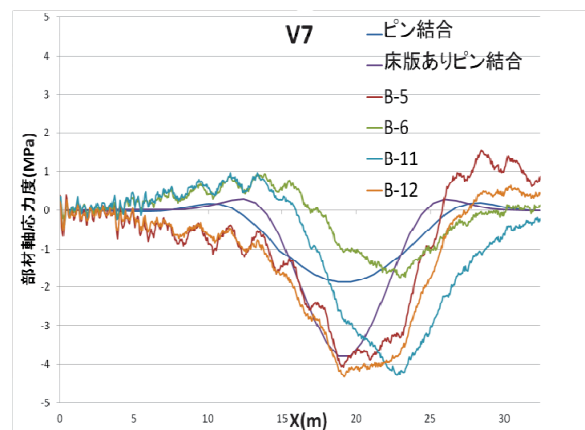


図8 V7での動的载荷試験との結果比較

3. 3 ピン結合モデルと剛結モデルの解析結果

ピン結合モデルおよび剛結モデルと動的載荷試験時の応力測定結果との比較の一例を図5, 6に示す。図5はG1上の鉛直材V7の下部上流側での応力度を、図6はG1上の鉛直材V7の下部下流側での応力度をそれぞれ示している。横軸のX (m)は試験車のA軸とB軸の中心とする。剛結モデルにおける部材軸心力は部材の中心での部材軸心力度とともに上流側または下流側の縁における応力度を示す。B-11およびB12はV7下部の上流側に、B-5およびB-6は下流側に貼り付けられたひずみゲージの呼称である。²⁾

鉛直材V7の下部において実際の動的載荷試験結果では節点にかかるモーメントは小さく、剛結モデルと応力測定結果の軸心力度の傾向が大きく違う。他の部材でも同様の傾向が確認された。これより、ピン結合モデルの方がより対象橋梁の性質に近いといえる。また、解析結果よりも動的載荷試験結果の部材軸心力度の方が大きい傾向にあり、ピン結合モデルの部材軸心力度の方が剛結モデルの中心における部材軸心力度よりも全部材において大きい。したがって、崩壊解析では剛結モデルに比べてピン結合モデルの方が適していると言える。

3. 4 ピン結合モデルと床版ありピン結合モデルの解析結果

ピン結合モデルと床版ありピン結合モデルの解析結果の比較の1例を図7に示す。図8には2つのモデルと動的載荷試験との結果の比較を示す。

解析の結果、鉛直材および斜材においては、どの部材においても床版ありピン結合モデルの方がピン結合モデルの結果よりも大きいことが確認できた。また、図8のように床版ありピン結合モデルの方が動的載荷試験結果と良く合致している。そのため、崩壊解析では床版ありピン結合モデルを採用することとする。

4. 部材破断による漸次崩壊挙動の追跡

4. 1 解析方法

ある1つの部材の欠損によって橋梁の崩壊が起こるかどうかを解析で検討する。はじめにある1部材を消去し、その状態で線形自重解析を行う。荷重については橋梁の自重のみを考慮する。また、床版ありピン結合モデルで解析を行う。ここで、他の部材に生じる応力が以下の条件式を満たすとき、部材の終局状態とみなす。^{2) 3) 4)}

1) 軸力が引張の場合

$$\sigma \geq \sigma_u \quad \sigma : \text{軸応力}, \sigma_u : \text{引張強度}$$

このとき、部材にき裂が発生し破断につながると仮定し、その部材を消去する。

2) 軸力が圧縮の場合

$$\sigma \geq \sigma_y \quad \sigma_y : \text{降伏応力}$$

このとき、部材の軸力により全断面が降伏すると仮定し、

部材要素の剛性を1/1000に下げる。なお、座屈に関しては考慮しない。

以下、表4に示す3条件について崩壊解析を行う。

表4 崩壊解析条件

	引張強度 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	強度比
条件1	400	235	1
条件2	200	117.5	0.5
条件3	150	88.1	0.375

4. 2 解析結果

G1上の鉛直材V6~V9、斜材D6~D9(図3)をそれぞれ消去して崩壊が起こるかどうかを3条件について解析を行った。最初の解析結果をStep1、その結果終局状態になった部材を考慮した2回目の解析結果をStep2とし、以下部材を消去しながら解析を繰り返す。最終的に節点の最大変位が1.0 (m)以上になったところで崩壊したと判断し解析を終了することとする。

結果の概要を表5に示す。条件1および条件2では1部材の欠損により他の部材が終局状態になることはなく、崩壊につながることはなかった。

表5 崩壊解析結果概要

	鉛直材 V6~V9	斜材 D6~D9
条件1	崩壊せず	崩壊せず
条件2	崩壊せず	崩壊せず
条件3	崩壊せず	D6: 崩壊せず D7,8: 崩壊する D9: 崩壊する (途中不安定)

条件3のうち鉛直材および斜材D6を消去したケースにおいては、他の部材が終局状態になることはなく、崩壊にはつながらなかった。

一方、条件3のうちD7およびD8をはじめに消去して解析を行った場合は崩壊に至った。これらの解析結果をStepごとに示したものを表6

および表7にそれぞれ示す。また、図9ではD7およびD8の位置を示す。図10にはD7を最初に消去した場合のStep5での変形を示し、図11にはそれぞれのケースにおいてStep1で降伏した部材の位置を示す。

なお、条件3のうちD9をはじめに消去したケースにおいては、破断した部材のため解析途中に変形が極めて大きく出る不安定な構造となった。この時、不安定な構造部をすべて消去して解析を行うことにより、崩壊するという結論を得た。

