

パイプトラス橋の新形式格点構造

A new type of joint structure for pipe-truss bridges

川畑 篤敬*, 伊藤 久**, 中村 哲也***, 植田 俊司***, 猪村 康弘*, 栗原 康行****

Atsunori KAWABATA, Hisashi ITO, Tetsuya NAKAMURA, Shunji UEDA, Yasuhiro IMURA, Yasuyuki KURIHARA

*工修, 日本鋼管株式会社 橋梁建設部 (〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2丁目1番地)

**工博, 日本鋼管株式会社 船舶・構造研究部 (〒514-0393 三重県津市雲出鋼管町1番地)

***工修, 日本鋼管株式会社 船舶・構造研究部 (〒514-0393 三重県津市雲出鋼管町1番地)

****工修, 日本鋼管株式会社 都市工学研究部 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1丁目1番地)

This paper deals with the development of a new joint for a pipe-truss bridge. In order to decrease the stress concentration, we developed a new type joint for the pipe-truss bridge. Two joint types, namely the "divergent pipe joint" and the "C-type cast joint", are numerically analysed and researched stress concentration mechanisms. As a result of this research, we propose a "cylindrical cast joint" that has the advantage of both the "divergent pipe joint" and the "C-type cast joint". We concluded that the "cylindrical cast joint" excels in cost performance, durability, and execution. Fatigue experiments were conducted in order to investigate the fatigue durability of the "cylindrical cast joint".

キーワード: 格点構造, 疲労, 応力集中, パイプトラス橋, 鋳造

1. はじめに

トラス橋は、簡単な構造であるが、荷重を部材軸力として各部材へ分担する機構により強度を比較的高くすることができる、合理性に長けた構造である。過去のトラス橋構造部材は主としてI断面の部材を使用しているが、最近では、滝下橋¹⁾など、角型の鋼管を用いて架設された報告例がある。

その中でも1998年にフランスで架設されたLully高架橋(図-1)は、円形断面鋼管製の立体トラス構造を採用し十分な剛性を持たせることで補剛材を省略するなど徹底的な合理化を可能としながら軽量化および透視性など美観上で優れた橋梁を実現化している。

この適切に単純化された構造の橋において、斜材軸力と弦材軸力が複雑に作用する格点部が特に重要な構造となる。施工性及び疲労強度の要となる。また、部材を円形鋼管としているため、格点部では鋼管同士の接合が必要となり、溶接部が複雑なものとなっている²⁾。さらに、各部材からの断面力が集中し、複雑な応力状態になることが予想されるため、局所的な応力集中が繰返し発生することによる疲労耐久性低下の問題が生じる。また、長スパンになれば格点の数も増え経済性、施工性も重要な要素となる。

本論文では、Lully高架橋で用いられたような鋼管同士を直接接合した格点構造の弱点箇所および原因を究明し、解析的な検討と実験的な検討を通じて施工性経済性に優れ、疲労強度が高い格点構造を提供することを目的とする。



図-1 パイプトラス橋 (Lully高架橋)

2. 格点構造

本開発で対象とするパイプトラス橋は、支間長32m+40m+32mの3径間連続合成橋(図-2)とした。検討する格点は、疲労の最も厳しい格点(活荷重による軸力変動振幅の絶対値が最大となる部材を有する格点、ただし支点は除く)とする。この格点を決定するために、活荷重の影響線載荷を行い、①「斜材軸力の振幅が最大となる格点」及び②「弦材軸力の振幅が最大となる格点」を調査した。その結果、①は格点D19、②格点L13となった。

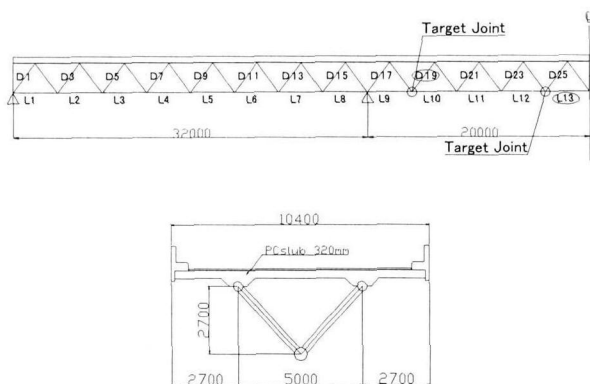


図-2 対象としたパイプトラス橋全体モデル

コスト・美観を考慮し、検討対象とする格点構造は、以下の2種類とした。まず、鋼管を使用したパイプトラス橋として知られるルーリー橋（仏）で採用されているパイプを相互に直接、溶接接合する①「パイプ分岐継手構造」（ただし、ここでは斜材を相互に重ねて溶接するオーバーラップ構造としている。）、铸造製とすることで形状が自由に決定できる特長を持つ②「C型铸造継手構造」について検討を行った。

