

論文 鋼製永久型枠を用いた RC 梁部材の力学特性に関する基礎的研究

寺田 健一郎*1・Sanjay PAREEK*2

要旨: 本研究では、新規開発された鋼製永久型枠を型枠方向および継手の有無により組立形式を変えて作製した鉄筋コンクリート造梁部材の曲げ試験を行い、梁の荷重-たわみ、型枠剥離およびひび割れ状況、剛性並びに補強効果の比較・検討を目的としている。なお、本実験に用いた鋼製永久型枠は施工面から派生した型枠であり、施工性に優れているが、力学的な研究が皆無である。結果として、型枠方向や継手の有無による影響が生じたが、在来型枠工法で作製した試験体と比較すると、全試験体とも降伏点荷重、剛性および最大荷重ともに高い数値を示し、RC 梁の曲げ補強に有効もしくは安全側に評価できることを確認した。

キーワード: 鉄筋コンクリート梁、鋼製永久型枠、剛性、エネルギー吸収量、破壊状況

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート (RC) 構造物における合板を用いた型枠工法 (以下、在来工法) は、合板の原料である丸太の高騰により採算が計れず、合板の生産を停止した企業などが存在すること¹⁾、数回の使用で使い捨てるといった自然環境に悪影響を及ぼすなどの致命的な問題点が挙げられている。以上のことから、在来工法とは違う、新たな型枠の提案が求められていると考えられる。

本研究では、先に述べた問題点を考慮し、施工が比較的簡易であり、コンクリート打設後も躯体と一体となることから RC 構造物の補強効果が期待できる、強度をもつ鋼製永久型枠 (以下、永久型枠) に着目した。本研究で使用する永久型枠は、施工の効率面から派生したものであり、単位質量 4.8kg/m^2 と軽量であるため、現場への運搬・持ち運び作業が容易であること、および厚さ 0.4mm と超薄型であるため、積み重ねて保管をすることで、合板を使用する際より保管スペースが減少されるといった利点を有している。さらには、打設後も型枠自身の取り外しが不要といった点から、工期の大幅な短縮が期待できるといった利点も挙げられる。また、優れた防錆性能を有しているため、鋼製であることから懸念される腐食等の影響はほぼ無く、大型建造物の基礎工事に実用されている。このように、施工面において優れた性能を有するものであることが挙げられるが、本研究で使用する永久型枠自身が耐震補強に準ずる材料特性であるか、さらには、RC 構造物の耐震性にどのような影響を与えるか等の構造的な研究は、皆無である。また、鋼製の永久型枠に関する研究論文例および報告例もほとんどない²⁾。³⁾ 以上の事より、永久型枠を用いた RC 造梁部材を作製し、曲げ耐力試験を行い、実験結果から永久型枠の力学的特性の把握および在来工法による RC 梁との比較・検

討を行った⁴⁾。

2. 実験方法

2.1 使用材料

Table 1 に使用した永久型枠の材料特性を、**Photo 1** にその形状を示す。永久型枠は鋼板表面に特殊な配合を行った亜鉛めっき層を有したものであり、耐食性に優れている。また、 25mm 間隔で折れ目線を有しているため、型枠加工および組立ての施工が容易であること、さらには、 50mm 間隔に設けられている円状の切れ目から、コンクリート打設の際、余剰水分のみ排出されるといった利点を持っている。また、**Table 2, 3** に鉄筋およびコンクリートの材料特性を示す。

Table 1 Properties of permanent steel form

Weight Per Unit Area (kg/m ²)	Thickness (mm)	Yield Strength (N/mm ²)	Young's Modulus E (N/mm ²)
4.8	0.4	195	2.06×10^5

Table 2 Mechanical properties of steel bars

Type of Steel	Yield Strength (N/mm ²)	Yield Strain (%)	Young's Modulus (N/mm ²)	Strain Hardening (%)	Tensile Strength (N/mm ²)	
Main Reinforcement	SD295 D10	362.5	0.20	1.86×10^5	3.02	479.5
Stirrup	SR295 4φ	—	—	—	—	564.8

