ISSN 0386-5878 土木研究所資料 第4422号

土木研究所資料

支承部を構成する六角ボルト 及びアンカーボルトのせん断載荷実験

令和4年2月

国 立 研 究 開 発 法 人 土 木 研 究 所 構造物メンテナンス研究センター 橋 梁 構 造 研 究 グ ル ー プ

Copyright © (2022) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行した ものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研 究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはな らない。

支承部を構成する六角ボルト

及びアンカーボルトのせん断載荷実験

上席研究員 大住 道生 長谷川秀也※1 主任研究員 岡田太賀雄※2 主任研究員 澤田 守※3 主任研究員 二宮 智大^{※4} 研究員 専門研究員 中尾 尚史 髙野 真※5 交流研究員 交流研究員 智哉※5 余野

※1 現 名古屋高速道路公社

- ※2 現 国土交通省国土技術政策総合研究所 道路構造部橋梁研究室 主任研究官
- ※3 現 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
- ※4 現 国土交通省道路局国道·技術課
- ※5 現 株式会社ビービーエム

要 旨:

本研究では、支承部を構成する1つの部品である六角ボルト及びアンカーボルトに作用する力の作用状況 及び耐力さらに耐力のばらつきについてせん断載荷実験により検討した.六角ボルトせん断載荷実験の結果、 最大荷重は道路橋示方書に記載されているせん断耐力の推定式よりも大きいことがわかった.また、六角ボ ルトの強度区分が大きいほど、耐力のばらつきも小さくなることがわかった.アンカーボルトの載荷実験の 結果、SS400 材が耐力のばらつきが小さくなることがわかった.また、アンカーボルトの径を変えても最大 荷重のばらつきが変化しないことがわかった.

キーワード:六角ボルト,アンカーボルト,耐力,標準偏差

目次

1. はじ	じめに・・	• • •	•••	••	•	••	•••	•••	•	••	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	• 1
2. 六角	自ボルトの)せん断載	載荷実	験																		
	2.1	実験概要	更・・	••	•	••	•••	•••	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 2
	2.2	実験結果	長・・	••	•	•••	••	•••	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 6
	2.3	六角ボノ	レトに	作用	する	5軸	力が	せん	ノ断フ	力に	与	え	る景	》響	•	•	•	•	•	•	•	• 16
3. 複数	女の六角ボ	ドルトを言	2置し	た場	書合の	りせ,	ん断	載荷	「実際	険												
	3.1	実験概要	更・・	••	•	•••	••	•••	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 18
	3.2	基準載在	睛によ	る六	角	ドル	トの	耐力	J •	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 22
	3.3	偏心載得	苛, 余	め載	は荷り	こよ	る六	角オ	ジル	ト耐	力	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 30
4.アン	カーボル	トに使用	する	才質	の違	112	こよる	る耐	力の	検討	Ŧ											
	4.1	実験概望	要・・	•••	•	•••	•••	• •	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 38
	4.2	実験結果	₹・・	•••	•	•••	•••	• •	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 43
5. アン	ノカーボル	- トに使用	目する	径の	違い	いこ	よる	耐力	」の権													
	5.1	実験概望	要・・	••	•	•••	•••	• •	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 49
	5.2	実験結果	長・・	••	•	•••	••	• •	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 55
6. アン	ノカーボル	~トに曲!	ザが作	用し	たす	易合。	の検	討														
	6.1	実験概望	要・・	••	•	•••	••	• •	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 59
	6.2	設計荷重	重の算	出力	7法	•••	••	• •	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 64
	6.3	実験結果	長・・	••	•	•••	••	• •	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 66
	6.4	アンカ-	ーボル	トに	生生し	ごる	合成	応ナ]度	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 72
7. 結諸	∴ ••••	• • •	•••	••	•	••	••	•••	•	••	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 73
参考文	献・・	• • • •	•••	•	••	••	•••	•	••	•••	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	• 75
参考資	料•••	• • • •	•••	•	••	••	•••	•	••	•••	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	• 77

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震では、地震動に加えて津波や地盤変位等の影響により、 設計において見込んでいる損傷とは異なる被害を受けた道路橋が存在した¹⁾⁻³⁾. これを受け、2017年に改 定された道路橋示方書 V 耐震設計編⁴⁾では、架橋位置と形式の選定において、橋の耐震設計にあたっては、 想定される地震によって生じ得る津波、斜面崩壊等及び断層変位に対して、これらの影響を受けないよ う架橋位置又は橋の形式の選定を行うことを標準とすること、さらに、やむを得ずこれらの影響を受け る架橋位置又は橋の形式となる場合には、少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とする ことが規定された. しかし、具体的な方法は確立されていないのが現状である.

具体的な方法の1つとして、特定の部材に損傷を誘導することで損傷シナリオをデザインする方法が考 えられる^{例えば5)-7)}.例えば、一部の部材に損傷を誘導することにより、橋全体系の崩壊モードを誘導し、 致命的な被害に至りにくく、かつ機能回復しやすい構造にする考え方は有効であると考えられる.現在、 支承部に損傷を誘導できるような支承(損傷制御型支承)の検討が行われている^{例えば8),9)}.

損傷制御型支承を設計する場合,損傷を誘導する部品と損傷させない部品の耐力を設定する必要があ る.支承各部品の耐力は,主に水平方向および鉛直方向に対してそれぞれ評価している.しかし,支承 には曲げとせん断の力が同時に作用するため,これらの力を同時に考えて評価する必要がある.さらに, 損傷制御型支承を設計するためには,損傷させる部品を設定し,かつ損傷させる部品と損傷させない部 品の耐力を正確に評価したうえで,耐力のばらつきを踏まえて適切な耐力差を設定することが重要であ る.

そこで本研究は、支承各部品における力の作用状況および耐力を把握することを目的とした.本報告 書では、支承部を構成する部品である六角ボルトとアンカーボルトを対象として、これら部品の耐力や 耐力のばらつきについて載荷実験により検討した結果を報告する.

2. 六角ボルトのせん断載荷実験

2.1 実験概要

2.1.1 実験供試体

本章では、支承等に用いられている六角ボルトにせん断力が作用した場合の耐力やばらつきについて、 せん断載荷実験により検討を行った.

本研究では、JIS B1180に規定されている強度区分4.8、8.8、10.9、12.9 の無めっきボルトで、径がM16 ~M30の六角ボルトを対象とした.なお、使用したボルトは同じロッドのボルトである.ボルト頭部、ナット部には座金を付与した.載荷実験に使用する六角ボルトの諸元を表-2.1に示す.ここではJISに規定されている引張強さと、材料検査証(ミルシート)に示されている引張強さ(本資料では実強度と呼ぶ)を示した.表中に示した断面積はJISに記載されている値である.引張耐力とせん断耐力は次式により算出した.なお、せん断耐力は、道路橋示方書II鋼橋・鋼部材編¹⁰に記載されているせん断耐力の推定式を参考とした.

$$P_b = \sigma_{bu} \times A_b \tag{2.1}$$

$$Q_b = \frac{P_b}{\sqrt{3}} \tag{2.2}$$

ここで、 P_b は六角ボルトの引張耐力、 Q_b は六角ボルトのせん断耐力、 σ_{bu} は六角ボルトに使用する材料の引張強さ、 A_b は六角ボルトの有効断面積である.

C	治南京八	ボルト呼び径			有効断面積	引張強さの	t_{bu} (N/mm ²)	引張耐え	ל $P_b(kN)$	せん断耐力 $Q_b(kN)$		
Case	强度区分	呼び径	×	首下サイズ	(mm^2)	JIS規格	実強度	JIS規格	実強度	JIS規格	実強度	
1	4.8	M20	×	80	245	420	475	102.90	116.38	59.41	67.19	
2	4.8	M24	×	90	353	420	594	148.26	209.68	85.60	121.06	
3	4.8	M30	×	100	561	420	447	235.62	250.77	136.04	144.78	
4	8.8	M20	×	80	245	830	898	203.35	220.01	117.40	127.02	
5	8.8	M24	×	90	353	830	845	292.99	298.29	169.16	172.21	
6	8.8	M30	×	100	561	830	934	465.63	523.97	268.83	302.52	
7	10.9	M20	×	80	245	1040	1121	254.80	274.65	147.11	158.57	
8	10.9	M24	×	90	353	1040	1124	367.12	396.77	211.96	229.08	
9	10.9	M30	×	100	561	1040	1089	583.44	610.93	336.85	352.72	
10	12.9	M16	×	80	157	1220	1277	191.54	200.49	110.59	115.75	
11	12.9	M20	×	80	245	1220	1258	298.90	308.21	172.57	177.95	

表-2.1 本実験で使用する六角ボルトの材料諸元

2.1.2 実験供試体の設置方法

本実験では、写真-2.1に示す万能試験機(島津製作所製UH-F2000kN)を使用した.図-2.1に示すような 治具を用いて、六角ボルトにせん断力が作用するように実験を行った.これらの治具は、上治具と下治 具、及び偏心をなくすための当て板治具から構成されている.六角ボルトを通す治具の穴は、六角ボル ト側はJIS B 1001に示されている3級孔径とした.ナット側は載荷中のボルトの傾きを無くすため、六角 ボルトが入る径(ボルト径+0.5mm)とした.なお、治具は全て無めっきのSM490材で作製した.

載荷実験に使用する実験供試体(六角ボルト)は、上治具側から入れ、下治具側から手締め程度の力(手 締めのトルクを計測した結果7N・m)でナットを固定した(写真-2.2).

2.1.3 載荷方法

載荷方法は引張単調載荷とし,載荷開始から六角ボルトが破断に至るまで実施し,載荷荷重及び変位 を計測した.測定は破断時の瞬間的な現象をとらえるために,動的測定(サンプリング間隔10Hz)とした. なお,せん断実験における載荷速度の規定がないため,本実験ではJIS Z 2241に示されている金属材料引 張試験の応力増加速度(2~20MPa/s)で行った.

実験は各 Case3本(Case1は2本)とし、破断するまでの荷重と荷重のばらつきについて検討を行った.



写真-2.1 万能試験機(UH-F2000kN)



単位:mm

Case	板幅 ^b (mm)	板厚t(mm)	穴径 $\varphi(mm)$
1, 4, 7, 11	75	25	24
2, 5, 8	75	25	28
3	100	25	35
6, 9	100	28	35
10	75	28	20

図-2.1 実験に使用する治具



写真-2.2 載荷実験のセットアップ状況

2.2 実験結果

2.2.1 変位-載荷荷重関係

図-2.2から図-2.5は変位と載荷荷重の関係を示したものである. 横軸は変位,縦軸は載荷荷重である. 図中の○印は降伏荷重時, △印は最大荷重時, ×印は六角ボルトの破断した時点を示している. また, 降伏荷重と最大荷重の平均値および標準偏差も図中に示している(標準偏差は最大荷重のみ). なお,降 伏荷重は明確な点が見られなかったため,線形関係から離れたときの荷重を降伏荷重とした. 写真-2.3 は破断した六角ボルトの破断状態である. なお,各ケースにおける六角ボルトの破断状態は巻末資料に 示した.