それぞれの格点構造のモデル図と特徴を表-1に示す。

表-1 格点構造

	モデル	長所	短所
① パイプ分岐 継手構造		・材料費	・製作性 ・施工性
② C型铸造継手構造		・製作性 ・施工性	・材料費

3. FEM 解析

3.1 解析方法

対象とした格点構造は4本の斜材を有するDK（Double K）型継手構造である。対称性を利用して断面の中心線より半分の1/2対称モデルを作成し3次元弾性微小変位解析を行った。解析プログラムはI-DEASを使用した。拘束条件については、表-2に示すように弦材の片側を固定端としもう一方の端部の回転を固定したまま長手方向を自由にした。荷重条件については、2章の影響線載荷で算出された値を用いて、①「斜材軸力モデル」は斜材に1579kNの圧縮力と引張り力を加えている。②「弦材軸力モデル」は、弦材に4129kNの引張り力を加えた。荷重の与え方は、断面内に均等に荷重するため荷重断面の中心点から断面の全ての節点

に剛体棒で接続しその中心点へ載荷荷重を与えている。拘束方法についても同様の方法を採用した。解析モデルの要素は、ソリッド要素を用いた。また、表-3に示すように、溶接ビードのモデル化は省略し、溶込み溶接の場合は面的に要素を接合し、隅肉溶接の場合は線的に要素を接合したことで近似化を行っている。このため、隅肉溶接の解析結果は若干高めの値が算出され安全側の評価値となる。要素の大きさについては、板厚方向に1分割となるように大きさを決定している。

表-2 境界条件

	弦材軸力モデル	斜材軸力モデル
境界条件		

表-3 溶接部のモデル化

	隅肉溶接	溶込み溶接
FEMモデル		

3.2 応力集中率

弦材軸力モデル、斜材軸力モデルの斜材と弦材を4つの部材に対して梁理論で求められる「公称応力」の値を計算する。これらの値に対し3.1節で示したFEM解析により求まる局所に発生する最大引張応力値を算出した。この最大引張応力値を公称応力値で割ったものを「応力集中率³⁾」とし、相対的な評価の指標として用いた。

3.3 解析結果

解析値の検討は疲労耐久性への影響が大きな引張応力に対して行った。解析の結果を以下に示す。

(1) 弦材軸力モデル

①パイプ分岐継手構造（表-4 左）

最大応力発生箇所は、相貫線点に発生し応力集中率は $k=2.11$ と比較的に小さい値となった。その理由として弦材との設置面が斜材鋼管母材であり、弦材軸力方向の剛性を小さめているためと考えられる。

②C型铸造継手構造（表-5 左）

最大応力発生箇所は、カバープレート張出し両端部に発生し、応力集中率は $k=3.13$ と大きな値となった。この応力集中の原因は、諸戸ら⁶⁾の研究でも示される通り、応力の伝達が主にカバープレート端のすみ肉溶接で行われているため、応力通過箇所経路の急激な変化による応力集中であると考えられる。

(2) 斜材軸力モデル

①パイプ分岐継手構造（表-4 右）

最大応力発生箇所は相貫線上に発生し、応力集中係数は $k=2.91$ と比較的大きな値となった。この原因として、斜材に加わる圧縮・引張り力により相貫部にせん断力が発生し、斜材鋼管母材内でこのせん断力の伝達をおこなうために応力集中が発生したものと推測ができる。

②C型鋳造継手構造（表-5 右）

最大応力発生箇所は、カバープレート張出し中央部、相貫線付近

に発生し、応力集中率は、 $k=2.17$ と比較的小きな値となった。これについては、斜材軸力の伝達が主に鋳造内部で行われ、カバープレート周りの隅肉溶接に伝達する分が減少しているためと考えられる。