Table 3 Properties of concrete

Type of Concrete	Compressive Strength (N/mm ²)	Longitudinal Strain (%)	Young's Modulus (N/mm ²)	Shear Modulus (N/mm ²)	Split Tensile Strength (N/mm ²)
Normal Concrete	28.3	0.18	2.57×10^4	1.04×10^4	2.76

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

2.2 試験体概要

Fig.1 中左に試験体形状，配筋およびひずみゲージ貼付位置を，Fig.2 に永久型枠工法による試験体形状を示し，Table 4 に試験体一覧とともに，梁中央における底面永久型枠を引張鉄筋と見なした際の引張鉄筋比を示す。なお，引張鉄筋と見なした鉄筋量は下端筋中央より下部の永久型枠の断面寸法より算出した。梁試験体の全長は，全て 2000mm で，在来工法で作製した試験体は矩形断面 $b \times D = 120 \times 200 \text{mm}$ ，永久型枠工法で作製した試験体は型枠内法寸法 $b \times D = 120 \times 200 \text{mm}$ とした。配筋として，上下主筋は 2-D10（引張鉄筋比 $p_t = 0.68\%$ ），せん断補強筋は最小せん断補強筋比 $p_w = 0.20\%$ を満たすよう $4\phi - @100$ （ $p_w = 0.21\%$ ）とした。また，永久型枠を用いた試験体の補強量（下端筋+底面の永久型枠）とほぼ同等の引張鉄筋量とした試験体との比較を行うため，在来工法で下端