(a) 強度区分4.8の六角ボルトの場合(Case1~Case3)

図-2.2より,六角ボルトが最大荷重に達すると,徐々に荷重が低下して,20kN 程度で破断に至っている. その時の変位量は最大荷重時の変位量の約2~3倍である.実験終了後の六角ボルトの破断面を**写真**-2.3(a)に示す.破断面を見ると,一部バリが見られる.このことから,強度区分が4.8の六角ボルトは, 靭性があることがわかる.また,最大荷重は M20(Case2)を除き引張耐力(実強度)から算出したせん断耐力よりも9.4%~12.7%程度大きくなっている.

(b) 強度区分8.8の六角ボルトの場合(Case4~Case6)

強度区分が8.8の六角ボルトの場合,強度区分4.8の六角ボルトと異なり,六角ボルトが最大荷重に達す ると,急激に荷重が低下し,最大荷重に達してから1mm 程度の変位で破断に至っている.したがって, 強度区分が4.8の六角ボルトに比べて靱性が小さい.また,引張耐力(実強度)から算出したせん断耐力は 8.1%~17.8%程度大きくなっている.

(c) 強度区分10.9の六角ボルトの場合(Case7~Case9)

強度区分が10.9の六角ボルトの場合,強度区分8.8の六角ボルトと同様に最大荷重に達してから荷重が 急激に低下し,最大荷重に達してから1mm程度の変位で破断に至っている.また,引張耐力(実強度)か ら算出したせん断耐力は4.7%~9.4%程度大きくなっている.

(d) 強度区分12.9の六角ボルトの場合(Case10, Case11)

強度区分が12.9の六角ボルトの場合,最大荷重に達した直後に破断に至っている.また,引張耐力(実 強度)から算出したせん断耐力よりも3.0%~3.5%程度大きくなっている.実験終了後の六角ボルトの破断 面を**写真-2.3(b)**に示したように,破断面にバリがわずかしかない.このことから,強度区分が12.9の六角 ボルトは,靭性がほぼないと考えられる.

以上より,強度区分4.8のような小さい六角ボルトについては,最大荷重に達してから破断に至るまでのせん断変形量が大きく,強度区分が大きくなるにつれて,せん断変形量が小さくなる.**写真-2.4**は破断する瞬間の状況であるが,強度区分4.8の六角ボルトでは破断後もボルトは治具に残っているが,強度区分が10.9の六角ボルトになると,破断直後に六角ボルトが飛んでいる様子がわかる.

表-2.2は図-2.2から図-2.5に示した各六角ボルトにおける最大荷重の標準偏差をまとめたものである. 表より,一部を除き強度区分が小さく,径が小さい六角ボルトの方が最大荷重のばらつきが小さい傾向 にあることがわかる.



図-2.2 変位-載荷荷重の関係(強度区分4.8)







図-2.4 変位-載荷荷重の関係(強度区分10.9)





(a) Casel (強度区分4.8, ボルト径 M20)



(b) Case11(強度区分12.9, ボルト径 M20) 写真-2.3 実験終了後のボルトの破断面



(a) Case1(強度区分4.8, ボルト径 M20)



(b) Case9(強度区分10.9, ボルト径 M30) 写真-2.4 六角ボルトの破断状況(動画のスナップショット)

		ボルト径							
		M16	M20	M24	M30				
	4.8	-	1.16	0.82	1.17				
没在区公	8.8	-	1.73	7.79	2.15				
强度凶力	10.9	-	2.67	6.44	5.87				
	12.9	2.18	4.88	-	-				
- : 実験していない									

表-2.2 六角ボルトの標準偏差(最大荷重)

13

2.2.2 せん断荷重とせん断耐力の関係

道路橋示方書II鋼橋・鋼部材編¹⁰において、せん断応力は引張強度(引張強さ)に係数1/√3を乗じること で求めるよう規定されている.しかし、図-2.2から図-2.5に示したように、実際には1/√3に比べて大きな 値になっている.そこでは、本研究では、せん断耐力を求めるためには引張強度にどれくらいの係数を 乗じればよいのか、次式に示すようにせん断荷重を引張耐力で割ることで求めた.

$$\alpha = \frac{Q}{P_p} \tag{2.3}$$

ここで、aはせん断耐力を求めるために引張耐力に乗じる係数であり、本研究ではせん断引張比と呼ぶ. なお、道路橋示方書¹⁰⁾で示されている係数($1/\sqrt{3}$)のせん断引張比aは0.578に相当する. Qはせん断荷重で あり、ここでは載荷実験で得られた六角ボルトの最大荷重を用いた. P_p は(2.1)式で求めた六角ボルトの引 張耐力であり、本研究では**表-2.1**に示した実強度を用いた.

図-2.6は各六角ボルトにおけるせん断引張比の結果である. 横軸は六角ボルトの供試体番号, 縦軸はせん断引張比である. 図中には, 道路橋示方書¹⁰に記載されている係数(1/√3 ≒0.578)も示した. 比較のために, ボルト径で結果を並べた図と, ボルトの強度区分で結果を並べた図を示す. 図より, Case2(強度区分4.8, M24)を除きせん断引張比は1/√3よりも大きくなっている. 六角ボルトの径で比較した場合, 六角ボルトの径がM30になると標準偏差が0.0081となり, ばらつきが小さくなっている(図-2.6(a)). また, ボルトの強度区分で比較した場合, 強度区分が大きくなるにつれて, せん断引張比のばらつきは小さくなっている(図-2.6(b)).

以上より, 強度区分が大きくなるとせん断引張比のばらつきが小さくなることがわかった. さらに, 六角ボルトの径をM30にすると, せん断引張比のばらつきが小さくなることもわかった.







図-2.6 せん断引張比とそのばらつき

2.3 六角ボルトに作用する軸力がせん断力に与える影響

前節では六角ボルトを手締めした場合について検討した.しかし,実際は機械を用いて六角ボルトを 締め付けているため,六角ボルトには手締め以上の軸力が作用している.そのため,軸力により六角ボ ルトに生じるせん断力が変化している可能性がある.そこで,手締め以上の軸力を六角ボルトに加えた 場合の影響について検討した.

実験では、Case1(強度区分4.8、M20)、Case8(強度区分10.9、M24)、Case9(強度区分10.9、M30)を対象 とした.ここでは機械締めしたCase名をCase1-T、Case8-T、Case9-Tとする.本研究では、Case1-TとCase8-T については1本、Case9-Tについては3本実験を実施した.六角ボルトに加える軸力は、締付けトルクの一 般的な管理値とされる六角ボルトの降伏強度に対して50~70%の軸力で締付けることとした(**写真-2.5**).



写真-2.5 機械(インパクトレンチ)により六角ボルトに軸力を導入する様子

図-2.7は変位と載荷荷重の関係を示したものである. 横軸は変位, 縦軸は載荷荷重である. 比較のため, 手締めした場合の結果も図中に示した(ただし,手締めした結果は,平均値を示している).

機械締めした場合,手締めした場合に対する最大荷重の増加量はCase1-Tで7.1%, Case8-Tで1.6%, Case9-Tで1.8%程度である.また,挙動もほぼ同じである.したがって,本実験の範囲内では,機械締め による軸力増加がせん断力に与える影響はないと考えられる.なお,機械締めした場合は載荷開始時に 急激な立ち上がりが見られる.これは軸力により治具間に生じる摩擦力が大きくなったためと考えられる.





3. 複数の六角ボルトを設置した場合のせん断載荷実験

3.1 実験概要

3.1.1 実験供試体

前章では、六角ボルト単体のせん断耐力について載荷実験により検討した.しかし、支承取り付けに は六角ボルト複数本使用しているため、載荷状況により各六角ボルトに生じる応力の状態や最大荷重も 変化する可能性が考えられる.本章では、六角ボルトを実際の支承配置に取り付けた場合の六角ボルト 全体としての耐力等について載荷実験により検討した.また、再現解析により、各ボルトに作用した引 張力及びせん断力も求めている.この結果については巻末資料に示した.

本研究では、支承に使用されている六角ボルト(S45C:機械構造用炭素鋼)を対象とした.対象とした 六角ボルトの材料諸元は表-3.1に示したとおりである.表中の引張荷重に示した実強度は、ミルシートに より得られたデータである.なお、径が36mm(M36)の六角ボルトの引張強度は計測されていなかったた め、JIS で記載されている引張強度から算出した値のみ示した.本実験ではゴム支承本体の平面寸法が 570mm×570mmの支承を想定し、六角ボルトは図-3.1に示すように、M24の六角ボルトの場合は8本、M36 の六角ボルトの場合は4本取り付けた.

表-3.1 本実験で使用する六角ボルトの材料諸元

++ 65	- ビュレ 公	没在风入	引張荷重(kN)				
	ホルト住	油皮区方	JIS [*]	実強度			
S45C	24(M24)	8.8	293	307			
	24(M24)	10.9	367	406			
	36(M36)	8.8	678	-			

[※]JIS に記載されている引張強度に断面積をかけて算出



3.1.2 実験装置のセットアップ方法

本研究では図-3.2および写真-3.1に示すような実験装置を用いた.実験では、ベースプレート(SM490材)と載荷治具(SM490材)を六角ボルトで接合し、1基又は2基の油圧ジャッキ(容量:200kN、最大ストロ ーク:100mm)を用いて水平方向に載荷することで、接合させた六角ボルト(実験供試体)を破断させた. なお、ベースプレートと載荷治具の間には、できるだけ摩擦が生じないよう接触面に磨きをかけた.

六角ボルトはトルクレンチにより,所定の値で締め付けた.ここで,六角ボルトを締め付ける大きさは,ベースプレートのネジ部が切れない大きさとし,M24は229.3Nm,M36は804.6Nm とした.

ジャッキにはロードセルを設置し、載荷荷重を計測した.また、載荷治具に変位計を設置し、載荷治 具の水平及び鉛直変位を計測した.さらに、六角ボルトに生じたせん断力を把握するために、載荷治具 の六角ボルト穴近傍にひずみゲージを貼り付け、六角ボルトを介して載荷治具に生じるひずみを計測し た.各計測位置および各ボルトの名称は図-3.3に示した通りである.



図-3.2 実験装置の概要(載荷高 500mm)



写真-3.1 実験装置のセットアップ状況(載荷高 500mm)



図-3.3 変位計及びひずみゲージの位置

3.1.3 載荷方法

本研究では、支承への作用状況の違いによる六角ボルト全体の耐力の変化を検討するために、載荷高 および載荷方向を変化させて実験を行った.表-3.2及び図-3.4に本実験で検討したケースを示す.表中の 載荷高は、ベースプレートからの高さであり、実際の支承の高さを想定して設定した.なお載荷高が 0(H=0)はせん断力が卓越した場合に相当する.偏心量は、図-3.4に示すように、載荷治具の中心位置から 偏心した距離であり、実験では載荷治具の端部とした.載荷方向は、図-3.3や図-3.4に示すように斜め載 荷したときの角度であり、実験では45°とした.本報告書では、載荷治具に対して平行に載荷したケース を基準載荷、偏心して載荷したケースを偏心載荷、斜め方向に載荷したケースを斜め載荷と呼称する. 基準載荷および斜め載荷では、ジャッキを2基使用するため、載荷治具の左右に取り付けた変位計により、 実験供試体にねじりが生じないように監視しながら載荷した.

実験では、全ての六角ボルトが破断又はジャッキのストロークが限界に達するまで載荷を行った.得られた結果から、各ケースにおける六角ボルト全体の耐力を比較した.また、載荷治具より得られた水 平変位、鉛直変位、ひずみから、六角ボルトにどのような応力が生じたか検討した.ただし、偏心載荷 と斜め載荷は、ひずみゲージの向きと実際の主ひずみの方向が合っていなかったため、正しいひずみは 計測できなかった.