表-4 FEM解析結果（パイプ分岐型継手構造）

	弦材軸力モデル	斜材軸力モデル
コンター（引張り）		
応力集中率	2.11	2.91
応力集中の影響因子	相貫線と弦材の交点の形状	斜材軸力によるせん断力の発生

表-5 FEM解析結果（C型鋳造構造）

	弦材軸力モデル	斜材軸力モデル
コンター（引張り）		
応力集中率	3.13	2.17
応力集中の影響因子	カバープレート	カバープレートの周方向長さ不足

3.4 筒型鋳造格点構造

- 前節までの結果に基づき、パイプ分岐継手構造の弦材軸力に対する柔軟性とC型鋳造構造の斜材軸力に対して鋳造内での応力の伝達を行う、双方の利点を活かした筒型鋳造構造を提案した。具体的には、
- ①斜材軸方向の剛性低減のため、内部を中空にした。
 - ②応力集中を緩和するため、相貫部に曲線をつけた。

- ③せん断力による応力集中が発生しやすい、相貫部の板厚を確保した。
- ④弦材と斜材で応力が伝達される部分の溶接部は、弦材との設置面に開先を設けた。また、鋳造体で製作することにより、施工性に優れる上に、カバープレート部を省略することで、鋳鋼の使用量を低く抑さえ、経済性も兼ね備えた構造といえる。（表-6）

表-6 筒型鋳造構造

モデル	特長
	・鋳造内を中空化 ・滑かな形状 ・弦材との設置面に開先形状 ・応力集中発生箇所の板厚を増厚

3.5 継手構造解析結果まとめ

筒型鑄造継手構造に対し、他の継手モデルと同様の解析を行った。その時のコンター図と応力集中率を表-7 に示す。また、全

ての格点に対する応力集中率をまとめたものを表-8 に示す。
表-8 より予想通り弦材軸力、斜材軸力のいずれの荷重に対しても応力集中係数が小さくなることがわかる。

表-7 FEM解析結果（筒型鑄造構造）

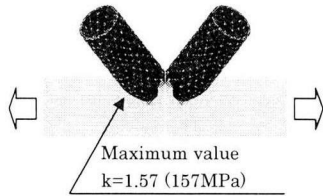
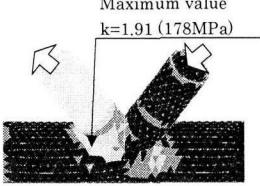
	弦材軸力モデル	斜材軸力モデル
コンター（引張力）		
応力集中率	1.57	1.91
応力集中の影響因子	溶接部形状	溶接部形状

表-8 FEM 解析結果応力集中率まとめ

	パイプ分岐継手構造	C 型鑄造構造	筒型鑄造構造
弦材軸力モデル	2.11	3.13	1.57
斜材軸力モデル	2.91	2.17	1.91

4. 疲労試験

4.1 試験方法

①パイプ分岐継手構造と②C型鑄造継手構造および③筒型鑄造構造に対して疲労試験を行った。

下弦材の軸力が卓越する格点部と、斜材の軸力が卓越する格点部の2箇所を対象に、試設計橋の約2/3縮尺モデルのK型継手疲労試験体を製作した。図2~4に各試験体の実験前状況および溶接ビードの状態を示す。鋼管材には一般構造用鋼SS400相当の鋼管材STPG410を用い、鑄造格点には鑄造材SCW410を用いた。

弦材軸力疲労試験の要領を図-5,6に、斜材軸力疲労試験の要領を図-7,8に示す。弦材の軸力試験では、下弦材の両端にピンジョイントを介して軸方向荷重を載荷した。斜材の軸力試験では、弦材の一端とそれに近い側の斜材にピンジョイントを介して反力壁に取付け、もう1端の斜材に片振りの圧縮荷重を載荷した。

