

高力ボルト摩擦接合技術の今後の展開

Future Technical Issues on High Strength Bolted Friction Grip Joints

大阪市立大学 大学院工学研究科
Dept. of Civil Engineering
Osaka City University

教授
山口 隆司
Takashi YAMAGUCHI



1. はじめに

平成29年11月になされた道路橋示方書¹⁾の改訂では、これまでの許容応力度設計から、設計で想定する限界状態に対して安全であるかを照査する限界状態設計へと設計手法に大きな変更がなされた。これにより、道路橋設計においても、限界状態を定義し、作用と抵抗に対する部分係数を用いて、適切な安全余裕度を確保するという一般的な限界状態設計法に移行したといえよう。このような設計手法の大幅な変更を受けて、高力ボルト接合の設計においても限界状態を想定し、それに対して安全であることを照査することになった。これは、例えば、これまでの高力ボルト摩擦接合におけるすべりと被接合材である母材の降伏を照査する以外に、高力ボルトの降伏や破断、さらには母材の支圧や破断を照査することを要求するものであり、接合部が終局状態に至るまでの力学的挙動の把握が重要となる。しかしながら、道路橋では、従来、被接合部が終局状態に至るまでに接合部が終局状態に至ることを避けることから、接合部は被接合部よりも保守的な限界状態が設定されており、接合部の終局状態に関する知見の蓄積は十分とは言えないのが現状である。

一方、既設鋼構造物の経年に伴う腐食や疲労亀裂に対する補修・補強も重要な課題である。腐食や疲労亀裂に対する一般的な補修・補強法として、高力ボルト摩擦接合や高力ボルト支圧接合を用いたあて板工法があげられるが確立された設計法はなく、新設構造物を対象とした道路橋示方書を準用し、設計されるのが一般的である。しかしながら、既設構造物特有の現場条件・制約条件などが存在し、新設構造物とは異なる場合も多く、これらに対応した設計法や施工法の確立が求められている。また、今回の道路橋示方書の改訂を受けて、終局状態を考慮した設計を行うためにはあて板構造の終局状態に関する知見が不足しており、その蓄積が必要である。

このように、これまで接合部が保守的に設計されてきたこと、道路橋示方書の改訂を受けて接合部本来の終局状態も考慮して設計する必要があることなどから、技術開発や研究の余地が多く残されており(正確には、広がっ

たかもしれない)、高力ボルトなどの締結材そのものの開発、設計技術、施工技術、品質管理技術、そして、健全度診断技術や長寿命化技術など、その範囲は多岐にわたっている。これらの技術が開発され、確立されれば、鋼部材接合部の小型化、高耐久化が可能となり、より多様な要求性能に対し柔軟に対応でき、鋼橋の工期短縮、品質向上、耐久性の向上に貢献できよう。

本稿では、上述の背景を踏まえ、鋼橋における高力ボルト摩擦接合技術の今後の展開について著者の私見を述べてみたい。

2. 高力ボルト摩擦接合継手の限界状態

2.1 すべり後挙動の解明と適切な限界状態の設定

高力ボルト摩擦接合継手のすべり後挙動については、文献2)、3)などにも記述があるようにこれまでに全く知見がないということではない。しかしながら、基本的には設計基準における継手部でのすべりを許容しないという設計コンセプトのもと、すべり耐力の向上やその安定を目的とした、すべり係数の向上や接合面の品質管理、施工管理といったすべり耐力に関する研究が数多くなされ⁴⁾、設計の対象ではないすべり後挙動についてはここ30年間ほど、ほとんど研究されていない。

高力ボルト摩擦接合継手では、図1に示すように、荷重の増加に伴い、すべりが発生した後、支圧状態に移行し、再び荷重が増加する。その後は、継手の断面形状にもよるが、ボルト孔周辺の支圧破壊、もしくは、母板/連結板の純断面破断、ボルトのせん断破断となり、終局状態となる。