	対象とするボルト		載荷高H	偏心量e	載荷方向	
	ボルト径	強度区分	(mm)	(mm)	(°)	
Case 1	M24	8.8	0	0	0	
Case2	M24	8.8	300	0	0	基
Case3	M24	8.8	500	0	0	準
Case4	M24	8.8	750	0	0	載
Case5	M24	10.9	500	0	0	荷
Case6	M36	8.8	500	0	0	
Case7	M24	8.8	0	350	0	載 偏
Case8	M24	8.8	500	350	0	荷心
Case9	M24	8.8	300	0	45	載斜
Case10	M24	8.8	500	0	45	荷め

表-3.2 実験ケース



3.2 基準載荷による六角ボルトの耐力

3.2.3 載荷高が異なる場合(Case1~4)

(1)荷重と変位の関係

図-3.5は水平変位と載荷荷重の関係を示したものである. 横軸は載荷治具の水平変位, 縦軸は載荷荷重 である. 載荷荷重は2基のロードセルより計測した荷重の合計,水平変位は左右の変位計より計測した変 位の平均を示した. なお,載荷高が750mm(Case4)については,ジャッキストロークの限界に達しても一 部の六角ボルトが破断しなかったため,六角ボルトが全て破断する前に実験を終了した.

図より,載荷高が300mm(Case2)及び500mm(Caes3)の場合,最大荷重は載荷高0(Case1)に対して4%及び 14%程度低下している.一方,破断に至る水平変位は60%及び90%程度大きくなっている.載荷高が 750mm(Case4)の場合,最大荷重はCase1に比べて40%程度低下している.なお,水平変位が0における100kN 程度の急激な荷重の立ち上がりは,六角ボルトを締め付けたことによる下沓とベースプレート間に生じ る摩擦の影響と考えられる.

本研究では参考として,道路橋示方書¹⁰に記載されているせん断耐力の推定式を基に六角ボルト全体の 耐力を次式により算出した.

$$F_b = \frac{\sigma_{bu}}{\sqrt{3}} A_b n = \frac{F_{bu}}{\sqrt{3}} n \tag{3.1}$$

ここで, *F_b* は六角ボルト全体の耐力, *F_{bu}* は**表-3.1**で示した六角ボルト単体の引張荷重, *σ_{bu}* は引張強さ, *A_b*は六角ボルトの有効断面積, *n* は六角ボルトの本数である.本研究では, **表-3.1**で示した M24で強度区 分8.8の六角ボルトにおける引張荷重を用いて六角ボルトの耐力の合計を求めた.その結果,全体の耐力 は1418kN であった.

破断までの載荷荷重の最大値と比較した結果,実験値と計算値の誤差は,Case1では5%,Case2では2% 程度である.一方,Case3では約10%,Case4になると約35%となり,計算値との誤差は大きくなる.その ため,載荷高が高くなるとせん断耐力のみで六角ボルト全体の耐力を評価することは困難になる.





(2) 六角ボルトに生じるひずみと破断状態

図-3.6は、六角ボルト穴近傍の載荷治具のひずみ量を示したものである.ここでは載荷高が0(Case1)と 500mm(Case3)の結果を示した.横軸は載荷治具の水平変位、縦軸は六角ボルト穴近傍のひずみ量である. 載荷治具に生じるひずみは、六角ボルトを介して載荷治具に圧縮ひずみ(負値)として生じるため、圧縮 ひずみが大きいほど六角ボルトにせん断応力が生じていることを意味している.

載荷高が0(Case1)の場合,図-3.6(a)に示すように,載荷開始から1mm 程度までは載荷側に近い六角ボル ト穴付近(No.1~No.3)にひずみが生じている.しかし,1mm を超えた辺りから,ひずみが低下している. 一方,載荷側から離れた位置(No.4~No.8)のひずみは,水平変位が1mm あたりから増加している.これよ り,最初は載荷側の六角ボルトに力が集中し,その後に他の六角ボルトにも力が作用すると考えられる. 載荷高が500mm(Case3)の場合,図-3.6(b)に示すように載荷側のひずみ(No.1~3)は最大で-100µ 程度しか生 じていない.一方,載荷側から離れた位置(No.6~8)のひずみは,最大荷重時に-700µ 近くまで達している. この計測結果から,載荷側の六角ボルトに作用したせん断力は非常に小さいと考えられる.

ここで、載荷治具のひずみからせん断力の合計を算出してみた. せん断力は得られた載荷治具に生じるひずみに鋼材のヤング率(2.0×10⁵N/mm²)をかけ、この値を六角ボルトに作用させることで、六角ボルトのせん断応力度を算出した. なお、六角ボルトはベースプレート面を支点とした片持ちばりを仮定して(長さは板厚の32mm、幅はボルト径の24mm)、せん断応力度を計算した.

図-3.7はせん断力を算出した結果である. 横軸は水平変位,縦軸はひずみから算出したせん断力の合計 と載荷荷重である. 図中には載荷荷重の結果も示した. 算出した結果,両ケース共に合計したせん断力 の最大値は,載荷荷重の最大値に比べて約20%になっている. また,(3.1)式から,六角ボルト1本当たり のせん断耐力を計算すると177kN に対し,ひずみから算出したせん断力は最大で100kN 程度である. そ のため,せん断力以外に引張力の影響もあると考えられる. ただし,図-3.5に示したように,(3.1)式で算 出したせん断耐力の合計と載荷荷重の誤差が5%程度であったことから,全体の80%が引張力の影響とは 考えられない. したがって,六角ボルトに生じるせん断応力の具体的な数値は判定できない.

本研究では,載荷治具の鉛直変位から六角ボルトの鉛直変位を求めた.算出した結果を図-3.8に示す. ここでは,載荷治具は剛体と仮定し,載荷治具先端から各六角ボルト位置までの距離の比率で六角ボルトの鉛直変位を求めた.載荷高が0(Case1)の場合,最大荷重時でも六角ボルトの鉛直変位は0.3mm 程度である(図-3.8(a)).一方,載荷高が500mm(Case3)の場合,最大荷重時における載荷側の六角ボルトは7mm 以上鉛直方向に変位している(図-3.8(b)).

写真-3.2は六角ボルトの破断状況である.基準載荷の場合,同じ列の六角ボルトの破断状況は同じだったため,ここでは No.1,4,6を示した.載荷高が0(Case1)の場合,全ての六角ボルトはベースプレート面で破断しており,その破断面は平らである(写真-3.2(a)).一方,載荷高が500mm(Case3)になると写真-3.2(b) に示すように,載荷側である No.1から3の六角ボルトの破断面はベースプレート面に対して斜めで,かつ若干伸び出した変形が見られる.No.4から8はベースプレート面で破断している.載荷高が750mm(Case4) の場合,写真-3.2(c)に示すように No.1から5の六角ボルトは水平にかつ破断面付近の断面は小さくなっている.なお,破断しなかった No.6から8の六角ボルトは,若干の曲げ変形が見られた.

このように、載荷高が高くなると六角ボルトに作用する力や破断状態は各位置で異なる. そのため、 六角ボルト全体の耐力を評価するためには、前述した(3.1)式で示したせん断耐力のみで評価するのでは なく、引張耐力も考慮する必要がある.







(c) Case4 写真-3.2 実験終了後のボルトの破断状態

3.2.4 材料強度及びボルト径が異なる場合(Case5,6)

図-3.9は六角ボルトの強度や径を変えた場合における載荷荷重と水平変位の関係である.参考として Case3の結果も示した.図より,載荷荷重はどのケースもほぼ同じ挙動を示している.また,M36の六角 ボルト(Case6)になると,破断した時の水平変位が Case3に比べて55%程度大きくなっている.なお,Case6 については,水平変位0付近における荷重の立ち上がりが他のケースよりも100kN程度大きくなっている. 六角ボルトを締め付けた大きさが,M24の六角ボルトに比べて大きいため,下沓とベースプレート間の摩 擦力が大きくなったと考えられる.

写真-3.3は六角ボルトの破断状態である. 写真-3.3(a)に示した強度区分10.9の六角ボルト(Case5)の破断 形状を見ると,写真-3.2(b)で示した Case3とほぼ同じ破断形状であったことから,六角ボルトの強度区分 が変わっても,六角ボルトの破断挙動は変化しないと考えられる. M36の六角ボルト(Caae6)の場合,写 真-3.3(b)に示した六角ボルトの破断状況を見ると,ベースプレートのネジ部から破断していた. そのた め,ボルト径が変わると,破断挙動に変化又はばらつきがみられると考えられる.



図-3.9 水平変位-載荷荷重の関係(Case5,6)



(a) Case5



📩 :載荷方向

(b) Case6 **写真-3.3** 実験終了後のボルトの破断状態

3.3 偏心載荷, 斜め載荷による六角ボルト耐力

3.3.1 偏心載荷の場合(Case7,8)

(1) 荷重と変位の関係

図-3.10は偏心載荷(Case7,8)した場合の水平変位と載荷荷重の関係を示したものである. 横軸は水平変 位であり,載荷側(ジャッキ側設置側)で計測した水平変位を示した. 縦軸は載荷荷重である. 比較のた め,基準載荷(Case1:載荷高0, Case3:載荷高500mm)の結果も示した. なお, Case7(載荷高0)における No.5 の六角ボルト, Case8(載荷高500mm)における No.5と No.8の六角ボルトは,ジャッキストロークの限界 に達しても破断しなかった.

載荷高が0(Case7)の場合,基準載荷(Case1)に比べて最大荷重は約1/2に低下している.載荷高が 500mm(Case8)の場合も同様に基準載荷(Case3)に比べて最大荷重は約1/2に低下している.基準載荷と異な り,同じ列の六角ボルトでも同じ大きさの力が作用していなかったと推定される.



図-3.10 水平変位-載荷荷重の関係(Case7,Case8)

(2) 載荷治具の挙動メカニズム

図-3.11は載荷治具の水平及び鉛直変位の関係を示したものである. 横軸はジャッキ設置側の水平変位, 縦軸はジャッキなし側の水平変位と鉛直変位である.

載荷高が0(case7)の場合,最大荷重の水平変位は、ジャッキ設置側では5mm 程度に対し、ジャッキなし 側では1mm 程度であったため、載荷治具は反時計まわりに回転していたと考えられる.最大荷重時の鉛 直変位は、両側共に1mm 以下であり載荷治具は浮き上がっていない. No.5の六角ボルトが破断しなかっ たことも考慮して、図に示すように載荷治具はほぼ浮き上がらずに No.5の六角ボルトを軸として反時計 回りに回転する挙動を示していたと考えられる.

載荷高が500mm(Case8)の場合,最大荷重時における水平変位は,ジャッキなし側で負値になっている ため,載荷治具は反時計回りに回転していたと考えられる.鉛直変位は,ジャッキ設置側では8mm 程度 に対して,ジャッキなし側では1mm以下である.No.5およびNo.8の六角ボルトが破断しなかったことも 考慮して,図に示すように載荷治具はジャッキ設置側が持ち上がり,かつ,No.5および No.8付近を軸と して反時計回りに回転する挙動を示していたこと考えられる.