疲労試験は、2000kN油圧サーボ式疲労試験機を用い、繰返し速度0.5~3Hzの正弦波形一定荷重振幅で行った。各供試体毎の荷重条件は、表-9に示す。

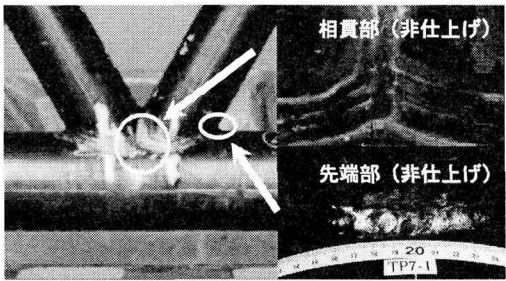


図-2 パイプ分岐継手構造供試体

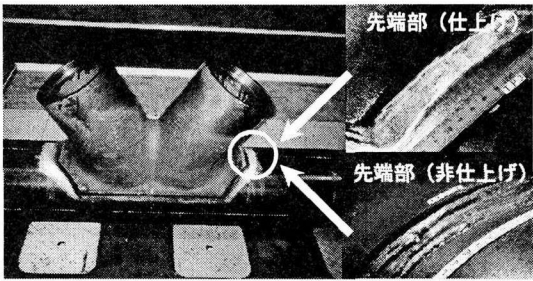


図-3 C型鑄造構造供試体

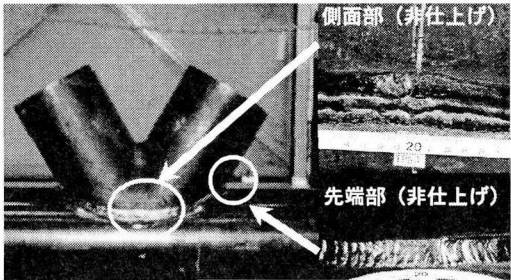


図-4 筒型鑄造構造供試体

表-9 各供試体への載荷荷重

格点タイプ	供試体数	止端 仕上げ	荷重			
			荷重タイプ	公称応力 範囲 MPa	最大載荷重 tf	最小載荷重 tf
パイプ分岐	1	-	弦材軸力	118	1177	5
パイプ分岐	1	-	弦材軸力	187	1373	-490
C型鑄造	2	○	弦材軸力	187	1373	-490
C型鑄造	2	○	弦材軸力	98	981	5
C型鑄造	1	-	弦材軸力	98	981	5
筒型鑄造	1	-	弦材軸力	98	981	5
パイプ分岐	1	-	斜材軸力	66	-785	-5
パイプ分岐	1	-	斜材軸力	131	-1569	-5
C型鑄造	1	○	斜材軸力	96	-981	-5
筒型鑄造	1	-	斜材軸力	58	-588	-5

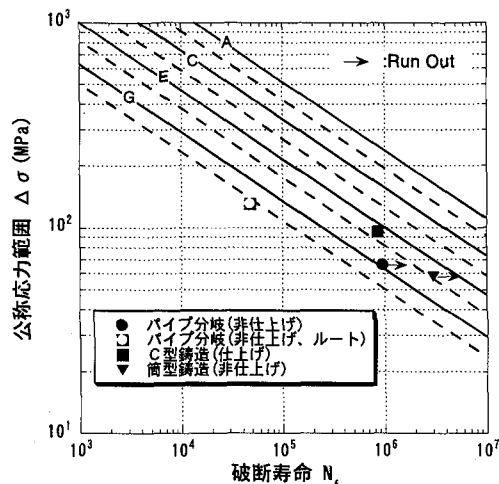


図-10 S-N線図 (斜材軸力疲労試験結果)

4.3 格点構造の疲労強度評価

パイプトラス橋の設計においては、格点部の疲労強度評価が不可欠である。パイプ構造の疲労強度評価では、ホットスポット応力またはひずみを基準とした評価が有効であり、海洋構造物における検討をベースに格点部の疲労強度評価法が各種提案されている^{4),7)-9)}。しかしながら、道路橋ではそれらとは寸法が異なる上、今回新たに提案した簡型鋳造格点等に対しては、それらの評価法が適用できるかどうか不明である。

そこで、上述の代表的な格点部の疲労設計法が、適用可能であるか検討を行った結果、JSSC のホットスポット応力範囲を用いる方法⁹⁾が最も適当であると判断された。JSSC の曲線を用い、溶接止端から約 4mm の位置での応力をホットスポット応力として今回の試験結果を整理したグラフを図-11 に示す。