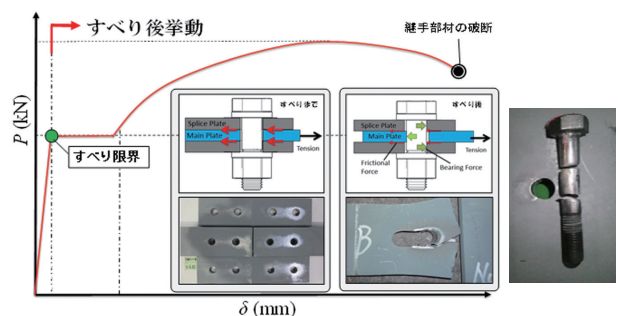


図1 高力ボルト摩擦接合継手の荷重-変位関係

なお、図1のような荷重-変位関係となるためには、高力ボルトのせん断破断が先行しないことが前提であり、鋼板が高強度かつ板厚が大きい場合、高力ボルトのせん断破断が先行する可能性が高く、注意を要する。このような終局状態に至るプロセスは現状、把握できているものの、過去の研究成果に基づいており、現在のような厚板構造を対象としたものではない。さらに、試験機の載荷能力や計算機の解析能力から多くは1行継手に関するものである。

改訂された道路橋示方書では、接合部のすべりと母板（被接合部）の降伏を限界状態とする限界状態1とボルトの破断と母板（被接合部）の破断を限界状態とする限界状態3の2つが設定された。高力ボルト摩擦接合における限界状態の分類を表1に示す。

表1 高力ボルト摩擦接合継手の限界状態

分類	内容
限界状態1	・接合部のすべり ・母板、連結板の降伏
限界状態3	・母板の純断面引張破断 ・母板の縁端部の端抜け破断 ・ボルトのせん断破断

高力ボルト摩擦接合継手の限界状態3では、高力ボルト摩擦接合の荷重伝達メカニズムから高力ボルト支圧接合のそれに移行すると考え、照査項目が設定されている。しかしながら、それぞれのボルト位置において、あらかじめボルト孔壁とボルトとの間にクリアランスのある摩擦接合が支圧接合と同じ限界状態に移行するかについては、十分なデータの蓄積がない。今後は、複数行多列配置といった現在の鋼橋における継手断面構成（群配置なども含む）を反映した実験的・解析的検討を重ね、摩擦接合における限界状態3が支圧接合におけるそれと同じと見なすことができるのか、また、その場合の構造諸元の制約について研究を行う必要がある。

さらに、終局状態と想定されるボルトの破断、母板、連結板の破断について成果の一定の蓄積はあるものの、その途中である支圧状態の限界状態に関する情報は、我が国においては著者らが調べた限り全くない。一方、Eurocode⁵⁾やAASHTO⁶⁾などの海外基準においても終局限界状態における支圧耐力は規定されているものの、その状態がどのような支圧状態にあるか（ボルト孔周辺の降伏域の進展度合いなど）についての解説はない。各種設計基準における摩擦接合継手の限界状態の比較を表2に示す。

接合部が被接合部よりも先に終局状態に至ることはないという従来の接合部設計のコンセプトを踏まえると、今後も、母板（被接合部）やボルトの破断ではなく、接合部の破断を担保した、支圧限界を設定し、それを終局限界とすることが望ましいと私は考えている。そのためには支圧限界状態の定義が重要かつ必須であり、著者ら

表2 各種設計基準における摩擦接合継手の限界状態

高力ボルト継手の分類	使用限界状態	終局限界状態	備考
	道示		
鋼構造接合部設計指針	すべり許容せず	すべり耐力	※ボルトせん断耐力 > 支圧耐力の場合
	保有耐力設計	すべり耐力 支圧耐力	
AASHTO	すべり抵抗型	すべり耐力 支圧耐力*	
	支圧抵抗型	すべり耐力 支圧耐力*	
Eurocode	Category A	支圧耐力*	
	Category B	すべり耐力 支圧耐力*	
	Category C	すべり耐力 すべり耐力	

は、設計上の簡便さの点から応力やひずみではなく、ボルト孔の変形量（多くは塑性変形量）に着目した実験および解析を行い、データの蓄積を行っている⁷⁾⁸⁾。その結果、海外基準との整合性、強度と変形のバランスから、ボルト孔の変形量が10%に到達した時を支圧限界状態とすることが望ましいと考えている。支圧開始時と支圧によるボルト孔変形量が軸平行部径に対して10%に到達した時のボルト孔の様子を図2に示す。