(3) 六角ボルトの破断状態

載荷高0(Case7)の場合,写真-3.4に示した六角ボルトの破断状態を見ると,六角ボルトはベースプレート面で破断しており,かつ破断面は平らである.したがって,せん断破断したといえる.また,破断しなかった No.5の六角ボルトを見ると,ほぼ変形していない.このことからも,このボルト回りに回転していたといえる.載荷高が300mm(Case8)の場合,写真-3.5に示すように,No.1,2,4の六角ボルトはベースプレート面に対して斜め方向かつ若干伸びて破断している.一方,No.3,6,7の六角ボルトは,ペースプレート面で平らに破断している.また,破断しなかった No.8の六角ボルトには変形が見られなかった.


写真-3.4 実験終了後のボルトの破断状態(Case7)



写真-3.5 実験終了後のボルトの破断状態(Case8)

3.3.2 斜め載荷の場合(Case9,10)

図-3.12に斜め載荷(Case9,10)した場合の水平変位と載荷荷重の関係を示す. 横軸は水平変位, 縦軸は載荷荷重である. 比較のため基準載荷(Case2:載荷高300mm, Case3: 載荷高500mm)の結果も示した. なお, Case10の場合, No.1,4,6-8の六角ボルトはジャッキストロークの限界に達しても破断しなかった.

載荷高が300mm(Case9)における最大荷重は,基準載荷(Case2)に比べて約8%低下している.載荷高が500mm(Case10)では,最大荷重は基準載荷(Case3)に比べて約34%低下している.

写真-3.6は、実験終了後の六角ボルトの破断状態を示したものである.載荷側に近い六角ボルトは、ベースプレート面で破断せず、少し上方の位置で破断している.また、破断したボルトの破断面を確認したところ、破断面付近の断面が小さくなっていた.また、**写真-3.6**に示すように、斜め載荷の場合も載荷治具の載荷側が持ち上がるような挙動を示したために、載荷側の六角ボルトには引張力の影響が大きくなったと考えられる.



図-3.12 水平変位-載荷荷重関係 (Case9,Case10)



(a) Case9 写真-3.6 実験終了後における六角ボルトの破断状態(その1)



(b) Case10 写真-3.6 実験終了後における六角ボルトの破断状態(その2)

4. アンカーボルトに使用する材質の違いによる耐力の検討

4.1 実験概要

前章までは六角ボルトを対象として耐力及び耐力のばらつきを検討した.本章以降は支承部を構成す る部品であるアンカーボルトを対象として,耐力及び耐力のばらつきを検討する.本章では,材質の違 いにおける耐力と耐力のばらつきについて検討した.

4.1.1 本研究で対象とする材質

本研究では、材質は一般構造用圧延鋼材(SS400)、ねずみ鋳鉄(FC250)及びダクタイル鋳鉄(FCD600) を対象とした(全て丸棒を使用). 表-4.1に本実験で使用したアンカーボルトの諸元を示す.表にはJISに 示されている引張強さと検査証明書(ミルシート)から得られた引張強さ(実強度)も示した.表中の引張 耐力およびせん断耐力は次式により算出した.なお、せん断耐力は道路橋示方書¹⁰⁾で示されているせん断 耐力の推定式を参考にした.

$$P_a = \sigma_{ua} \times A_s \tag{4.1}$$

$$Q_a = \frac{P_a}{\sqrt{3}} \tag{4.2}$$

ここで、 P_a はアンカーボルトの引張耐力、 Q_a はアンカーボルトのせん断耐力、 σ_{ua} はアンカーボルトに使用する材質の引張強さ、 A_s はアンカーボルトの断面積である.

	直径(mm)	断面積(mm ²)	長さ(mm)	引張強さ(N/mm ²)		引張耐力(kN)		せん断耐力(kN)	
				JIS規格	実強度	JIS規格	実強度	JIS規格	実強度
SS400	50	1963.5	500	400	469	785.4	920.9	453.4	531.7
FC250	50	1963.5	500	250	262	490.9	514.4	283.4	297.0
FCD600	50	1963.5	500	600	613	1178.1	1203.6	680.2	694.9

表-4.1 本実験で使用するアンカーボルトの材料諸元

4.1.2 実験のセットアップ

本実験では、所内実験棟の反力床(厚さ1500mm)にある貫通穴(内径54mm)を利用した.この貫通穴に アンカーボルトを差し込み、図-4.1に示す治具および油圧ジャッキを用いてせん断載荷を行った.アンカ ーボルトは、貫通穴に差し込んだ単管パイプで支え、ジャッキベースによりアンカーボルトの突き出し 長さが175mm(載荷治具の高さに合わせるため)になるように調整した(図-4.2).また、載荷試験中に載荷 治具の浮き上がり及び回転を防止するために鋼桁を用いた.なお、載荷治具と浮き上がり防止用の鋼桁 との間にフラットローラーを入れ、この間の摩擦を十分に低減した.さらに、載荷治具と反力床の間に は金属板とグリスを用いて、この間の摩擦も十分に低減した.実験のセットアップ状況を写真-4.1に示す.





図-4.2 単管によるアンカーボルトの支持図







写真-4.1 実験装置のセットアップ状況

4.1.3 載荷方法

実験は**写真-4.2**に示すように,アンカーボルトにねじりが作用しないよう2台の油圧ジャッキ(オックス ジャッキ:ACRL-10010)を用いて平行に載荷した.載荷に際して,載荷治具の左右に取り付けた変位計(共 和電業:DT-100A)により,載荷するときの変位差が大きくならないように注意を払いつつ載荷した.

載荷は単調増加載荷とし、アンカーボルトが破断するまで載荷した.計測はせん断載荷時のピーク値 を逃さず記録できるように動的測定(サンプリング間隔20Hz)とした.また載荷荷重は、ジャッキと載荷 治具の間に設置したロードセル(東京測器研究所: CLP-50CWS)で測定し記録した.

本研究では、各5本ずつ載荷実験を行った.得られた結果から、最大荷重とそのばらつきについて検討 を行った.



写真-4.2 載荷実験の実施状況

4.2 実験結果

4.2.1 水平変位-載荷荷重の関係

図-4.3は載荷実験で得られた水平変位と載荷荷重の関係である. 横軸は水平変位, 縦軸は載荷荷重である. また, 図中には(4.2)式から算出したせん断耐力及び最大荷重の平均と標準偏差を示した. なお, 載荷荷重は2基のロードセルより計測した荷重の合計, 水平変位は左右の変位計より計測した変位の平均を示した. 写真-4.3は実験終了後のアンカーボルトの破断状態である. なお, 全アンカーボルトの破断状態 は巻末資料に示した.

(1) SS400材の場合

SS400材の載荷結果を図-4.3(a)に示す. SS400材の場合, 500kNを超えたあたりから,剛性が徐々に低下 していき,700kN程度で破断する結果となった.この破断する荷重は,実強度から算出したせん断耐力に 比べて約1.3倍大きくなっている.また,最大荷重のばらつきは,他の材質に比べて最も小さかった.

実験直後のアンカーボルトの状態を見ると,破断面は反力床面でかつ水平に生じている(写真-4.3(a)).

FC250材の場合

FC250材の載荷結果を図-4.3(b)に示す.供試体FC250-2については,320kN付近で破断したため荷重が 低下したが,荷重が0にならなかったため,再度載荷を行っている.FC250材の場合,SS400材に比べて小 さい変位量で破断に至っている.またアンカーボルトの破断面を見ると,写真-4.3(b)に示すように反力 床面より下側で破断していた.これは,載荷中にアンカーボルトに若干の曲げが生じたために,引張ひ ずみがアンカーボルトに生じたためと考えられる.

破断に至る荷重は,引張耐力から算出したせん断耐力よりも大きい場合や小さい場合があった.また, 最大荷重のばらつきはSS400よりも大きかった.

(3) FCD600材の場合

FCD600材の載荷結果を図-4.3(c)に示す.供試体FC600-3,4,5については,破断したため荷重が低下した が,荷重が0にならなかったため,再度載荷を行っている.FCD600材の場合は,写真-4.3(c)に示すように, 反力床面に対して水平,及び反力床面に対して斜めに破断する場合があり,破壊形態にばらつきが生じ ていた.

水平変位はSS400材よりも大きくなっている.また,最大荷重は算出したせん断耐力よりも1.2倍~1.4 倍程度大きくなっている.一方,最大荷重のばらつきは,今回実施した材質の中で最も大きい結果となった.







図-4.3 水平変位-載荷荷重の関係(その2)



(a) SS400 材



(b) FC250 材 写真-4.3 実験終了後のアンカーボルトの状態(その1)



(c) FCD600 材 写真-4.3 実験終了後のアンカーボルトの状態(その 2)

4.2.2 引張耐力とせん断荷重の関係

図-4.4は(2.3)式を用いて各材料のせん断引張比を示したものである.縦軸はせん断引張比である.図中には、道路橋示方書¹⁰⁾に示されている係数($1/\sqrt{3} = 0.578$)を図中に示した.

図より,SS400材のせん断引張比は平均0.753であり,道路橋示方書¹⁰に示されている係数よりも大きい 値になっている.同様に,FCD600材についてもせん断引張比は平均0.742になっている.しかし,標準偏 差(最大荷重のばらつき)はSS400材に比べて大きいことに留意する必要がある.FC250材の場合は,せん 断引張比は0.633であり,道路橋示方書¹⁰に示されている係数よりも大きくなっている.しかし,標準偏 差は0.1035となっており,SS400材の約10倍である.したがって,鋳鉄の場合は,最大荷重に大きなばら つきがあるため,損傷誘導する部品には適していないと考えられる.



図-4.4 材質の違いによるせん断引張比とそのばらつき

5. アンカーボルトに使用する径の違いによる耐力の検討

5.1 実験概要

前章ではアンカーボルトに使用する材質の違いにおける耐力と耐力のばらつきについて検討した.本 章では、アンカーボルトの径を変えたせん断載荷実験を行い、アンカーボルト径の違いによる耐力及び 耐力のばらつきについて検討した.

5.1.1 実験供試体

本研究では,前章の実験で最大荷重のばらつきが最も小さかった一般構造用圧延鋼材(SS400)の丸鋼を 対象とした.アンカーボルト径はφ32及びφ38とした.表-5.1に本実験で使用する実験供試体の諸元を示す. 表には,JISに示されている引張強さと検査証明書(ミルシート)から得られた引張強さ(実強度)も示した. なお,表中の引張耐力およびせん断耐力は,(4.1)式および(4.2)式から算出した.

直径(mm)	材質	断面積(mm ²)	長さ(mm)	引張強さ(N/mm ²)		引張耐力(kN)		せん断耐力(kN)	
				JIS規格	実強度	JIS規格	実強度	JIS規格	実強度
32	SS400	804.2	400	400	446	321.7	358.7	185.7	207.1
38	SS400	1134.1	400	400	470	453.6	533.0	261.9	307.7

表-5.1 本実験で使用するアンカーボルトの材料諸元

5.1.2 実験のセットアップ及び載荷方法

実験では、前章と同様に所内実験棟の反力床(厚さ1500mm)にある貫通穴(内径54mm)を利用した.本 実験では、載荷時に載荷治具が浮き上がらないように載荷治具を改良した(図-5.1,図-5.2).また、載荷 治具とアンカーボルト及び貫通穴とアンカーボルトの間にスリーブ管(機械構造用炭素鋼:S45C)を設け ることで、これらの間に隙間が生じないようにした(図-5.3).その他のセットアップ方法は前章の載荷実 験の方法と同様である.本実験のセットアップ状況を写真-5.1に示す.

