

◆ コンクリート構造物特集 ◆

各種鉄筋継手の力学特性

森濱和正* 河野広隆** 加藤俊二***

1. まえがき

過去の巨大地震において、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋継手部の破断現象が見られた。鉄筋の継手の挙動については、基本的な強度特性や一部の疲労特性については検討がなされてきている。しかし、地震に想定される非常に大きな載荷速度や、高ひずみの正負繰り返しを受けたとき、あるいは低温下の高速度載荷等については、これまで十分に検討されてきたとは言い難い。

このため、各種鉄筋継手に対し、地震時の挙動を把握し、設計に反映させるため、各種の載荷試験を行ってきている。

本報告では、最初に鉄筋継手の90%以上を占めるガス圧接継手について、載荷速度、試験温度およびさまざまな高ひずみ繰り返しが強度などに及ぼす影響について検討した。次に使用実績や継手構造型式などを考慮し、代表的な機械式継手および溶接継手について、ガス圧接継手で試験した様々な試験条件のうち比較的厳しい載荷条件での低温・高速および繰り返し載荷実験を行い、それらの挙動を把握した。

2. 鉄筋継手の種類

実験対象とした継手は、表-1の11種類とした。

表-1 実験対象とした継手

突合せ継手の種類				鉄筋	記号	継手長 (mm)	
溶接継手	固相接合	ガス圧接	標準	D25	A-1	30	
			押抜	D25	A-2	30	
	溶融接合	エンクローズ溶接			B	25	
		フラッシュ溶接			C	20	
機械式継手	スリーブ方式	モルタル	短スリーブ	D25	D-1	320	
		充填	長スリーブ		D-2	370	
		圧着(油圧)			E	250	
	端部ねじ接合	摩擦圧接		D25	F	157	
		スリーブ圧着(鍛造)			G	244	
	ねじ節鉄筋	ロックナット		D25	H	200	
		充填(樹脂)			I	140	

注) 鉄筋の種類は、表-2を参照

Mechanical Properties of Re-bar Joints of Several Types

突合せ継手は鉄筋同士を直接接合して応力を伝達するものであり、溶接継手と機械式継手が用いられている。溶接継手には、固相接合と溶融接合がある。以下、溶融接合による継手を単に溶接継手と呼ぶ。固相接合とは、接合端面を溶融温度直下まで加熱し、圧縮力を加えて原子を拡散させて接合する方法である。突合せ継手の中でガス圧接継手が最も多用されている。一般的な圧接をここでは標準圧接と呼ぶ。このほかに標準圧接の後、ふくらみを押し抜く熱間押抜法がある(図-1)。これをここでは押抜圧接と呼ぶ。押抜圧接は、図-1のように圧接面に欠陥がある場合、表面にキズとして現れることから、継手の全数を目視によって検査できるのではないかと期待されている方法である。標準圧接のふくらみ径は通常鉄筋径の1.6倍程度、押抜は1.2倍である。

溶接継手は溶融接合に属するものであり、エンクローズ溶接とフラッシュ溶接を対象とした。エンクローズ溶接は、継手部を銅當て金で囲んでアーク溶接するものである。フラッシュ溶接は、電気抵抗溶接の一種であり、鉄筋端面同士を接触させ、高電流を印加することによるアーク熱で加熱溶融後、加圧し、接合する方法である。表中の溶接継手の継手長は、ここでは便宜的に熱影響部を含む概略値とした。

機械式継手はスリーブ(鋼管)方式とねじ方式に大別できる。

スリーブ方式は、鉄筋の応力をスリーブに伝達する継手である。伝達方法に圧着と充填方法がある。圧着は、スリーブを変形させ鉄筋に密着させて直接応力を伝達する方法であり、ここでは油圧式を採用した。充填式は、鉄筋とスリーブのすき間にモルタルを充填することによってモルタルを介して応力を伝達するものである。

ねじ方式には、ねじ節鉄筋を使用する方法と、鉄筋の端部にねじを接合する方法がある。ねじ節鉄筋を使用する方法は、カップラーと呼ばれる長いナットで鉄筋同士をつなぐものであり、鉄筋とカップラーを緊結するためにナットで締め付ける