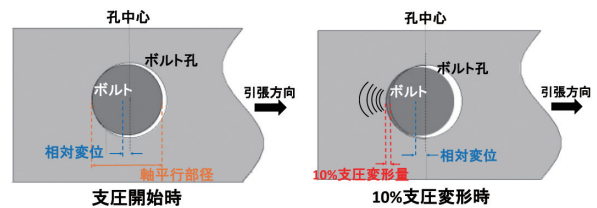


図2 ボルト孔の変形量

なお、この場合、縁端距離にもよるが、おおむね、降伏点の2から2.5倍の強度を確保できる。

高力ボルト支圧接合では、リベット接合の荷重伝達メカニズムとの類似性から、その構造詳細（ボルト配置、フィラーに関する規定など）に関し、リベット接合のそれを準用している。しかしながら、薄板を集成することから始まったリベットの規定には、間接継手やボルト本数の割増規定といった現在の厚板に関してそのまま適用すべきではないと考えられるものも含まれている。フィラーを有する支圧接合継手における間接連結と、その技術基準における規定の変遷を図3、表3にそれぞれ示す。図3は、著者らが行っている摩擦接合継手の供試体での例であるが、すべり後に荷重伝達メカニズムが摩擦接合から支圧接合に移行する場合の間接継手の力学的挙動を検討することを目的としており、間接連結に着目している。

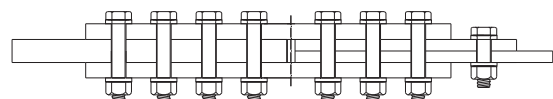


図3 フィラーを有する支圧接合継手における間接継手

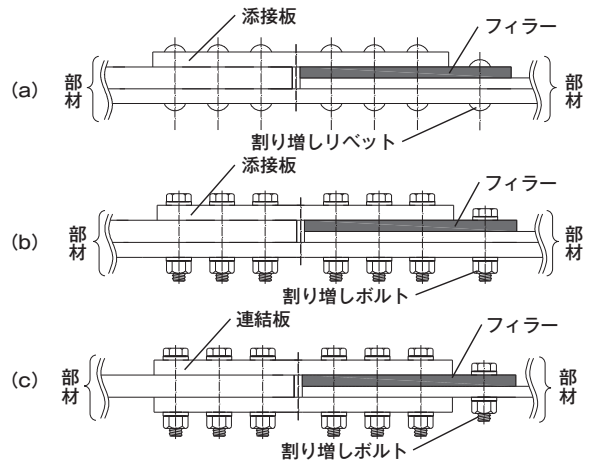
2.2 曲げを受ける桁継手の適切な限界状態の設定

道路橋示方書における曲げを受ける桁の高力ボルト摩擦接合継手では、フランジと腹板の継手を個別に設計する手法がとられてきた。すなわち、作用曲げモーメントから決定される曲げ応力分布をもとに、フランジが分担する部分に対してはフランジのすべりと降伏を照査し、腹板が分担する部分に対しては腹板最外縁のすべりと降伏を照査する。しかしながら、西村らの成果⁹⁾が示しているように、桁の曲げ挙動ではフランジと腹板が協働

表3 技術基準におけるフィラーを有する
支圧接合継手の規定の変遷（道路橋示方書）

発行年	接合方式	リベット/ボルト本数の割増に関する フィラー厚条件とその割増率		間接連結と する場合の 最低フィラー厚	備考
		フィラー厚	割増本数		
1940	リベット	2mm以上	1割	8mm	(a)
		4mm以上	2割		
		6mm以上	3割		
		8mm以上	4割		
		10mm以上	5割		
1964	リベット	6mm以上	3割以上	8mm	(b)
1973	リベット(高力ボルト*)	6mm以上	3割以上	9mm	
1990	高力ボルト	6mm以上	3割	9mm	
1996	高力ボルト	6mm以上	3割	9mm	(c)