前章で示した載荷実験と同様に,実験供試体にねじりが作用しないように,2台の油圧ジャッキ(オッ クスジャッキ:ACRL-5015)を用いて平行に載荷した.載荷に際して,載荷治具の左右に取り付けた変位 計(共和電業:DT-100A)により,載荷するときの変位差が大きくならないように注意を払いつつ載荷した (写真-5.2).載荷は単調増加載荷とし,アンカーボルトが破断するまで載荷した.計測はせん断載荷時の ピーク値を逃さず記録できるように動的測定とした.また載荷荷重は,ジャッキと載荷治具の間に設置 したロードセル(東京測器研究所:CLP-50CWS)で測定した.

本研究では、各アンカーボルト径につき5本ずつ載荷実験を行った.得られた結果から、最大荷重とそのばらつきについて検討を行った.





図-5.2 載荷治具の詳細図



(a) *φ*32



(b) *φ*38 図-5.3 スリーブ管の詳細図

φ54.0

単位:mm

φ38

¢40 φ54



写真-5.1 実験装置のセットアップ状況



写真-5.2 載荷実験の実施状況

5.2 実験結果

5.2.1 水平変位-載荷荷重の関係

図-5.4は載荷実験で得られた水平変位と載荷荷重の関係である. 横軸は水平変位, 縦軸は載荷荷重である. また, 図中には(4.2)式から算出したせん断耐力及び最大荷重の平均と標準偏差を示した. なお, 載荷荷重は2基のロードセルより計測した荷重の合計, 水平変位は左右の変位計より計測した変位の平均を示した. 写真-5.3は実験終了後の実験供試体の破断状態である. なお, 全実験供試体の破断状態は巻末資料に示した.

φ32の場合,図-5.4(a)に示すように、260kNから270kN程度で破断する結果となった.この破断する荷 重は、実強度から算出したせん断耐力に比べて約1.3倍大きくなっている.また、実験直後のアンカーボ ルトをみると、反力床面で破断している(写真-5.3(a)).

φ38の場合,図-5.4(b)に示すように,390kNを超えたあたりで最大荷重に達している.その後,急激に 荷重が低下して破断に至っている.また破断面を見ると,写真-5.3(b)に示すように反力床面で破断して いる.



図-5.4 水平変位-載荷荷重の関係



(a) *ø*32



(b) φ38 写真-5.3 実験終了後におけるアンカーボルトの破断状態

5.2.2 引張耐力とせん断荷重の関係

図-5.5は(2.3)式から算出したせん断引張比を示したものである. 図中には道路橋示方書¹⁰⁾に示されている係数($1/\sqrt{3} \doteq 0.578$)及び前章で示したSS400材(φ 50)の実験結果を示した. 図より,算出したせん断引張比は道路橋示方書¹⁰⁾に示されている係数よりも大きくなっている. また,各アンカーボルト径で標準偏差も小さいことから,せん断引張比のばらつきも小さい.

したがって, SS400材の場合, アンカーボルト径が変わってもせん断引張比のばらつきが小さく, かつ, せん断引張比を0.75程度にすれば, せん断耐力を精度よく求めることが可能である.



※ \$ 00 は 4 早の美缺結果を再掲載 図-5.5 せん断引張比とそのばらつき

6. アンカーボルトに曲げが作用した場合の検討

6.1 実験概要

4章及び5章では、せん断力のみがアンカーボルトに作用した場合の耐力及び耐力のばらつきについて 検討した.本章では、アンカーボルトに曲げが作用した場合に、アンカーボルトに作用する力や耐力が どのように変化するのか検討した.

6.1.1 実験供試体

本研究では,前章と同様にφ32の一般構造用圧延鋼材(SS400)丸鋼を対象とした.表-6.1に本実験で使用 したアンカーボルトの諸元を示す.表には,JISに示されている引張強さと検査証明書(ミルシート)から 得られた引張強さ(実強度)も示した.

直径(mm)	材質	断面積(mm ²)	長さ(mm)	引張強さ(N/mm ²)		引張耐力(kN)		せん断耐力(kN)		
				JIS規格	実強度	JIS規格	実強度	JIS規格	実強度	
32	SS400	804.2	400	400	451	321.7	362.7	185.7	209.4	

表-6.1 実験で使用するアンカーボルトの材料諸元

6.1.2 実験のセットアップ及び載荷方法

実験のセットアップ状況を写真-6.1及び図-6.1に示す.4章や5章と同様に所内実験棟の反力床(厚さ 1500mm)にある貫通穴(内径54mm)を利用し,図に示した載荷治具を用いて実験を行った.アンカーボル トは反力床の底面と載荷治具をボルトで固定した.なお,本実験では載荷治具自体の浮き上がりは拘束 していない.それ以外の実験条件は,前章の載荷実験の条件と同様である.

実験では載荷高を125mmから600mmに変化させ、前章で実施したせん断を作用させた場合に比べて、 アンカーボルトに作用する力がどのように変化するのか検討を行った.



(a) 全体



(b) 正面から見た図

(c) 実験供試体(アンカーボルト)

写真-6.1 実験装置セットアップ状況



図-6.1 実験装置の詳細図









単位:mm

図-6.3 載荷治具の詳細図

6.2 設計荷重の算出方法

アンカーボルトに曲げが作用する場合, せん断力以外に引張力(軸力)も考慮する必要がある. ここで, 載荷治具は剛体でかつ図-6.4 に示すように載荷治具先端を支点として回転すると仮定した場合, アンカ ーボルトに作用する引張力(軸力)とせん断力は次式となる.

$$N_a = F\left(\frac{H}{L}\right) \tag{6.1}$$

$$Q_a = F \tag{6.2}$$

Naと Qaはアンカーボルトに作用する軸力とせん断力, Fは載荷荷重, HとLは載荷高とアンカーボルトから載荷治具先端の距離である.引張応力およびせん断応力は,アンカーボルトの断面積で割ることで求められる.

$$\sigma_t = \frac{N_a}{A_s} = \frac{F}{A_s} \left(\frac{H}{L}\right) \tag{6.3}$$

$$\tau = \frac{Q_a}{A_s} = \frac{F}{A_s} \tag{6.4}$$

σ_tとτはアンカーボルトの引張応力とせん断応力, A_sはアンカーボルトの断面積(804.2mm²)である.ここ でアンカーボルトは、曲げまたは引張応力度とせん断応力度が作用する状態を想定し、せん断ひずみエ ネルギーー定説に基づき合成応力度で評価する.合成応力度σは次式で示した垂直応力度を用いる.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_i^2 + 3\tau^2} \tag{6.5}$$

(6.3)式及び(6.4)式を(6.5)式に代入して式を変形すると、合成応力度は次式のようになる.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{N}{A_s}\right)^2 + 3\left(\frac{Q}{A_s}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{F}{A_s}\right)^2 \left(\frac{H}{L}\right)^2 + 3\left(\frac{F}{A_s}\right)^2}$$

$$= \frac{F}{A_s} \sqrt{\left(\frac{H}{L}\right)^2 + 3}$$
(6.6)

ここで、合成応力度oがアンカーボルトの引張強さouに達したとき、載荷荷重Fuは上式を変形すると、

$$F_{u} = \frac{\sigma_{u}A_{s}}{\sqrt{\left(\frac{H}{L}\right)^{2} + 3}}$$
(6.7)

となる.

式中の F_u はアンカーボルトが引張強さに達するときの載荷荷重(本報告書では設計荷重と呼称), σ_{tu} は 引張強さ, A_s はアンカーボルトの断面積, $H \ge L$ は図-6.4に示した作用高さとアンカーボルト中心から載荷 治具端部までの距離である.ここで,引張強さは表-6.1に示した実強度(451N/mm²)を用いた.



図-6.4 載荷高とアンカーボルトから載荷治具先端までの距離

6.3 実験結果

6.3.1 水平変位-載荷荷重の関係

図-6.5は載荷治具の水平変位と載荷荷重の関係である. 横軸は載荷治具の水平変位, 縦軸は載荷荷重である. 図中には(6.7)式で求めた設計荷重を示した. 写真-6.2は実験終了後におけるアンカーボルトの状態である. なお,全供試体の実験終了後の状態は巻末資料に示した.

図より、載荷高が600mm以下では、ほぼ同じ挙動を描いている.また、最大荷重は設計荷重よりも大きくなっている.ただし、載荷高が高くなるにつれて破断に至る水平変位は大きくなっている.そのため、写真-6.2に示すように載荷高が高くなるにつれて、実験供試体に曲げが生じている.一方、載荷高750mmは、ジャッキストロークの限界に達しても破断しなかった.写真-6.2(e)を見ると、ネジ部が若干細くなっている.そのため、アンカーボルトには引張力も作用していたことがわかる.



図-6.5 水平変位-載荷荷重の関係(その1)










(a) 載荷高 125mm



(b) 載荷高 300mm



(c) 載荷高 500mm



(d) 載荷高 600mm





:載荷側

(e) 載荷高 750mm 写真-6.2 実験終了後のアンカーボルトの状態

6.3.2 せん断荷重との比較

載荷高さを変化させることによる最大荷重の変化を調べた.図-6.6は各アンカーボルトの最大荷重を示 したものである.載荷高の下に掲載した*H/L*は,図-6.4に示した載荷高をアンカーボルトから載荷治具先 端までの距離で割ったものである,ただし,破断に至らなかった載荷高750mmの結果は掲載していない. 縦軸は最大荷重を図-5.4(a)で示したφ32における最大荷重(270.1kN,ここでは最大荷重(純せん断)と呼 称)で割った値であり,せん断荷重に対する載荷荷重の比を表している.また図中には各アンカーボルト における最大荷重の平均と標準偏差を示した.

図より,最大荷重と最大荷重(純せん断)の比は1.0程度であり,標準偏差も0.02以下と小さくなっている.したがって,載荷高を変化させても*H/Lが*0.89より小さい場合はせん断荷重のみで評価しても問題ないと考えられる.なお,アンカーボルトが破断しなかった載荷高750mmの場合,*H/L*は1.4である.



図-6.6 載荷高を変えた場合の最大荷重/最大荷重(純せん断)

6.3.3 引張力とせん断力の割合

図-6.7はアンカーボルトに作用する引張とのせん断の割合を示したものである. 横軸は,図-6.4に示した載荷高をアンカーボルトから載荷治具先端までの距離で割ったものである. 縦軸は鉛直変位を水平変位で割った値であり,この値が1.0を超えると引張力が支配的になる. なお鉛直及び水平変位は,図に示した位置で計測した.

図より,載荷高が500mm(H/L =0.74)までは,鉛直変位/水平変位の割合は0.4以下であるため,せん断が支配的であると考えられる.しかし,載荷高が600mm(H/L =0.89)になると鉛直変位/水平変位の割合は0.61と引張力の影響が大きくなり,載荷高が750mm(H/L =1.11)になると,鉛直変位/水平変位の割合は1.37と引張力が支配的になる.