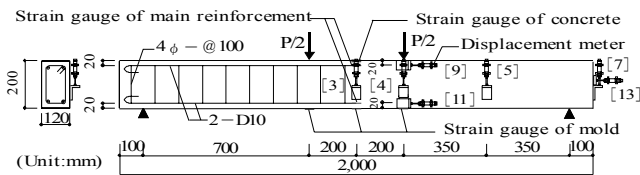


Fig.1 Detail of RC beam for flexural strength test

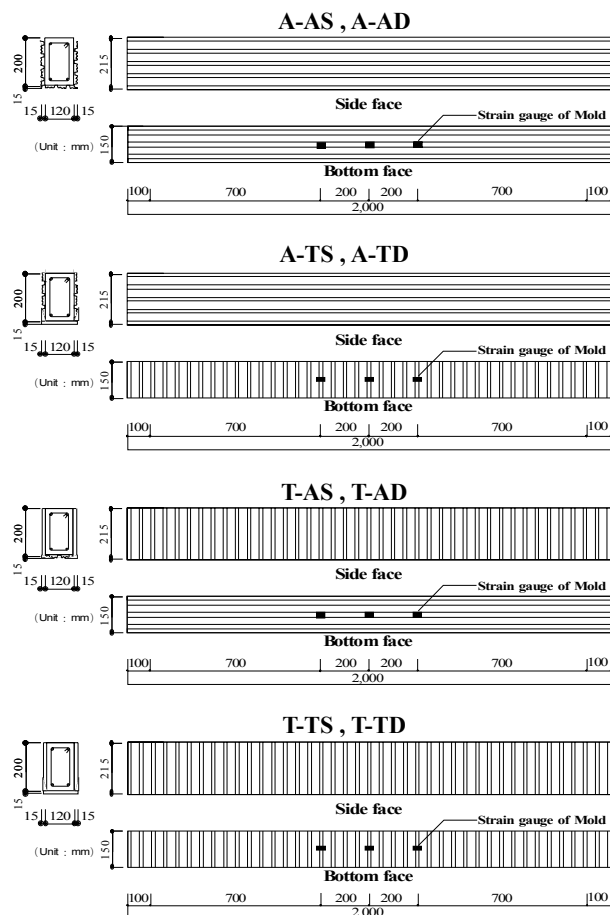


Fig.2 Arrangement patterns of permanent steel forms for RC beams

筋を 3-D10 ($p_t = 1.02\%$) として配筋した試験体（後述の N-2-3）を 1 体作製した。

本実験の試験体は計 10 体であり，永久型枠を組み立てた後打込みを行い，28 日養生を行った。各試験体の種類および名称として，永久型枠が持つ凹凸の断面形状（Photo1 参照）を活用し，凹凸断面が梁軸方向としたものを Axial（以下，A），梁軸と横断方向としたものを Transverse（以下，T）とし，梁側面および底面の型枠方向の様々な組合せにより，試験体を作製した。また，梁中央において，型枠の継手の有無による検討を行うため，継手無しのもは Single（以下，S），継手有りのものは Double（以下，D）と定義した。なお，継手の影響を明確にするため，継手を梁中央に配置し，T 方向では継手長さ 25mm，A 方向では継手長さ 100mm とした。また，各継手は，T 方向で 3 箇所，A 方向で 6 箇所ビス止めによる固定とした。試験体名称の例として，“A-AS”は，側面が梁軸方向（A），底面が梁軸方向で継手無し（AS）として，作製した永久型枠となる。なお，在来工法で作製した試験体において，上下主筋が 2-D10 の試験体を N-2-2，上端筋 2-D10，下端筋 3-D10 の試験体を N-2-3 と称す。

2.3 試験方法

Fig.1 中右に試験体の変位計取り付け位置を示す。なお，変位測定位置は左右対称とする。載荷は，同図内に示すようにアムスラー型万能試験機に設置し，中央から左右各 200mm の位置で 2 点集中単調載荷とした。なお，載

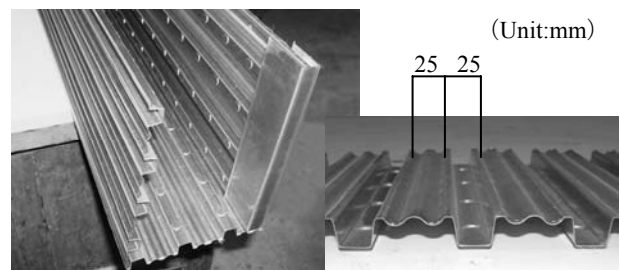


Photo 1 View of corrugated permanent steel form

Table 4 Ratio of tensile reinforcement using permanent steel forms

Type of Specimen	Cross-sectional Area			Ratio of Tensile Reinforcement
	Tensile Reinforcement	Permanent Steel Form	Total	
	a_t (mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	p_t (%)
N-2-2	143	0	143 [1.00]	0.68 [1.00]
N-2-3	214	0	215 [1.50]	1.02 [1.50]
A-AS	143	116	259 [1.81]	1.02 [1.49]
A-TS	143	60	203 [1.42]	0.82 [1.21]
T-AS	143	96	239 [1.67]	0.97 [1.43]
T-TS	143	60	203 [1.42]	0.82 [1.21]
A-AD	143	116	259 [1.81]	1.02 [1.49]
A-TD	143	60	203 [1.42]	0.82 [1.21]
T-AD	143	96	239 [1.67]	0.97 [1.43]
T-TD	143	60	203 [1.42]	0.82 [1.21]

Note, []: Ratio to N-2-2

荷を行う際、梁底面型枠の凹凸により、支持点において荷重が不均一にかかるのを防ぐため、支持点から左右各50mmの位置に石膏を用いて平滑にした。また、載荷中に、荷重、変位および各ひずみ度を、各測定器から連続的に測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 強度結果一覧

Table 5 に初期ひび割れ荷重(P_c)、降伏荷重(P_y)および最大荷重(P_{max})を示す。初期ひび割れ荷重として、N-2-2 および N-2-3 試験体は、目視により確認した値とし、永久型枠による試験体は、目視による確認ができないため、 $P-\delta$ 曲線 (**Fig.3** 参照) において、在来工法による試験体が示す値に近似した範囲において、剛性が低下した時の値とした。降伏荷重は、各試験体とも下端筋降伏時の値とした。

永久型枠工法による試験体は、初期ひび割れ荷重で、同配筋となる N-2-2 試験体の 1.42~1.72 倍、降伏荷重では、N-2-2 試験体の 1.30~1.97 倍とばらつきが生じていることから、弾性範囲内で異なる挙動を示したと考えられる。また、最大荷重においては、N-2-2 試験体の 1.31~1.89 倍と大きな耐力上昇が見られた。継手の有無に関する考察として、T-T シリーズを除く試験体においては、降伏荷重で S (継手無し) 試験体が N-2-2 の 1.70~1.97 倍を示したのに対し、D (継手有り) 試験体は N-2-2 の