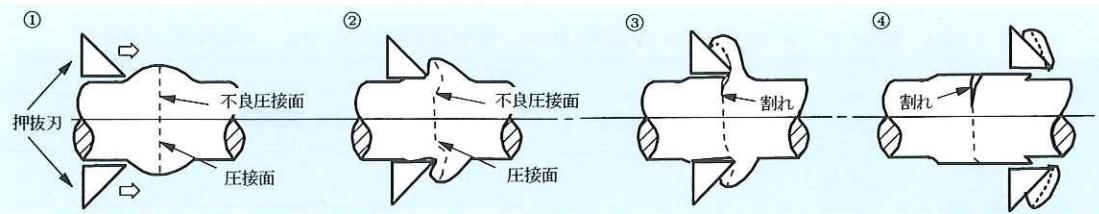


図-1 热間押抜法

ロックナットと、両者のすき間に樹脂を充填する方法がある。

端部ねじ接合は、鉄筋の端部にねじ(ボルトまたはナット)を接合したもの同士をナットまたはボルトで結合して応力を伝達するという2段階の継手である。ねじの接合方法に、固相接合である摩擦圧接と、スリーブ圧着がある。摩擦圧接は、ボルトを鉄筋に押し付けて回転させることによって摩擦熱を発生させ接合する方法であり、自動車のシャフトの接合などにも利用されている高級な継手である。スリーブ圧着は、ナット付きのスリーブを鍛造によって鉄筋に密着させた。

いずれの継手も土木学会「鉄筋継手指針」と建築センター評定のA級認定および相当の継手であり、製作にあたっては各施工基準等(以下、単に規定)に則って施工した。

3. 実験概要

3.1 使用した鉄筋の種類

継手の作製に使用した鉄筋の種類および機械的性質は表-2のとおりである。すべてSD345で、呼び名D19~D51までの5種類、節の形状は横節としたが、D25にはねじ節鉄筋継手用にねじ節鉄筋も加えた。製法では電炉品を主に用いたが、D51には斜め節の高炉品も加えた。

3.2 試験項目および試験方法

試験項目と継手の種類、使用した鉄筋の種類の関係を表-3に示す。試験片本数は各載荷条件でばらつきを考慮し、2~50本とした。

(1) ガス圧接継手

ガス圧接継手の高速載荷試験では、JIS Z 2241「金属材料の引張試験方法」に準じたひずみ速度0.01%/sの基準速度と、その10倍ずつ増加させた5段階の速度で載荷した。ただし、5段階目は、試験機の能力から30%/s程度であった。

ガス圧接継手の低温・高速試験は、温度を常温、0、-20、-40°Cの4水準設定し、載荷速度を基

表-2 機械的性質

呼び名	節の形状	製法	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	試験片	伸び %	絞り %
D19	横節	電炉	364.5	568.2	2号	23.5	53.5
D25①			375.5	590.9	2号	24.3	49.7
D25②			380.1	589.7	2号	22.9	50.9
D25③			377.9	535.8	2号	25.2	55.0
D25④	ねじ節	高炉	407.1	599.5	2号	21.1	41.5
D32	377.0		588.6	3号	29.5	53.2	
D38	横節		401.8	593.2	3号	23.3	48.9
D51	392.4		581.1	3号	24.8	48.3	
D51	斜め節	高炉	394.9	566.2	3号	22.3	47.3
SD345 の規格値			345~ 440	490 以上	2号 3号	18以上 16以上	-

表-3 試験項目、載荷条件および鉄筋の種類

試験項目	継手の種類	突き合わせ							機械式	
		ガス圧接					溶接			
	鉄筋の呼び名(径) 載荷条件	D19	D25 ①	D25 ②	D32	D38	D51 電炉	D51 高炉	D25 ③④	D25 ③④
高速載荷試験	基準速度 ^{①)} の10倍ずつ5段階	○ ^{②)}	○		○				基準速度	基準速度
低温・高速 載荷試験	温度: 常温、0、-20、-40°C 速度: 基準、高速(10%/s)			○		○	○ ^{③)}	○ ^{③)}	常温、低温 の高速 ^{③)}	常温、低温 の高速 ^{③)}
繰返し載荷試験	繰返しパターン表-4		○ ^{④)}	○ ^{④)}					タイプII-4	タイプII-4