図-6.7 載荷高を変えた場合の最大荷重/最大荷重(純せん断)

6.4 アンカーボルトに生じる合成応力度

本研究では, 簡易的に計測された載荷荷重から, アンカーボルトに生じる合成応力度を検討した. 合成応力度は道路橋示方書¹⁰⁾を基に次式で算出した.

$$\sigma = \left(\frac{\sigma_{t}}{\sigma_{tu}}\right)^{2} + \left(\frac{\tau}{\tau_{u}}\right)^{2}$$
(6.8)

式中の σ は合成応力度, $\sigma_t \ge \tau$ は引張応力とせん断応力であり、ここでは(6.3)式と(6.4)式から求めた. σ_{tu} は引張強さ、 τ_u はせん断強さである.ここで、引張強さは**表**-6.1に示した実強度(451N/mm²)、せん断強さは引張強さを前章で求めたせん断引張比(α =0.75、図-5.3)で乗じた値(338.25N/mm²)を用いた.

図-6.8 は合成応力度を求めた結果である.縦軸は合成応力度,横軸は図-6.4 に示した載荷高をアンカ ーボルトから載荷治具先端までの距離で割ったものである.ここでは、アンカーボルトが破断したケー ス(載荷高 750mm 以外)を示した.

図より,載荷高が125mm(H/L=0.19)及び300mm(H/L=0.44)では合成応力度は1.0から1.1程度である. しかし, H/L 増加につれて合成応力は増加していき,載荷高が600mm(H/L=0.89)になると合成応力は1.4 程度になる.



図-6.8 合成応力度

7. 結論

本研究では、支承部を構成する1つの部品である六角ボルト及びアンカーボルトを対象として、これら 部品の耐力や耐力のばらつき、さらに破断モード及び破断面の状態について載荷実験により確認した. 本研究の範囲内であるが、得られた知見は以下の通りである.

六角ボルトのせん断載荷試験

- ① 強度区分4.8のような小さい六角ボルトについては、最大荷重に達してから破断に至るまでのせん断 変形量が大きい.一方、強度区分10.9のように六角ボルトが大きくなるにつれて、せん断変形量が小 さくなる.また、強度区分が小さく、径が小さい六角ボルトの方が、最大荷重のばらつきが小さい 傾向にあることがわかった。
- ② 六角ボルトにおけるせん断引張比を求めた結果, Case2(強度区分4.8, M24)を除きせん断引張比は 1/√3 よりも大きくなった.また,強度区分が大きくなるとせん断引張比のばらつきが小さくなり, さらに六角ボルトの径をM30にすると,せん断引張比のばらつきが小さくなることもわかった.
- ③ 六角ボルトの降伏強度に対して50%~70%の軸力で機械締めした場合、手締めした場合に対する最大 荷重の増加量は約7%以下だったため、機械締めによる軸力増加がせん断力に与える影響はないと考 えられる。

複数の六角ボルトを設置した場合のせん断載荷実験

- 基準載荷(支承設置の方向に対して平行に載荷)の結果,載荷高が0(せん断力が卓越)の場合,載荷治 具は水平に移動する挙動を示す.そのため,六角ボルト全体には,主としてせん断力が作用する. また,最大荷重は道路橋示方書¹⁰⁾に記載されているせん断耐力の和とほぼ等しかった.
- ② 載荷高が高くなると、載荷治具の載荷側が浮き上がりながら水平移動する挙動を示す.この挙動に より、六角ボルトにはせん断力以外に引張力も作用するため、載荷高0に比べて破断に至る荷重が小 さくなる.したがって、支承としての破断を評価するためには、せん断力のみで評価するのではな く、引張力も考慮する必要がある.
- ③ 偏心載荷および斜め載荷した結果,載荷治具は平行載荷と異なる挙動を示すため、各六角ボルトに 作用する力が異なり、全体の破壊挙動も異なる.
- ④ ボルトの破断面を見ると、載荷高が0の場合は主にせん断力が作用するため、六角ボルトはベースプレート面でかつ水平に破断した.一方、載荷高が高くなると、破断面はベースプレート面に対して斜め方向に破断した.また、斜め載荷で載荷高が500mmの場合、載荷側に近い六角ボルトはベースプレートの上方で水平に破断していた.これらは、引張力の影響が大きくなった可能性が考えられる.

アンカーボルトに使用する材質の違いによる耐力の検討

- SS400の場合,最大荷重は,実強度から算出したせん断耐力に比べて約1.3倍大きくなっている.また, FCD600の場合は,最大荷重は算出したせん断耐力よりも1.2倍~1.4倍程度大きくなっている.一方, FC250の場合,破断に至る荷重は,引張耐力から算出したせん断耐力よりも大きい場合や小さい場合 があった.
- ② 各材質におけるせん断引張比を求めた結果,全ての材質においてせん断引張比は,道路橋示方書¹⁰ に示されている係数よりも大きかった.一方,標準偏差(最大荷重のばらつき)を見ると,一般構造 用圧延鋼材(SS400)が最も小さく,逆に鋳鉄(ねずみ鋳鉄(FC250),ダクタイル鋳鉄(FCD600))は大きく なった.したがって,鋳鉄は,損傷誘導する部品には適していないことがわかった.

アンカーボルトに使用する径の違いによる耐力の検討

- アンカーボルトの損傷状況及び破断面を見ると、φ32,φ38共に反力床面で水平に破断していた.その ため、載荷条件が同じなら、径を変えても破断形状は同じということがわかった.
- ② せん断引張比を求めた結果,道路橋示方書に記載されている係数(1/√3 ≒0.578)よりも大きかった.
 ③ また,せん断引張比のばらつき小さかった.

アンカーボルトに曲げが作用した場合の検討

- ① 水平変位と載荷荷重の関係から, *H*/*L*(載荷高/アンカーボルトから載荷治具先端までの距離)が1よ りも小さい範囲では,載荷高が変わっても最大荷重はほぼ同じであった.
- ② アンカーボルトの損傷状況及び破断面をみると、載荷高が高くなると、アンカーボルトに曲げ変形が生じていた。
- ③ 載荷荷重から合成応力求めた結果,載荷高が高くなると合成応力が徐々に増加する傾向にあること がわかった.

参考文献

- 1) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告,国土技術政策総合研究所 資料 No.814/土木研究所資料 No.4295, 2014.
- 2) 平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告,国土技術政策総合研究所資料 No.967/土木研究 所資料 No.4359,2017.
- 国土交通省社会資本整備審議会道路分科会,第5回道路技術小委員会,2016.6.
 https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000303.html
- 4) (公社)日本道路協会:道路橋示方書·同解説 V 耐震設計編, 2017.
- 植村佳大,高橋良和,長崎裕貴:メナーゼヒンジを有するロッカー橋脚の UBRC 補強による耐震性能 向上に関する検討,土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.75, No.4(地震工学論文集第38巻), p. I 391-I 407, 2019.
- 6) 秋本光雄,佐藤京,寺澤貴裕,葛西聡:地震時の超過作用を受けた橋梁の損傷制御を目的とした RC 橋脚の配筋に関する一提案,第22回橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,pp.81-84, 2019.
- 7) 布川博一,豊岡亮洋,齊藤正人,室野剛隆:倒壊方向制御構造で危機耐性を向上させたラーメン高 架橋の振動台実験,第22回橋梁等の耐震に関する設計シンポジウム講演論文集,pp.305-312, 2019.
- 8) 森屋圭浩,中尾尚史,星隈順一:津波の影響を受ける橋に対する損傷制御型支承の提案,第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,pp.511-518, 2016.
- 9) 西田秀明,鈴木慎也,星隈順一:損傷箇所の制御を考慮して設計した積層ゴム支承のせん断試験, 第74回土木学会年次学術講演会,I-90, 2019.
- 10) (公社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017.

参考資料

- 1. 六角ボルトのせん断載荷実験(六角ボルトの破断状況)
- 2. アンカーボルトのせん断載荷実験(アンカーボルトの破断状況)
- 3. 複数の六角ボルトを設置した場合のせん断載荷実験の再現解析

1. 六角ボルトのせん断載荷実験(六角ボルトの破断状況)

1.1 六角ボルト単体の実験結果

次ページ以降に載荷実験に使用した六角ボルトの損傷写真を示す.写真には以下を示している.

- ・六角ボルト全体(実験前,実験後)
- 各供試体の破断面

(1) Case1 (強度区分4.8, M20)



注:載荷実験では、写真に示されていない供試体1は軸力を考慮した実験を行った.そのため、写真に示されている供試体番号と本報告書本文の供試体番号は一致していない.しかし、本報告書では、便宜上、軸力を考慮していない供試体2と3を供試体Case1-1と供試体Case1-2と呼称した.

(2) Case2 (強度区分4.8, M24)



(3) Case3 (強度区分4.8, M30)



(4) Case4 (強度区分8.8, M20)



(5) Case5(強度区分8.8, M24)



(6) Case6 (強度区分8.8, M30)



(7) Case7 (強度区分10.9, M20)



(8) Case8(強度区分10.9, M24)



注:載荷実験では、写真に示されていない供試体1は軸力を考慮した実験を行った.そのため、写真に示されている供試体番号と本報告書本文の供試体番号は一致していない.しかし、本報告書では、便宜上、軸力を考慮していない供試体2~4を供試体Case8-1~供試体Case8-3と呼称した.

(9) Case9(強度区分 10.9, M30)



(10) Case10 (強度区分12.9, M16)



(11) Case11 (強度区分12.9, M20)



(12) Case1-T (強度区分4.8, M20, 軸力を考慮), Case8-T (強度区分8.8, M24, 軸力を考慮)



(13) Case9-T (強度区分10.9, M30, 軸力を考慮)



1.2 複数本ボルトを設置した場合の実験結果

次ページ以降に載荷実験に使用した六角ボルトの損傷写真を示す.写真には六角ボルトの破断面と破 断後の全体を示している.但し,破断しなかった六角ボルトについては,ボルト全体写真のみ示した. なお,写真中に示されている矢印は,載荷方向を示している(**写真-参 1.1**参照).