1.43~1.59 倍を示した。また、最大荷重においても、S 試験体は N-2-2 の 1.60~1.89 倍を示したのに対し、D 試験体は N-2-2 の 1.31~1.62 倍を示したことから、応力負担が大きいと想定される中央部に継手を設けたことで、負担できる引張力が減少したことが推察される。T-T シリーズに関しては、永久型枠の方向が梁側面、底面ともに T で、永久型枠が凹凸状から板状へと変形(伸張)する挙動が先行したため、他の試験体ほどの顕著な耐力上昇が得られなかったこと、および継手の有無による差がほとんど見られなかったものと考えられる。次に、永久型枠の方向性に関する考察として、S 試験体の値を用いて比較を行った。試験体の最大荷重を降順で示すと、A-AS、A-TS、T-AS、T-TS と、永久型枠の A 方向での使用面積が多い試験体ほど大きな降伏荷重および最大荷重を示

Table 5 Results of beams tested for flexural strength using permanent steel forms

Type of Specimen	Initial Crack Load P_c (kN)	Yield Load P_y (kN)	Maximum Load P_{max} (kN)
N-2-2	9.00 [1.00]	26.14 [1.00]	32.12 [1.00]
N-2-3	9.10 [1.01]	38.80 [1.48]	43.19 [1.34]
A-AS	15.10 [1.68]	51.59 [1.97]	60.79 [1.89]
A-TS	14.65 [1.63]	44.51 [1.70]	55.61 [1.73]
T-AS	15.51 [1.72]	45.04 [1.72]	51.55 [1.60]
T-TS	14.31 [1.59]	34.28 [1.31]	42.93 [1.34]
A-AD	15.27 [1.70]	37.94 [1.45]	41.98 [1.31]
A-TD	13.41 [1.49]	41.44 [1.59]	51.92 [1.62]
T-AD	15.84 [1.76]	37.40 [1.43]	43.99 [1.37]
T-TD	12.74 [1.42]	33.86 [1.30]	44.55 [1.39]