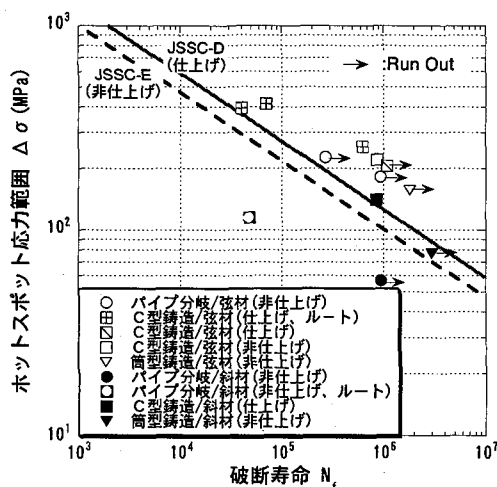


図-11 S-N線図 (疲労試験結果まとめ)

5. 結論

FEMによる解析および、継手部を対象にした試験体による疲労試験により以下のことがわかった。

- ①パイプ分岐型継手構造は、斜材軸力の荷重に対して疲労強度が高く、弦材軸力に対して比較的疲労強度が低い。
- ②C型鋳造格点構造は、斜材軸力の荷重に対して疲労強度が高く、弦材軸力に対して比較的疲労強度が低い。
- ③簡型鋳造構造は、弦材軸力および斜材軸力のいずれに対しても優れた疲労耐久性を示す。
- ④疲労強度の評価について解析的に得られた応力集中率の大小と実験的に得られた疲労強度の大小は整合している。
- ⑤簡型鋳造構造の疲労強度は、JSSC のホットスポット応力範囲を用いる方法により評価できる。

謝辞

本実験にあたり使用した鋳造製供試体の製作など日本鋳造(株)には多大なご協力を頂いたことを記し、ここに感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 川尻克利, 梅津靖雄, 至田利夫 : 滝下橋の計画・設計, 橋梁と基礎 (1998.3)
- 2) H.G. Dauner, G.Devorges, A.Oribasi, D.Wery : The Lully Viaduct, a Composite Bridge with Steel Tube Truss, Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46:1-3, Paper No.055
- 3) 西田正孝 : 応力集中 増補版, 1993.4
- 4) 日本鋼構造協会編 : 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4
- 5) 保坂鐵矢, 堀地紀行, 磯江暁 : トラス格点部合理化構造の検討, 構造工学論文集 Vol.46A pp.1353-1364 (2000.3)
- 6) 諸戸健一, 山田健太郎 : カバープレートの疲れ強さと疲れ許容応力度, 構造工学論文集 Vol.33A pp.403-410 1987.3
- 7) ANSI/AWS, D1.1-81, American Welding Society, 1981
- 8) Iida, K., Asano, K., Toyofuku, M., Ishikawa, K. : A Proposal for Fatigue Design Procedure for Offshore Tubular Connections, IIW Doc. XIII-1020-81, 1981
- 9) 飯田國廣, 浅野皓三, 豊福正継, 石川邦照 : 海洋構造物鋼管継手の疲労設計法の一試案, 日本造船学会論文集, 第148号, 1980 (2001年9月14日受付)