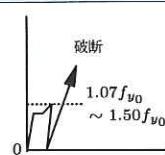
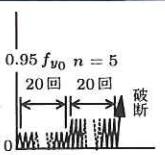
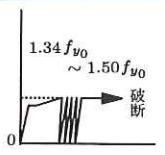
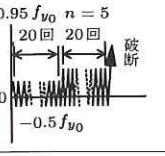
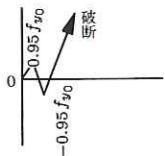
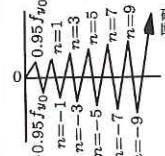
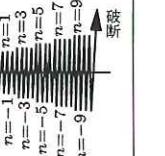
*1) 基準速度は、降伏前0.01%/s、降伏後0.1%/s

*2) D19は標準圧接のみ

*3) D51の押抜圧接および機械式、溶接継手の低温・高速試験の温度は常温および-40°Cの2水準

*4) D25①はタイプI-1、I-5、D25②はタイプI-3とII-3、4、III-1、2、4(表-4参照)

表-4 繰返し載荷パターン (表中のグラフの縦軸は応力、横軸は時間を示す。 f_{y0} 、 n は式(1)に対応)

記号 番号	1回繰返し 1	繰返し回数				
		漸増1回繰返し 2	弾性・塑性 20回繰返し 3	漸増4回繰返し 4	塑性疲労 5	
載荷方法	一方向繰返し I					
	圧縮一定繰返し II					
	正負交番繰返し III					

準速度と高速(10%/s程度を目標)の2水準の引張試験を行った。

繰返し載荷試験は、表-4のように載荷方向は一方向繰返しと正負繰返しの2種類、後者はさらに圧縮応力を降伏応力の50%($0.5f_{y0}$)一定とした場合と正負同じ応力で、式(1)に従って応力を増加していった場合の2種類であり、これらは応力振幅が異なる。繰返し回数は表の横列のように5種類とした。これらの載荷パターンは、表-4の行と列の記号-番号を用い、タイプI-1というように表記する。引張応力は、タイプI-1およびI-5は $1.07 \sim 1.50f_{y0}$ 、 $1.34 \sim 1.50f_{y0}$ の間を4段階変化させた。そのほかのタイプは、弾性域内である $0.95f_{y0}$ で繰返したあと、塑性域では式(1)の応力で所定の回数繰返した。式(1)による漸増繰返し応力 σ_n の n は、降伏以後の応力段階を表し、降伏強度を f_{y0} 、引張強さを f_{B0} としたとき、 $(f_{B0} - f_{y0})$ を10分割し、下から何番目かを表している。 n 番目の応力 σ_n は式(1)となる。

$$\sigma_n = f_{y0} + \frac{f_{B0} - f_{y0}}{10} \times n \quad (1)$$

繰返し載荷後は、破断するまで載荷した。そのときの載荷速度は、タイプI-1は基準速度、それ

以外は高速とした。引張試験および繰返し試験時には鉄筋母材部および圧接部のひずみと、標点間を鉄筋径の8倍(8D)を基準とする伸び変位をレーザー変位計によって測定した。

(2) 金属試験

ガス圧接継手作製後(引張試験前)および引張試験後の試験片の圧接界面、熱影響部、母材部の顕微鏡によるマクロ、ミクロ観察、JIS Z 2244によるビッカース硬さ試験、JIS Z 2242によるシャルピー衝撃試験を行った。

(3) 機械式継手および溶接継手

機械式継手および溶接継手は、常温・基準速度に対し、常温・高速(10%/s)および低温(-40°C)・高速(10%/s)試験とした。繰返し載荷試験はタイプII-4とした。測定項目は、鉄筋母材部、継手部のボルト、ナット、スリーブ、溶接継手部および圧接部のひずみ、機械式継手のスリーブなどの端部にはクリップゲージを貼付して伸出し量と、標点長(4D+継手部+4D)の伸び変位である。

4. ガス圧接継手鉄筋の引張試験結果

いずれの載荷条件でも、試験片の破断のはほとんどは鉄筋母材部の延性的な破壊だったので、以下では鉄筋母材の一般的な力学的性状を示した。

4.1 高速載荷試験

載荷速度を変化させたときのD25の標準圧接の引張強さは図-2のとおりであった。ひずみ速度が10倍速くなるごとに引張強さは約2%増加した。最も速いときの引張強さは、基準速度の場合より約6%増加した。それでも圧接部から破断することなく、圧接が規定どおり適切に施工されていれば、この程度載荷速度が速くなることによる母材の強度増加があっても圧接部で破断することはないものと考えられる。