4.3 考察

条件3では、D7、D8を最初に消去するケースにおいて最終的に崩壊することがわかった(図9)。つまり、各部材の強度がSS400の3/8程度であった場合、これらの部材の欠損が崩壊の起因となりうるといえる。それぞれのケースにおいてStep1で降伏する部材は、D7ではG2上のD1、D8ではG2上のD1、G3上のD10と対傾構斜材1本である(図10、11)。これからD7、D8に欠損の可能性がある場合、その部材以外で補修・補強すべき重要な部材は前述の部材であるといえる。

D9を最初に消去するケースにおける解析の途中で不安定な構造になってしまった。本研究の床版ありピン結合モデルでは、各部材がピン結合のため不安定な構造になりやすいということがわかる。

5. 結論

条件1および条件2ではどのケースでも崩壊にはいたらなかった。一方、条件3では一部の斜材の欠損から最終的に1.0(m)以上の変位がみられ、崩壊に至るということを解析で示すことができた。すなわち、各部材がSS400と同等もしくは半分以上の強度を有している場合は、G1上の鉛直材および斜材のうちいずれかが重大な欠損に至っても他の部材が終局状態になることはなかった。

表6 条件3でD7を最初に消去した場合の結果

Step1	破断	0本
	降伏	斜材1本(G2上のD1)
	最大変位	0.03(m)
step2	破断	0本
	降伏	鉛直材1本(G2上のV2) 斜材3本(G1上のD1、G3上のD1、D10) 対傾構斜材4本
	最大変位	0.04(m)
step3	破断	斜材1本(G2上のD2)
	降伏	鉛直材4本、斜材2本 対傾構斜材7本
	最大変位	0.23(m)
Step4	破断	斜材2本(G3上のD2、D9) 対傾構斜材1本
	降伏	上弦材2本、鉛直材6本 斜材2本、対傾構斜材14本
	最大変位	0.45(m)
Step5	最大変位	1.56(m)

表7 条件3でD8を最初に消去した場合の結果

Step1	破断	0本
	降伏	斜材2本(G2上のD1、G3上のD10)、対傾構斜材1本
	最大変位	0.04(m)
step2	破断	0本
	降伏	鉛直材2本(G1上のV9、G2上のV2)斜材4本(G1上のD1、G2上のD10、G3上のD1、G4上のD10) 対傾構斜材7本
	最大変位	0.06(m)
step3	破断	斜材3本(G2上のD2、D9、G3上のD9) 対傾構斜材2本
	降伏	上弦材1本 鉛直材11本 対傾構斜材8本
	最大変位	0.23(m)
Step4	破断	鉛直材3本 対傾構斜材4本
	降伏	上弦材2本、鉛直材6本 斜材5本、対傾構斜材11本 対傾構下弦材2本
	最大変位	0.51(m)
Step5	最大変位	1.87(m)

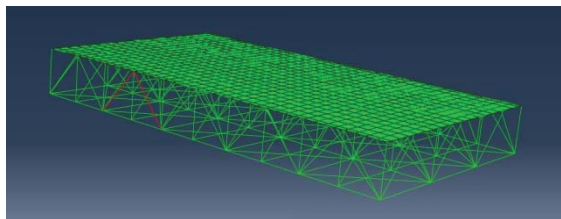


図9 D7,D8 の位置

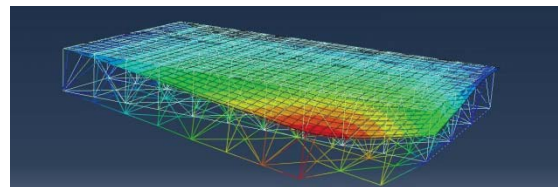


図10 D7 を最初に消去したケースにおける
Step5 での変形図

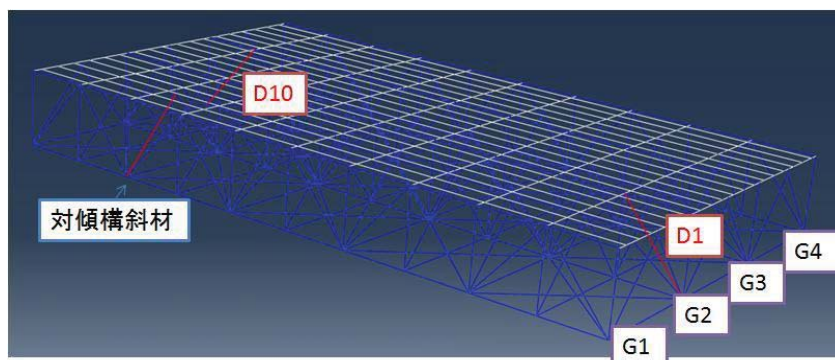


図11 D7,D8 ケースにおける降伏部材位置

【参考文献】

- 1) 一ノ瀬, 増田, 夏秋, 坂野: 淀川大橋の動的載荷試験及び応力頻度測定, 鋼構造年次論文報告集第19巻, 665-670, 2011.11
- 2) 笹野, 依田: 米国ミネアポリス I-35W 橋の崩壊メカニズムと格点部の損傷評価, 土木学会論文集 A, Vol.66 No.2, 312-323, 2010.6
- 3) 長谷, 明石, 松田, 安田, 石井, 宮森, 小幡, 平山, 奥井: 我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集 A, Vol.65 No.2, 410-425, 2009.5
- 4) 日本鉄鋼連盟, 鋼構造研究・教育助成事業報告書, 鋼トラス橋のリダンダンシー評価手法の開発と合理的維持管理への適用, 2010.