Note, []: Ratio to N-2-2

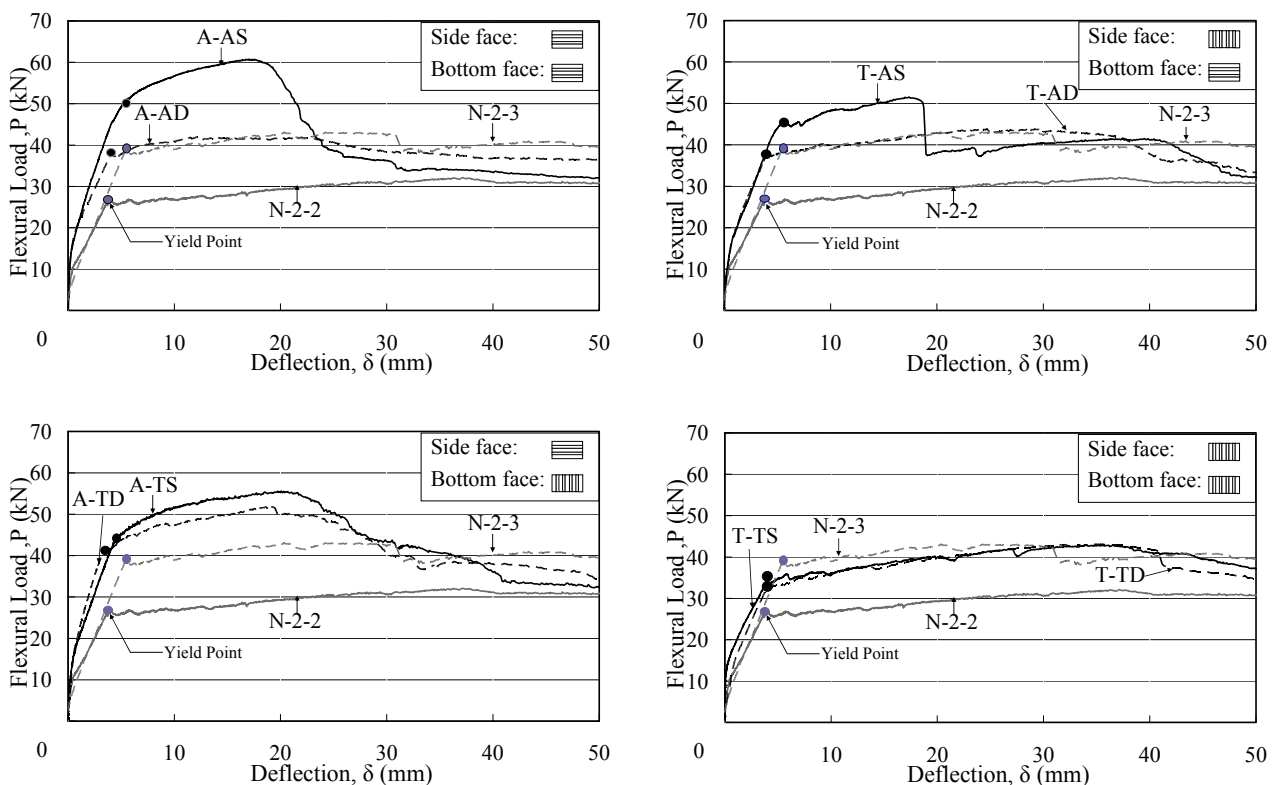


Fig.3 Load(P) - deflection(δ) curves of RC beams tested for flexural strength using permanent steel forms

す傾向が見られた。永久型枠を用いた試験体と N-2-3 試験体との比較においては、S 試験体では、T-TS の降伏および最大荷重値以外の値で N-2-3 を大きく上回り、D 試験体では、初期ひび割れ荷重で N-2-3 を大きく上回った。以上のことから、永久型枠による補強効果が得られ、継手の有無が各強度に大きく影響することが確認できた。

3.2 荷重-たわみ曲線

Fig.3 に荷重 (P) -たわみ (δ) 曲線を示す。たわみは、梁中央の変位計 (Fig.1 に示す変位計 [3]) の値を用いた。図中の●は、引張鉄筋降伏点を示す。

永久型枠を用いた試験体は、永久型枠の断面方向および継手の有無に関わらず、N-2-2 試験体と比較して、曲げひび割れ発生直後 (10kN 前後) に、高い剛性を保持しながら、著しい耐力上昇を示した。また、同等の補強量とした N-2-3 試験体と比較すると、梁側面の永久型枠方向が T の試験体は、T-AS を除き、N-2-3 の試験結果に近似した曲線を示し、 $\delta=35\text{mm}$ 以降で荷重低下を示した。一方、梁側面の永久型枠方向が A の試験体は、大きな最大荷重を示し、 $\delta=20\text{mm}$ 付近で耐力低下を示し、その後、N-2-2 試験体の曲線まで低下する傾向が見られた。以上のことから、梁側面の永久型枠の方向性が RC 梁部材の荷重-変形関係に大きく影響するものと考えられる。次に、継手の有無に関する考察として、S 試験体は、D 試験体と比較して、最大耐力および剛性の上昇が確認できた。しかし、A-AS および T-AS 試験体は、引張側最外縁 (底面) における A 方向の永久型枠が破断したため、急激な耐力低下が見られた。以上までに述べたことから、永久型枠の施工条件が梁部材の復元力特性に与える影響を確認できたため、本工法による設計強度式の提案および靱性能の評価に活用できると考えられる。

3.3 各種剛性

Table 6 に試験体の各種剛性結果一覧を示す。各剛性は、P- δ 曲線における各傾きから算出した値とし、初期剛性 (Kc) は、加力開始から初期曲げひび割れ発生時までの傾きを、二次剛性 (Ky) は、初期曲げひび割れ発生時から下端筋降伏時までの傾きを、三次剛性 (Ku) は、下端筋降伏時から最大荷重時までの傾きと定義し、採用した。