降伏強度は、引張強さより影響は大きく、ひずみ速度が10倍速くなるごとに約4%増加した。ヤング係数、伸び、絞りは、ひずみ速度に関係なくほぼ一定であった。

4.2 低温・高速載荷試験

引張試験時の温度・速度と引張強さの関係は、図-3のように温度が下がるほど増加した。一次回帰によって求められた引張強さの増加率は、基準速度、高速載荷の場合とも $0.5\sim0.7\text{N/mm}^2/\text{^\circ C}$ (引張強さの約 $0.1\%/\text{^\circ C}$)程度であった。降伏強度の場合も約 $0.4\text{N/mm}^2/\text{^\circ C}$ (降伏強度の約 $0.1\%/\text{^\circ C}$)であった。

ヤング係数、伸び、絞りは温度、速度にかかわらずほぼ一定値であった。今回の試験範囲程度の温度・速度であれば、強度以外の機械的性質にはほとんど影響しないものと考えられる。

ただし、低温時の試験で圧接界面で破断したものが1本あった。そのときの強度は、同一条件で載荷したときの鉄筋母材で破断したときの強度と同等であった。破断面観察の結果、フラット破面と呼ばれる平滑な破面であった。これまで圧接した鉄筋のさまざまな引張試験を1,058本実施し、界面で破断したのはこの1本であった。

4.3 繰返し載荷試験

基準速度時の引張強さに対する各載荷パターンの繰返し載荷後の引張強さは、図-4のとおりであった。タイプI-1の載荷速度は基準速度で行ったためそのほかの結果と比べて強度が小さくなっている(番号1の◇)ので、細い破線で結んである。高速載荷時のデータを黒印で示した(I-1:◆、III-1:●)。III-1のように繰返し回数が多い場合でも、両者(○と●)はほぼ同じであり、I-1の場合のように1回だけの繰返しであれば、III-1よりも条件がゆるやかなので、高速載荷時の引張強さとは

同じと考えてさしつかえないものと考え、太い破線で結んだ。これらの結果から、I→II→IIIへと

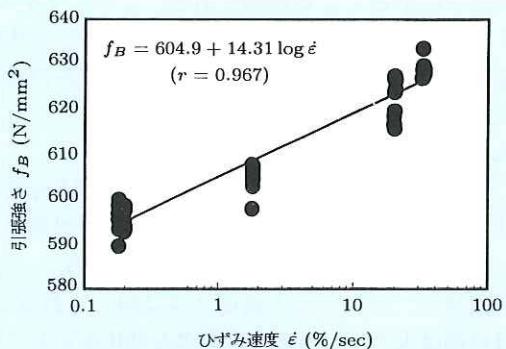


図-2 ひずみ速度と引張強さの関係(D25、標準圧接)

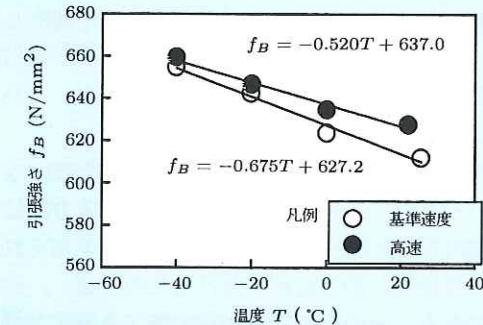


図-3 温度・載荷速度と引張強さの関係(D25、標準圧接)

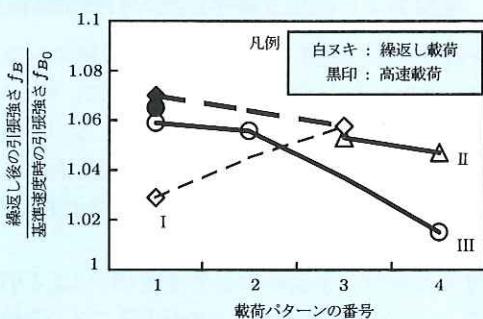


図-4 繰返し載荷パターンと引張強さの関係(標準圧接)