(*) 高力ボルトの規定はあるが、フィラーを有する高力ボルト支圧接合の規定・解説はない。



してすべりに抵抗することが知られており、文献4)ではそれを考慮した、総すべりモーメント法と呼ばれる設計手法が提示されている。一方、主桁の設計では、合成桁などにおいてコンパクト断面を採用する場合も想定され、終局状態では全塑性モーメントに到達する。そのため、継手部をどこに設けるかにもよるが、全塑性モーメントに抵抗できる継手の実現とその設計法の確立が求められている。そこで、著者らは、上述の支圧限界を採用し、その支圧限界において全塑性モーメントに抵抗できる継手を実現できると考え、載荷実験を行った。その結果、ボルト配置を適切にすれば、それが実現可能であることを示すとともに総すべりモーメントに対する検討を行い、腹板両縁のボルトを減らし、フランジに多くのボ

ルトを配置することで総すべり状態を効果的に発揮できることを示した。今後は、断面構成を変化させた上で、適用範囲を明らかにし、ボルト間隔やボルト配置に関する構造詳細の一般化のための研究を継続する。

3. あて板工法の確立

3.1 荷重伝達メカニズムの定量化と終局状態の解明

腐食や疲労亀裂の補修や補強では、高力ボルト摩擦接合や高力ボルト支圧接合を用いたあて板が行われることが多い。これらは、基本的には、高力ボルト摩擦接合継手や支圧接合継手の力学的挙動をもとに、あて板の設計がなされる。しかしながら、あて板の場合、継手のそれと異なり、母板（被接合部）の断面力がすべてあて板に移行することはなく、母板も分担する。実務設計では安全側に設計するという観点から、作用断面力のすべてをあて板で分担し、かつ、あて板がそれを分担できるように十分な高力ボルトを配置する。実際には、あて板と母板の断面積比に基づく荷重分担を基本に、あて板と母板の接合度により若干異なる荷重分担比となる¹⁰⁾。また、継手では明確なすべりが発生し、その後、支圧状態に移行し、終局状態を迎えるが、あて板では、腐食部の降伏や母板（被接合部）の純断面部の降伏が先行し、終局状態に至る場合が多い。あて板と継手の荷重伝達メカニズムの違いの模式図を図4に、想定される限界状態を表4にそれぞれ示す。

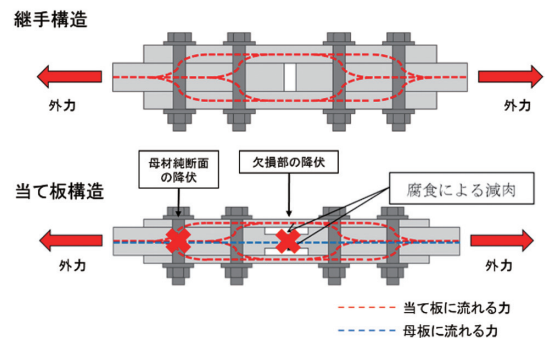


図4 あて板と継手の荷重伝達メカニズムの比較

表4 あて板における想定限界状態

限界状態	内容	照査項目
①健全部の純断面降伏	あて板するために健全部において孔明けされることから、健全部の純断面において降伏する可能性がある。	純断面降伏強度
②母材腐食部の降伏	作用力は母材とあて板で分担されるため、母材の腐食部で降伏する可能性がある。	母材腐食部降伏強度 (断面積比) (荷重分担率)
③高力ボルト接合部のすべり限界/支圧限界	母材の変形・降伏によって主すべりもしくは部分すべり/支圧降伏が発生する可能性がある。	すべり強度/支圧強度 (すべり係数) (ボルト軸力)
④高力ボルトせん断降伏	締結材である高力ボルトがせん断降伏する可能性がある。	高力ボルトのせん断強度

今後は、終局状態に至る過程を明らかにした上で、摩擦接合あて板の限界状態1および限界状態3を適切に設定し、その簡易な設計法を確立する必要がある。その際、摩擦接合ボルト1本あたりの伝達力および母板とあて板

の荷重分担率の定量化が鍵となる。

一方、疲労亀裂に対する補修・補強では、亀裂が断面をすべて貫通している場合は継手として、そうでない場合はあて板として、腐食に対する場合と同様に設計するが、亀裂進展の方向も考慮したボルト配置を検討しなければならない。