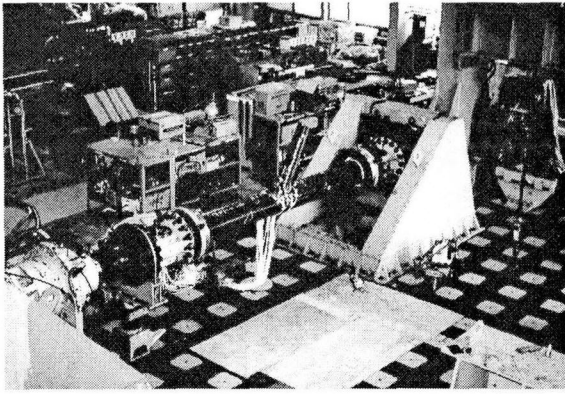


図-5 弦材軸力疲労試験（試験状況）

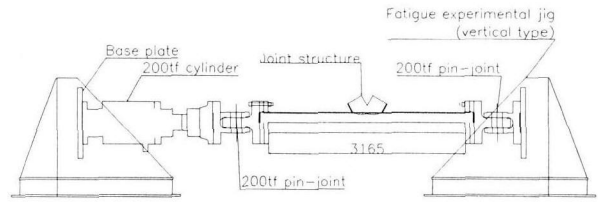


図-6 弦材軸力疲労試験概要

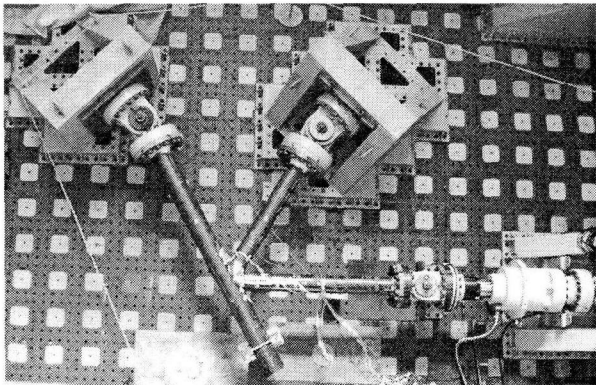


図-7 斜材軸力疲労試験（試験状況）

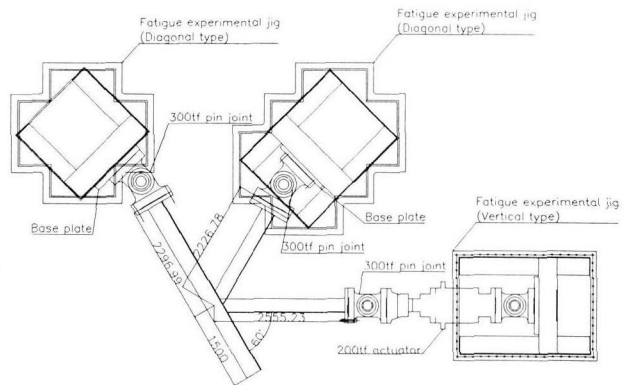


図-8 斜材軸力疲労試験概要

4.2 試験結果

4.2.1 き裂の発生位置

弦材軸力疲労試験では、C型鋳造試験体のみにき裂が発生し、パイプ分岐、筒型鋳造試験体では、き裂が発生しなかった。C型鋳造試験体には、格点部の弦材側の溶接止端部からのき裂およびルートき裂の2種類が発生した。ルートき裂は、寿命延長を狙って止端仕上げを行った結果、のど厚が不足したために発生したものと推察される。

斜材軸力疲労試験では、パイプ分岐、およびC型鋳造試験体にき裂が生じ、筒型鋳造構造ではき裂が発生しなかった。パイプ分岐構造のき裂は斜材同士のラップ溶接部に生じ、C型鋳造構造では、鋳造格点と引張斜材の突合せ溶接部で、き裂が発生した。

4.2.2 疲労寿命

弦材軸力疲労試験結果を図-9に、斜材軸力疲労試験結果を図-10にそれぞれ示す。破断寿命 N_f は、止端き裂ではき裂長さが主材断面円周の約2分の1に達した時の荷重繰返し数とし、ルート破断に関しては、き裂が表出した時点の荷重繰返し数とした。縦軸は、弦材軸力疲労試験では弦材の公称応力、斜材軸力疲労試験では、荷重を載荷している斜材の公称応力である。図中矢印のついた点は、き裂が発生しなかった試験体の試験終了時の荷重繰

返し数を示す。また、図中には疲労設計曲線⁴⁾を併せて示した。

これらの結果をみると弦材軸力疲労試験では、パイプ分岐構造、筒型鋳造構造の疲労寿命が長く、斜材軸力疲労試験では、C型鋳造構造と筒型鋳造構造の疲労寿命が長い。すなわち、荷重形式に関らず筒型鋳造構造は疲労強度に優れており、このことはFEM解析で得られた応力集中率の結果とも定性的に一致する。

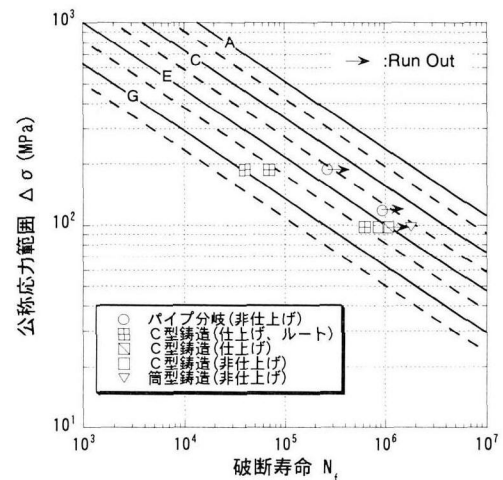


図-9 S-N線図（弦材軸力疲労試験結果）