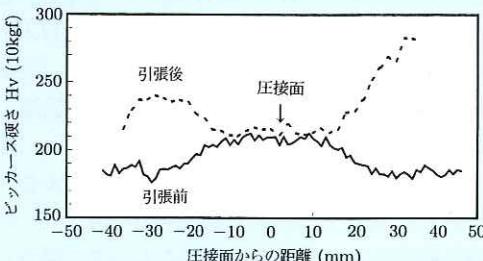


図-5 引張試験前・後の硬さの比較

繰返し応力の振幅が大きくなるほど、また、1→2→3→4と繰返しパターンの番号が大きくなるほど引張強さは小さくなる傾向がある。しかしながら、タイプII-4、III-4のような厳しい繰返しでも基準速度の引張強さを上回っており、高ひずみの正負交番繰返しを受けても十分な強度を有している。

4.4 金属試験

引張試験前・後の圧接部とその周辺の硬さ分布の代表的な例を図-5に示す。引張前は、母材部に比べて圧接部は加熱によって硬くなっている。一方、引張後は、圧接部は引張前とほぼ同じであるが、母材部は大きくなるという顕著な変化を示している。母材の硬さの上昇は、明らかに塑性変形による加工硬化と考えられる。これに対し、圧接部は断面が大きいために応力が小さく、加工硬化しなかったものと考えられる。この結果より、母材部は脆的になっていることを示している。このことはシャルピー衝撃試験でも確認した。

ガス圧接することにより、圧接部は脆的になっているものの、荷重が加わったときの応力度は母材部の方が大きいため、一旦引張を受ければそれ以上に母材部が塑性変形を受けるために硬く、脆的になる。そのため、圧接の施工を規定どおり行えば、圧接部から破断することはないといえる。

5. 溶接および機械式継手鉄筋の引張試験結果

各継手鉄筋の破断位置は、すべて鉄筋母材部であり、伸びのある延性的な破断であった。そこで、両継手の結果は本章でまとめて述べる。なお、以下の検討にあたっては、前章で詳細に調査したガス圧接継手の挙動も併記し、各継手の挙動と比較した。

5.1 強度

図-6に母材の常温時の基準速度(S)による引張強さ f_{B_0} に対する各種継手の載荷方法ごとの降伏強度 f_y 、引張強さ f_B の比を示す。降伏強度は常温・高速(10%/s)載荷(H)の場合は約10%強度が増加した。低温(-40°C)・高速(10%/s)載荷(LH)の場合はさらに数%増加した。引張強さも、増加率は降伏強度ほどではないが、常温・高速、低温・高速になるほど増加した。これらの増加率は、図-2および3のように高速、低温試験結果とほぼ一致しており、鋼材の一般的な強度特性を示している。繰返し載荷の場合(C)の引張強さも高速の場合(H)に近い。

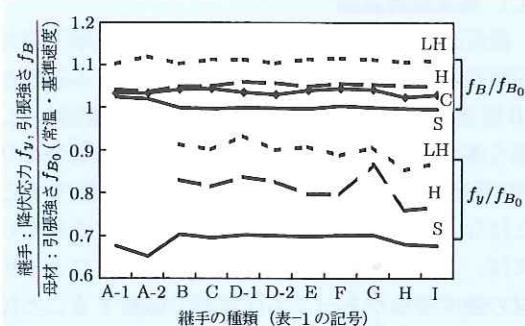


図-6 溶接および機械式継手の強度

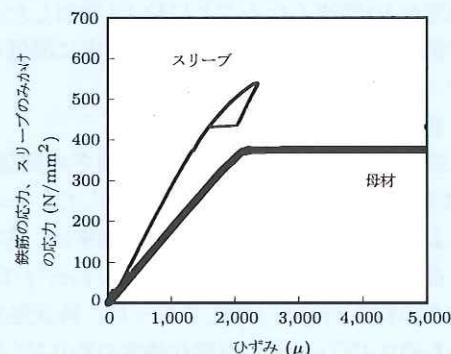


図-7 継手部の応力-ひずみ関係(継手D-2)