閉断面部材のあて板では、片面から施工できる片面施工ボルトを用いたあて板補修が広く行われている。一般的な片面施工ボルトであるワンサイドボルトを**図5**に示す。また、片面施工ボルトの一つとして、コンクリートと鋼の合成構造に用いられるずれ止めの頭付きスタッドから着想し、ねじを切ったスタッド（以下、ねじ付きスタッド）を鋼板に溶植し、ナットを用いて軸力を導入する構造が提案されている。これは、片面からの施工制約がある場合の当て板の取付けを想定したものであり、孔明けが不要な点に特色がある。ねじ付きスタッドの例を**図6**に示す。F6T級の高力ボルトと同等の強度を有し、静的強度、繰返し強度特性、すべり強度特性などが検討されている^{11) 12)}。スタッド溶植部からの疲労亀裂の発生が懸念されるが、軸力を導入することで、あて板にも荷重分担され、ねじ付きスタッド近傍への作用応力が低下し、疲労亀裂は発生しにくくなっている。



図5 ワンサイドボルト



図6 ねじ付きスタッドの例

3.2 設計法

あて板と母板の荷重分担とボルト配置の関係も重要であるが、補修・補強時に既に存在している応力の考慮も重要である。多くの場合、無応力状態にてあて板を設置するのではなく、死荷重作用下であて板を設置する。実際、ボルト孔を開けることで、そこには応力集中により高い応力が存在することになり、場合によっては降伏に至っている場合も想定される。そのような状態における母板へのボルト軸力導入の影響、あて板設置効果の検証、さらには終局状態の確認と終局耐力について検討する必要がある。著者らは、現在、これらの点に着目した実験および解析的検討を始めたところである。

3.3 施工法と性能検証および品質管理

あて板工法におけるもう一つの重要な課題は、施工時の接合面処理とその管理方法である。一般には腐食等で

生じている接合面の不陸調整を行った後、高力ボルト摩擦接合を行っているが、その不陸調整には、金属パテやエポキシ樹脂など様々な手法がある。エポキシ樹脂を用いる場合、エポキシ樹脂の硬化後、ボルト締めするのが一般的ではあるが、現場施工では、様々な制約からやむを得ず、エポキシ樹脂硬化前にボルト締めする場合がある。設計では、このようなボルトは無効ボルトとして扱い、すべり耐力には寄与しないとしているが、仮にすべり耐力にも寄与することがわかれば、必要ボルト本数の減少をもたらす、継手部（補修部）をコンパクトにすることができる¹³⁾¹⁴⁾。また、エポキシ樹脂を接着剤と考え、接着接合と摩擦接合の併用接合としても考えることができる。道路橋示方書では、異なる荷重伝達メカニズムを有する併用接合は認められていないが、併用接合としての荷重伝達メカニズムを明らかにすることができれば、その実現も夢ではない。大きな断面力を受ける箇所にあて板を設置する場合、高力ボルト摩擦接合ではボルト本数が多くなり、現実的なボルト配置とならず、施工性に問題のある高力ボルト支圧接合が採用されるが、接着剤と摩擦接合の併用接合が採用できれば、施工性は向上し、工期の短縮に貢献できる。接合面における接着剤では紫外線の影響は少ないことから、水の浸入を防ぐことができれば耐久性にも問題はなく、十分、適用が期待される。

なお、設計で想定するすべり強度を確保するためには、現場での接合面処理における品質管理が非常に重要であり、それを簡易に行う方法の開発もまた重要である。

4. 高力ボルトセットの耐久性向上

高力ボルト接合部はボルトヘッド、ナットの角部における塗膜厚の確保が難しく、腐食が発生しやすい部位である。このような問題を解決する方法の一つとして、継手部を平滑にするという発想のもと、打ち込み式支圧ボルトにヒントを得た、皿型高力ボルトを用いた摩擦接合継手が検討された。この皿型高力ボルトは、高力ボルト摩擦接合用に開発されたものであり、皿頭の開き角は打ち込み式高力ボルトのそれよりも大きく、ボルト軸力のリラクゼーション特性、皿型部での応力集中度から決定されている。**図7 (a)**に皿型高力ボルトの例を示す。このボルトを採用することで継手表面が平滑となり、塗膜の膜厚も適切に確保され、トルシア形ボルトや高力六角ボルトに比べて耐腐食性が向上する。**図7 (b) (c)**に3年間の暴露試験の結果の比較を示す。皿型高力ボルトの塗膜の劣化が少ないことが確認できる。なお、連結板を皿型加工することから、引張力作用下でボルト軸力の低下が通常の高力ボルトに比べて大きく、すべり耐力も10%ほど低下する¹⁵⁾。このような特性を踏まえ、すべり係数を適切に設定することで耐久性の高い連結部の実現が可能である。現在、実際の製作誤差等を考慮した皿