写真-参1.1 実験終了後の六角ボルトの破断面



(1) Case1(基準載荷:強度区分 8.8, M24, 載荷高 0)









(2) Case2(基準載荷:強度区分8.8, M24, 載荷高 300mm)









(3) Case3(基準載荷:強度区分8.8, M24, 載荷高500mm)






ボルト1			
	破断直後の六角オ	ボルトの破断面	
破断せず		破断せず	
載	荷治具から取り出した後	.後の六角ボルトの破断面	
-			
ボルト2			
破断直後の六角ボルトの破断面			
破断せず		破断せず	

(4) Case4(基準載荷: 強度区分 8.8, M24, 載荷高 750mm)

ボルト3			
破断せず	破断せず		
載荷治具から取り出した	後の六角ボルトの破断面		
ボルト4			
<u>ーー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</u>			
破断せず	破断せず		
載荷治具から取り出した	後の六角ボルトの破断面		

ボルト5		
破断直後の六角	ボルトの破断面	
破断せず	破断せず	
載荷治具から取り出した	後の六角ボルトの破断面	
ボル	· ት 6	
破断直後の六角	ボルトの破断面	
破断せず 破断せず		
載荷治具から取り出した後の六角ボルトの破断面		

破断せず

破断せず

ボルト7				
	破断直後の六角ボルトの破断面			
破断せず		破断せず		
載	荷治具から取り出した後の)六角ボルトの破断面		
	破断せず	破断せず		

ボルト 8			
破断せず			破断せず
載荷治具から取り出した			ボルトの破断面
	破断せず		破断せず



(5) Case5(基準載荷:強度区分 10.9, M24, 載荷高 500mm)









(6) Case6(基準載荷:強度区分8.8, M36, 載荷高500mm)





Case7(偏心載荷(e=350mm):強度区分8.8, M24, 載荷高0) (7)



ボルト5				
	破断直後の六角ボルトの破断面			
破断せず	2		破断せず	
載	荷治具から取り出した	後の六角	ボルトの破断面	
破断せず			破断せず	
		· b 6		
	破断直後の六角	ボルトの)破断面	
載	荷治具から取り出した	後の六角	ボルトの破断面	
	(and	123		







(8) Case8(偏心載荷(e=350mm): 強度区分 8.8, M24, 載荷高 500mm)



ボルト5			
破断直後の六角ボルトの破断面			
破断せず		破断せず	
載荷治具から取り出した後の六角ボルトの破断面			
	破断せず	破断せず	
ボルト6			





ボルト8		
破断直後の六角ボルトの破断面		
破断せず		破断せず
載	荷治具から取り出した	
	破断せず	破断せず











ボルト1			
破断せす	2		破断せず
載	荷治具から取り出した	後の六角ボル	の破断面
破断せず			破断せず
NY PL			

(10) Case10(斜め載荷(載荷方向 45°): 強度区分 8.8, M24, 載荷高 500mm)





ボルト 4			
破断直後の六角ボルトの破断面			
破断せず			破断せず
載	荷治具から取り出した	後の六角	ボルトの破断面
	破断せず		破断せず



ボルト6			
破断直後の六角ボルトの破断面			皮断面
破断せず			破断せず
載	荷治具から取り出した	後の六角オ	ドルトの破断面
	破断せず		破断せず

ボルト 7			
	破断直後の六角ボルトの破断面		
破断せず	s	破断せず	
載	荷治具から取り出した	2後の六角ボルトの破断面	
	破断せず	破断せず	

ボルト8			
破断直後の六角ボルトの破断面			
破断せず		破断せず	
載荷治具から取り出した後の六角ボルトの破断面			
	破断せず	破断せず	

2. アンカーボルトのせん断載荷実験(アンカーボルトの破断状況)

2.1 材質を変えた場合の実験結果

次ページ以降に載荷実験に使用した六角ボルトの損傷写真を示す.写真には以下を示している.

- ・アンカーボルト全体
- ・各供試体の破断面







(2) FC250







(3) FCD600








2.2 径を変えた場合の実験結果

次ページ以降に載荷実験に使用した六角ボルトの損傷写真を示す.写真には以下を示している.

- ・アンカーボルト全体
- ・各供試体の破断面

(1) Ø32







(2) Ø38







2.3 径を変えた場合の実験結果

次ページ以降に載荷実験に使用した六角ボルトの損傷写真を示す.写真には以下を示している.



載荷高 750mm は鋼棒が破断しなかったので、上部ネジ部と下部ネジ部のみ示した.

(1) 載荷高 125mm



(2) 載荷高 300mm





(3) 載荷高 500mm





(4) 載荷高 600mm





(5) 載荷高 750mm



3. 複数の六角ボルトを設置した場合のせん断載荷実験の再現解析

3.1 解析の概要

3章の複数の六角ボルトを設置した場合のせん断載荷実験では、下沓とベースプレートの間に取り付け られる複数本の六角ボルトに作用する力の作用状況と、六角ボルト全体の耐力を把握することを目的と した載荷実験を行った.しかし、各六角ボルトに作用する力については明らかにできない.そこで本章で は、複数本の六角ボルトに作用する力の作用状況の詳細を把握することを目的に、載荷実験の再現解析 を行い、各六角ボルトに作用する力について検討を行った.

3.1.1 解析モデル

解析モデルは複数本の六角ボルトを設置した場合のせん断載荷実験で行ったCase1~4(基準載荷),Case7 及びCase8(偏心載荷),Case10(斜め載荷)をモデル化の対象とした.解析モデル図を図-参3.1に示す.本研 究では,基準載荷であるCase1~4は対称性を考慮し1/2モデル,偏心載荷(Case7,8)と斜め載荷(Case10)は全 体をモデル化した.

簡略化のため図-参3.2に示すように、六角ボルトを円柱形でモデル化し、ネジ山を無視した分の隙間量 を補正するために載荷治具のボルト穴側面に隙間補正用要素を追加した.また、載荷治具と接触する六 角ボルトの一部は、載荷実験において確認されたき裂及び破断を考慮できるようにモデル化を行った.

各部品の接触条件を図-参3.3に示す.六角ボルトとベースプレート間については、ネジ山により高い摩 擦力で固定される部分は拘束し、拘束により過剰な力が発生することを避けるため、ベースプレート上 部の要素1層と、その層に接する六角ボルトの要素1層とその上の1層は拘束せず、接触を定義し、摩擦係 数は0とした.接触面積の大きい載荷治具とベースプレート間は載荷実験で測定した滑り摩擦力から算出 した摩擦係数を用い、載荷治具とワッシャー間及び六角ボルトと隙間補正用要素間の摩擦係数は0とした. 拘束条件として、H形鋼底面を完全拘束、支圧板と載荷治具及びボルトとワッシャーは接点共有により拘 束、ベースプレートとH形鋼は接点を剛体拘束した.



図-参3.1 解析モデル(その1)









図-参3.3 各部品の接触条件

3.1.2 材料特性

各部品の物性値は表-参3.1に示す通りとした.ヤング率及びポアソン比は,土木研究所資料第4090号「鋼 材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査」より鋼材物理定数の平均値/基準値の統計結果から算 出した.六角ボルトとボルト穴の隙間補正用要素は,S45Cの密度及びヤング率におねじの占有断面積を 乗じた値を用いた.

部品	材料	密度(g/cm ³)	ヤング率(N/mm ²)	ポアソン比	
載荷治具 支圧板 ベースプレート H形鋼	SM490	7.85	199800*	0.2811***	
ボルト ワッシャー	S45C	7.85	199800*	0.2811***	
隙間補正用要素	S45C (占有率43.75% ^{****)})	3.434	87410	0.2811***	
※ ヤング率	※ ヤング率 200000 N/mm ² (基準値)×0 999 = 199800 N/mm ² (平均値)				

表-参3.1 材料物性值

0.30(基準値)×0.937 = 0.2811(平均値) ** ポアソン比 ※※※ 占有率 補正用要素断面積 A1=P(ピッチ)×H1(ネジ山と谷の高さの差) ネジ山断面積 $A_2 = (P/8 + (3/4)P) \times H_{1/2} = (7/16)P \times H_1$ 占有率(下図参照) A2/A1=7/16=43.75% P/8 $H = \frac{\sqrt{3}}{2}P \qquad H_1 = \frac{5}{8}H$ 60 H_1 Η d

赤枠の面積: A1 = PH1 青枠の面積: A2 = (7/16)PH1 $A_1/A_2 = 7/16$ 占有率:

ボルト及びワッシャーの材料である S45C に対しては塑性を考慮した. S45C の降伏応力,引張強度, 伸びは、鋼材規格 JIS G 4051 より S45C の焼入焼き戻し状態の値をミルシートから得られた六角ボルト の実際の引張強さを用いて、以下のように補正した値を使用した.

・ボルト断面積: (20.752mm/2)²×π= 338.23mm²

・実測値から求めたボルト引張強さ(公称応力):306.67kN(実測値平均)/338.23mm²=906.7 N/mm²

・S45C 引張強さの規格値と実測値の差:906.7 N/mm² - 690 N/mm²(規格値)=216.7 N/mm²

・実測値で補正した降伏応力: 490 N/mm²(規格値)+216.7 N/mm² = 706.7 N/mm²

上で得られた応力は公称応力である.しかし、解析ソルバに対する入力値は真応力、真ひずみである ため, S45Cの伸びの規格値17%を使用して真応力及び真ひずみに換算した.

・引張強さ(真応力): 906.7 N/mm²(公称応力)×(1+0.17) = 1060.8 N/mm²

Р

・ひずみ(真ひずみ): ln(1+0.17)=0.157

また,引張強さに達した後は,剛性が-1000N/mm²になるように設定した(図-参3.4).



3.1.3 き裂発生条件及び損傷発展

ボルトヘッド付近及びベースプレートと接している部分を除いた要素に対して、き裂の進展を把握す るために XFEM を適用した.ボルトの破断は引張とせん断の組み合わせによって発生するため、き裂の 発生条件としてせん断応力を考慮できる次式で示す最大公称応力基準を使用した.

$$f = \max\left\{\frac{\left\langle t_n \right\rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0}\right\}$$
(3.1)

式中のfは破壊基準であり、この値が1に達する時点でき裂が発生する.tは公称応力ベクトル、 t_n はき 裂面に垂直な成分、 t_s 及び t_t はき裂面上のせん断成分である.**図-参3.5**に応力ベクトルの図を示す.〈 t_n 〉 =max(t_n ,0)は Macaulay bracket で、圧縮方向の応力のみではき裂が発生しないことを示している.

解析では、せん断成分の強さ t_s^0 及び t_t^0 として引張強さ 906.7 MPa の $1/\sqrt{3}$ 倍の 523.5 MPa, き裂面に 垂直な方向の強さ t_n^0 は引張強さ 906.7 MPa を設定した.

き裂発生後の損傷発展則として、図-参3.6に示すような有効分離量に基づく線形軟化挙動を定義した. き裂の発生条件として引張強さをベースとした値を使用しているためき裂発生後は速やかに破壊される と想定し、き裂発生から破壊までの分離量 δ - δ ⁰は小さな値として1.0×10⁴mmを設定した.また、損傷安 定化粘着として、粘性係数を1に設定した.



図-参3.5 応力ベクトル図(最大公称応力によるき裂発生基準)



図-参3.6 損傷発展パラメータ

最大公称応力基準によるき裂発生基準では、新規に発生するき裂の方向は要素局所座標系の1方向また は2方向に直交するため、要素座標系の方向をき裂方向に合わせて指定する必要がある.ボルトの材料 S45Cは延性材料であるため、き裂が発生する領域では塑性ひずみが大きくなっていると考えられる.ま た、延性材料の強度についての最大せん断応力説に従うと、せん断変形によって材料内に滑りが発生し 塑性変形するため、トレスカ応力がき裂発生の指標となるとも考えられる.そこで、XFEMを設定しない 条件で解析を行い、相当塑性ひずみ及びトレスカ応力が高い領域が伸びる方向を確認した.

例として、Case3(基準載荷, H=500mm)に対しXFEMを設定しない条件で解析した場合の相当塑性ひず み及びトレスカ応力を図-参3.7に示す.ボルト1,2は水平面に対し45°方向に、ボルト4は20°方向、ボル ト6,7は水平方向に伸びていた.従って、ボルト1,2の要素座標系1方向は鉛直方向に対し45°方向、ボルト 4の要素座標系1方向は鉛直方向から20°方向、ボルト4,6,7の要素座標系1方向は鉛直方向とし、塑性ひず み及びトレスカ応力が高い領域に沿ってき裂が発生するようにした.表-参3.2に各ケースにおける六角ボ ルトのき裂方向を示す.