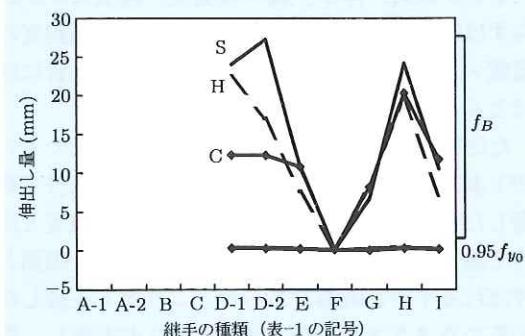


図-8 機械式継手の伸出し量

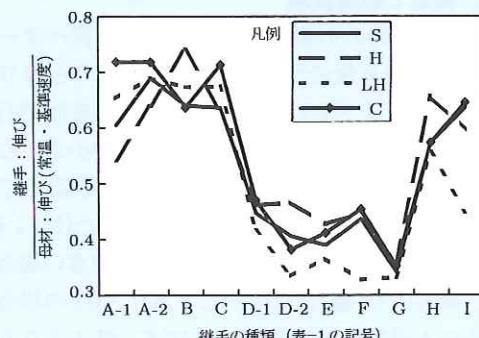


図-9 伸び

5.2 ひずみ

継手 D-2 の鉄筋母材部と継手部スリープの応力とひずみの関係を図-7 に示す。スリープの応力ひずみ関係は、鉄筋が引張強さに達しても十分弾性的であることから、十分な強度を有し、変形性も小さいことが確認された。そのほかの機械式継手のカップラー、スリープ、ナットにおいても、D-2 の場合と同様な特性が確認された。

5.3 伸出し量

機械式継手は、スリープ、ナットなどの端部から鉄筋が塑性変形によって伸び出してくる。降伏応力の 95% 時 ($0.95f_{y0}$) および引張強さ時の伸出し量は図-8 のとおりであった。 $0.95f_{y0}$ 時の伸出し量は、いずれの載荷方法のときも最小 0.05mm～最大 0.52mm とわずかであった。繰返し載荷時の残留伸出し量も 1 回目で 0～0.10mm、4 回目でも 0～0.12mm で非常にわずかであった。

f_B 時の伸出し量は継手の種類によって異なり、継手 F は固相接合されていることから伸出しのほとんどない継手であることがわかる。継手 H はナットの締付力によって緊結されたものであり、 f_B に達すると締付力の効果もなくなり伸出し量は大きくなっている。スリープ充填 D-1、D-2 やスリープ圧着 E、G は、スリープ内の鉄筋が伸び出すことにより伸出し量も大きくなっている。

5.4 伸び

図-9 には母材の伸びに対する各継手の伸びの比を示す。伸びを測定した標点長は、母材 8D に対し機械式継手は (4D + 継手長 + 4D) とし、ガス圧接および溶接継手は接合部を含めて 8D とした。ガス圧接および溶接継手の伸びは、接合部の伸びがほとんどないことから、母材の 60～70% 程度になっている。一方、機械式継手の伸びは、継手の剛性

が高いため、ガス圧接および溶接継手に比べて小さく、母材の 40～60% になっている。ただし、継手 H、I は継手長が短く、伸出し量が大きいので、継手 D～G より大きく、60% 程度になっている。

6. まとめ

各種鉄筋継手について高速載荷、低温・高速載荷、繰返し載荷試験を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 各継手とも各載荷条件下でほとんど鉄筋母材部で破断し、強度上母材と同等のあつかいができる。
- (2) ガス圧接継手は、金属試験の結果から、規定どおり施工されておれば圧接部から破断することはない。
- (3) 機械式継手は、継手構造によって伸び変形量は異なる。

なお、本実験は、ガス圧接継手は(社)日本圧接協会との共同研究で実施したものです。継手の作製方法、検査方法に関する検討を圧接協会が担当し、実験およびとりまとめを土木研究所が担当しました。

謝辞

ガス圧接継手以外では、機械式継手は(社)普通鋼電炉工業会の東京鐵鋼(株)および合同製鐵(株)と、(株)富士ボルト、日本スプライススリープ(株)、岡部テック(株)、溶接継手は日本鋼管工事(株)に協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

森濱和正*



建設省土木研究所
材料施工部
コンクリート研究室
主任研究員
Kazumasa MORIHAMA

河野広隆**



同 コンクリート研究室
Hirotaka KAWANO

加藤俊二***



同 企画部企画課企画係長
(前 コンクリート研究員)
Shunji KATO