型ボルトの製作許容値の設定や、連結板側の皿型加工部に対して皿型ボルトの開き角度をやや大きくすることですべり係数が改善されることを反映した技術基準が検討されている。



(a) 外観 (b) 皿型高力ボルト (c) 高力六角ボルト
図7 摩擦接合用皿型高力ボルトと暴露試験結果(3年間)

5. おわりに

今回の道路橋示方書の改定により、接合部では対象とする限界状態も増え、未解明な技術課題も多く残っている。また、高力ボルトなどの締結材そのものの開発や設計技術、品質管理技術、健全度診断技術や長寿命化技術など、高力ボルト接合技術のカバーすべき範囲は広がっている。今後、これらの技術が開発され、確立されれば、高力ボルト接合部の小型化、高耐久化が可能となるだけでなく、一層の工期短縮にも貢献できる。

本稿が契機となり開発された新技術が既設橋梁の修繕、更新に採用され、継手のコンパクト化や品質/耐久性の向上、工期短縮などに貢献することを願ってやまない。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017.
- 2) GL Kulak, JW. Fisher: Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, Second edition, 1987.
- 3) 日本鋼構造協会接合小委員会：鋼構造接合資料集成 - リベット接合・高力ボルト接合 -, 技報堂, 1977.
- 4) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)，2006.
- 5) European Committee for Standardization (CEN) : Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-8: Design of Joints, EN1993-1-8, 2005.
- 6) AASHTO: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Fifth Edition, 2010.
- 7) 戸田圭彦, 山口隆司, 岑山友紀, 直江康司：高力ボルト摩擦接合継手の孔変形に基づいた支圧耐力に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No. 3, pp. 333-345, 2014.
- 8) 森山仁志, 田畑晶子, 山口隆司, 藤林美早: ボルトピッチおよび列数が高力ボルト摩擦接合継手の支圧限界耐力に与える影響の基礎的検討, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 1, pp. 119-132, 2016.
- 9) 西村宣男, 秋山寿行, 亀井義典, 高木優任：鋼I桁の高力ボルト摩擦接合曲げ継手の限界状態に関する実験, 鋼構造年次論文報告集, 第1巻, pp. 23-30, 1993.
- 10) 永田和寿, 町田幸大, 小川麻実, 山口隆司：引張を受ける高力ボルト鋼板当て板接合部の荷重伝達機構に関する解析的検討, 鋼構造論文集 Vol.23, No.90, pp.27-37, 2016.6.
- 11) 吉見正頼, 田畑晶子, 山口隆司, 馬場敏, 小野秀一：上向きに溶接したスタッドボルト摩擦接合のすべり試験, 土木学会第69回年次学術講演会, pp.887-888, 2014.9.
- 12) 田畑晶子, 儀賀大己, 小野秀一, 山口隆司：ねじ付きスタッドによりあて板した鋼板の繰り返し引張挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.1, pp.114-125, 2017.
- 13) 丹波寛夫, 行藤晋也, 山口隆司, 杉浦邦征, 飛ヶ谷明人, 田畑晶子：腐食孔を模擬した凹部を有する接合面に接着剤を塗布した高力ボルト継手の力学的挙動に関する実験的検討, 構造工学論文集 Vol.60A, pp.703-714, 2014.
- 14) 丹波寛夫, 行藤晋也, 山口隆司, 杉浦邦征：接着剤と高力ボルトを併用した軸方向力を受ける当て板補修部に関する実験的検討, 構造工学論文集 Vol.61A, pp.585-596, 2015.
- 15) 田畑晶子, 黒野佳秀, 金治英貞, 山口隆司：拡大孔を有する皿型高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関する研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.632-641, 2014.