	ボルト1	ボルト2	ボルト3	ボルト4	ボルト5	ボルト6	ボルト7	ボルト8
Case1	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
Case2	30°	30°	30°	0°	0°	0°	0°	0°
Case3	45°	45°	45°	20°	20°	0°	0°	0°
Case4	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
Case7	45°	30°	0°	30°	0°	0°	0°	0°
Case8	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
Case10	45°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°

表-参3.2 各ケースのボルトのき裂方向

3.1.4 接触条件

ボルトは初期締め付け及び載荷治具の浮き上がりにより強い引張力が生じているため、ボルトとベー スプレートのネジ山は大きな摩擦力により固定されていると考えられる.そこで、ボルトとベースプレ ートの間の表面を上部の要素1層分を除き表面ベースの結合拘束とした.ベースプレート上部の要素1層 と、対応するボルトの要素1層とその上の1層の表面は、結合拘束により過剰な力が発生する事を避ける ため通常の接触を定義し、摩擦係数は0とした.図-参3.8にボルトとベースプレートの接触条件図を示す. 載荷治具とベースプレートの間に接触を定義し、摩擦係数は図-3.5に示したボルト載荷実験の結果から、 滑り摩擦力が100kNであると仮定し、ボルト締結力の規格値と合わせて以下のように決定した.

垂直抗力:48.4 kN(ボルト締結力)×8本 = 387.2 kN

摩擦係数:100 kN(摩擦力)/387.2 kN=0.258

ワッシャーと載荷治具,ボルトと隙間補正用要素,ベースプレートとH形鋼の間に接触を定義し,摩擦 係数は0とした.図-参3.9に定義した各部品間の接触条件を示す.

ベースプレートとH形鋼間の拘束を考えた場合,ベースプレートとH形鋼を固定するボルトは32本あり 載荷治具を固定するボルトより多いため,ボルト1本あたりの荷重は小さく変形は無視できると想定し, ボルト部分を剛体拘束とした.剛体拘束の対象は図-参3.10に示すように,ボルトのワッシャー及びナッ トと接触する部分が固定されると想定し,ベースプレートの上側表面とH形鋼の下側表面の節点のうち, ボルト穴周囲の要素一層の節点とした(図-参3.11, 12).

支圧板と載荷治具は強く固定されており、滑らないと想定して結合拘束により固定した(図-参3.13).



図-参3.8 ボルトとベースプレート間の接触条件



図-参3.9 各部品間の接触条件



図-参3.10 ベースプレートとH形鋼の剛体拘束について



図-参3.11 ベースプレートとH形鋼の剛体拘束(1/2モデル)



図-参3.12 ベースプレートとH形鋼の剛体拘束(全体モデル)



(a) 基準載荷, 偏心載荷の場合
(b) 斜め載荷の場合
図-参3.13 載荷治具と支圧板の拘束

3.1.5 境界条件及び荷重条件

境界条件は,H形鋼の底面の節点に対して完全拘束とした.また,1/2モデルについてはモデルの1/2対称面の節点に対し対称拘束とした(図-参3.14). 荷重条件は,以下の3ステップに分けて行った。

(1) ステップ1

ボルト断面に対し1本あたり締結力48.4 kNのボルト軸力を負荷した.ただし対称面上のボルトに対して は締結力も1/2の24.2 kNとした.また,モデル全体に対し重力加速度荷重1Gを負荷した.

(2) ステップ2

ボルト締結量を固定し、後続のステップにおいて外部からの荷重に応じてボルト軸力が変化できるようにした. 図-参3.15にボルト締結力についての荷重条件図を示す.

(3) ステップ3

支圧板表面に対し強制変位を定義した.載荷治具の浮き上がりに伴う回転を妨げないように,支圧板の表面と参照節点を分配カップリング拘束し,参照節点に対して強制変位を定義した.図-参3.16に強制変位荷重についての境界条件図を示す.

解析では、支圧板に対する強制変位を基準載荷及び偏心載荷は20mm、斜め載荷は30mmに設定した. 表-参3.3に各ステップでの荷重を示す.解析中に時間刻みが小さくなり解析が進まなくなる、又はエラー で強制終了するまで解析を行った.





図-参3.16 支圧板の強制変位荷重

解析ケース	ステップ	ボルト軸力 [kN]	支圧板強制変位 [mm]
基準載荷 偏心載荷	ステップ 1	48.4	_
	ステップ 2	ボルト締結量(変位)を	_
	ステップ 3	ステップ1の状態に固定	20.0
斜め載荷	ステップ 1	48.4	_
	ステップ 2	ボルト締結量(変位)を	_
	ステップ 3	ステップ1の状態に固定	30.0

表-参3.3 各ステップにおいて設定した荷重

3.2 解析結果

3.2.1 基準載荷

(1) 荷重-変位関係

図-参3.17は,基準載荷(Case1~Case4)における載荷治具の水平変位と載荷荷重の関係を示したものである. 横軸は水平変位,縦軸は載荷荷重である. 図中には載荷実験の結果も示した.

図より,載荷実験及び解析ともに載荷荷重100kN付近で載荷治具とベースプレート間に滑りが生じ,水 平変位が増加していることが分かる.そのため,解析で設定した摩擦係数で載荷実験と整合が取れてい る.実験では水平変位1mm付近から荷重が徐々に増加している.これは,ボルトの山と谷の隙間が各ボル トでばらついていることから,荷重の立ち上がりにばらつきが生じた可能性がある.一方,解析ではネジ 山を簡略化したことから,全ての六角ボルトの隙間補正用要素の隙間量を一定にしたため,六角ボルト と隙間補正用要素の隙間量1.624mm付近から荷重が増加していることが分かる.最大荷重付近の増加割合 は解析と実験で同程度であることから,六角ボルトの塑性化やき裂,破断に関しては再現できていると 考えられる.

解析及び載荷実験により得られた最大荷重の結果を表-参3.4に示す.表より,最大荷重における解析結 果と載荷実験との誤差は10%以下である.従って,本解析は実験結果をほぼ再現できていると考えられる. なお,最大荷重時の水平変位が解析と実験で異なっているのは,ネジ山の簡略化や,ベースプレートとH 形鋼を剛結としたことが影響していると考えられる.



表-参3.4 解析値と実験値との比較(基準載荷)

8255年17	最大荷重(kN)			
所有リース	解析值	実験値	解析値と実験値との誤差(%)	
Case1(H=0)	1560.46	1498.98	4.1	
Case2(H=300mm)	1532.22	1441.16	6.3	
Case3(H=500mm)	1345.05	1295.53	3.8	
Case4(H=750mm)	939.91	910.89	3.2	

(2) 六角ボルトに作用する力

載荷時において六角ボルトに作用する力を検討する.六角ボルトに作用する力は,図-参3.18に示すように,載荷治具とワッシャー間,六角ボルトと隙間補正用要素間の接触力の和をとり,鉛直成分を引張荷重,載荷方向成分をせん断荷重とした.

図-参3.19から図-参3.22は、基準載荷(Case1~Case4)における載荷治具の水平変位と載荷荷重の関係を示したものである. 横軸は水平変位、縦軸は載荷荷重である. 図中には載荷実験におけるボルト番号も示した. なお、すべての図において、初期状態において引張力が作用しているのは、初めに六角ボルトに軸力を加えている影響である. Case1のように載荷高が0の場合、図-参3.19に示すように、すべての六角ボルトに対してボルト水平変位が1.5mm付近からせん断力が増加している.一方、引張力は徐々に低下している.一方、Caes2~4のように載荷高があると、図-参3.20~図-参3.22に示すように、載荷側の六角ボルトに対してボルト水平変位が1.5mm付近から引張力が増加している.

図-参3.17に示した最大荷重時における六角ボルトに作用する引張力とせん断力の割合を図-参3.23に 示す. 横軸は六角ボルトの番号,縦軸は六角ボルトに作用するせん断力と引張力である.また,図中に示 した数値は,引張力及びせん断力の値を示している.

載荷高が0の場合,図-参3.23(a)に示すように,全ての六角ボルトにおいてせん断力の作用する割合が 90%を超える.したがって,載荷高が0の場合は全てのボルトにおいてせん断力が支配的になる.載荷高 が300mmの場合,図-参3.23(b)に示すように,載荷側の六角ボルト(ボルト1)の引張力が60%程度になる. 一方,載荷位置から離れた六角ボルト4,6,7における引張力の割合は20%以下である.載荷高が500mの場 合,図-参3.23(c)に示すように,載荷位置に近い六角ボルト1,2では引張力が大きく,その割合は80%を 超える.また,ボルト4においても引張力の割合は65%程度になっている.一方,載荷位置から最も離れ た位置のボルト6と7では,せん断力の割合は90%を超えている.載荷高が750mmになると図-参3.23(d)に 示すように,ボルト1,2,4における引張力の割合は80%を超えている.



図-参3.18 ボルトに対する引張力とせん断力の算出方法










図-参3.23 六角ボルトに作用する引張力とせん断力の割合(基準載荷)

3.2.2 偏心載荷

(1) 荷重-変位関係

図-参3.24は偏心載荷(Case7, 8)における載荷治具の水平変位と載荷荷重の関係,表-参3.5は解析結果と 実験結果を比較した結果を示したものである.図中の横軸は水平変位,縦軸は載荷荷重である.図中には 載荷実験の結果も示した. Case8の最大荷重が12%程度の誤差を有しているが,概ね実験結果を再現でき ている.



図-参3.24 荷重-変位曲線(偏心載荷)

衣-多3.3 胜创他と关驶他との比较(偏心取何)					
解析ケース	最大荷重(kN)				
	解析值	実験値	解析値と実験値との誤差(%)		
Case7(<i>H</i> =0)	727.63	687.60	5.8		
Case8(H=500mm)	904.00	801.30	12.8		

表-参3.5 解析値と実験値との比較(偏心載荷)

図-参3.25は最大荷重時における六角ボルトに作用する引張力とせん断力の割合を示したものである. 横軸は六角ボルトの番号,縦軸は六角ボルトに作用するせん断力と引張力である.

載荷高が0の場合(図-参3.25(a)),ボルト5を除きせん断力が作用している割合が大きく,載荷位置に最 も近いボルト1においては,せん断力の割合はほぼ100%である.一方,ボルト5については,せん断力は ほとんど作用していない.そのため,写真-3.4に示したように,偏心載荷時においてボルト5が破断しな かったと考えられる.載荷高が300mmの場合(図-参3.25(b)),ボルト6及びボルト7を除き引張力が作用し ている割合が大きく,ボルト5及びボルト8においては引張力の割合はほぼ100%であり,せん断力はほぼ 作用していない.





図-参3.25 六角ボルトに作用する引張力とせん断力の割合(偏心載荷)

3.2.3 斜め載荷

斜め載荷(Case10)における荷重-変位関係を図-参3.26に,表-参3.6に解析結果と実験結果を比較した結 果を示す.横軸は水平変位,縦軸は載荷荷重である.図より,変位1mm以下については実験結果を再現で きているが,変位が1mm以上になると,実験結果と挙動が大きく異なる結果となった.また,解析で得ら れた最大荷重は773 kNとなり,実験における最大荷重に比べて9.25%小さくなった.



図-参3.26 荷重-変位曲線(斜め載荷)

解析ケース	最大荷重(kN)		
	解析値	実験値	解析値と実験値との誤差(%)
Case10(H=500mm)	772.55	851.31	9.25

表-参3.6 解析値と実験値との比較(斜め載荷)

土木研究所資料 TECHNICAL NOTE of PWRI No.4422 February 2022

編集·発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754