永久型枠工法による試験体は、T-TD を除き、N-2-2 試験体と比較して初期剛性で 0.81~1.65 倍、二次剛性で 1.10~1.85 倍、三次剛性で 1.52~4.97 倍の値を示した。初期剛性では、型枠の形状により初期段階で影響が見られたと考えられるが、二次および三次剛性においては、N-2-2 を大きく上回っているため、永久型枠の補強効果が確認された。N-2-3 との比較においては、二次剛性ではほぼ同等の値であるのに対し、三次剛性では、永久型枠を用いた試験体が N-2-3 の 1.13~3.68 倍の値を示しているため、引張鉄筋降伏後も、永久型枠が応力を大きく

負担し続けていることがうかがえる。また、S 試験体および D 試験体の比較として、初期剛性および二次剛性に関して、際だった差が見られなかったが、三次剛性に関しては T-T シリーズを除く試験体において、S 試験体が D 試験体を上まわる剛性を示したため、継手無しとすることで、下端筋降伏後における永久型枠の応力負担が顕著に増大すると考えられる。T-T シリーズは、型枠の方向性により、永久型枠が凹凸状から板状へと変形する (伸張する) 挙動が先行したため、RC 梁部材の剛性および耐力上昇には、大きく寄与しないことが推測できる。

3.4 エネルギー吸収量

Table 7 に各試験体の $\delta=25\text{mm}$ および 50mm までのエネルギー吸収量一覧を示す。なお、エネルギー吸収量は P- δ 曲線における荷重 (P) を梁中央たわみ (δ) で積分することによって算出した値とした。

永久型枠工法による試験体は、 $\delta=25\text{mm}$ において N-2-2 試験体の 1.37~1.91 倍、 $\delta=50\text{mm}$ においては N-2-2 試験体の 1.33~1.51 倍と高い値を示し、優れたエネルギー吸収量を示したことから、永久型枠を RC 梁部材に用いることによる構造性能に与える有用性が確認された。

Table 6 Stiffness of RC beams tested for flexural strength using permanent steel forms

Type of Specimen	Stiffness		
	Primary Kc (kN/mm)	Secondary Ky (kN/mm)	Tertiary Ku (kN/mm)
N-2-2	30.97 [1.00]	4.98 [1.00]	0.17 [1.00]
N-2-3	13.44 [0.43]	6.23 [1.25]	0.22 [1.35]
A-AS	43.15 [1.39]	6.55 [1.32]	0.82 [4.97]
A-TS	34.07 [1.10]	6.86 [1.38]	0.73 [4.38]
T-AS	26.07 [0.84]	6.16 [1.24]	0.54 [3.28]
T-TS	51.11 [1.65]	5.49 [1.10]	0.29 [1.74]
A-AD	41.38 [1.34]	6.13 [1.23]	0.50 [2.99]
A-TD	32.32 [1.04]	9.22 [1.85]	0.68 [4.10]
T-AD	24.94 [0.81]	6.45 [1.30]	0.25 [1.52]
T-TD	18.20 [0.59]	6.09 [1.22]	0.33 [1.96]

Note, []:Ratio to N-2-2

Table 7 Energy absorption of RC beams tested for flexural strength using permanent steel forms

Type of Specimen	Energy Absorption [kN·mm]	
	$\delta=25\text{mm}$	$\delta=50\text{mm}$
N-2-2	655.4 [1.00]	1433.0 [1.00]
N-2-3	920.9 [1.41]	1923.5 [1.34]
A-AS	1253.2 [1.91]	2105.7 [1.47]
A-TS	1204.9 [1.84]	2159.2 [1.51]
T-AS	1048.0 [1.60]	2019.1 [1.41]
T-TS	895.9 [1.37]	1921.2 [1.34]
A-AD	967.6 [1.48]	1907.7 [1.33]
A-TD	1137.1 [1.73]	2103.7 [1.47]
T-AD	961.0 [1.47]	1948.6 [1.36]
T-TD	900.2 [1.37]	1938.6 [1.35]

Note, δ :Mid-span deflection ; []:Ratio to N-2-2

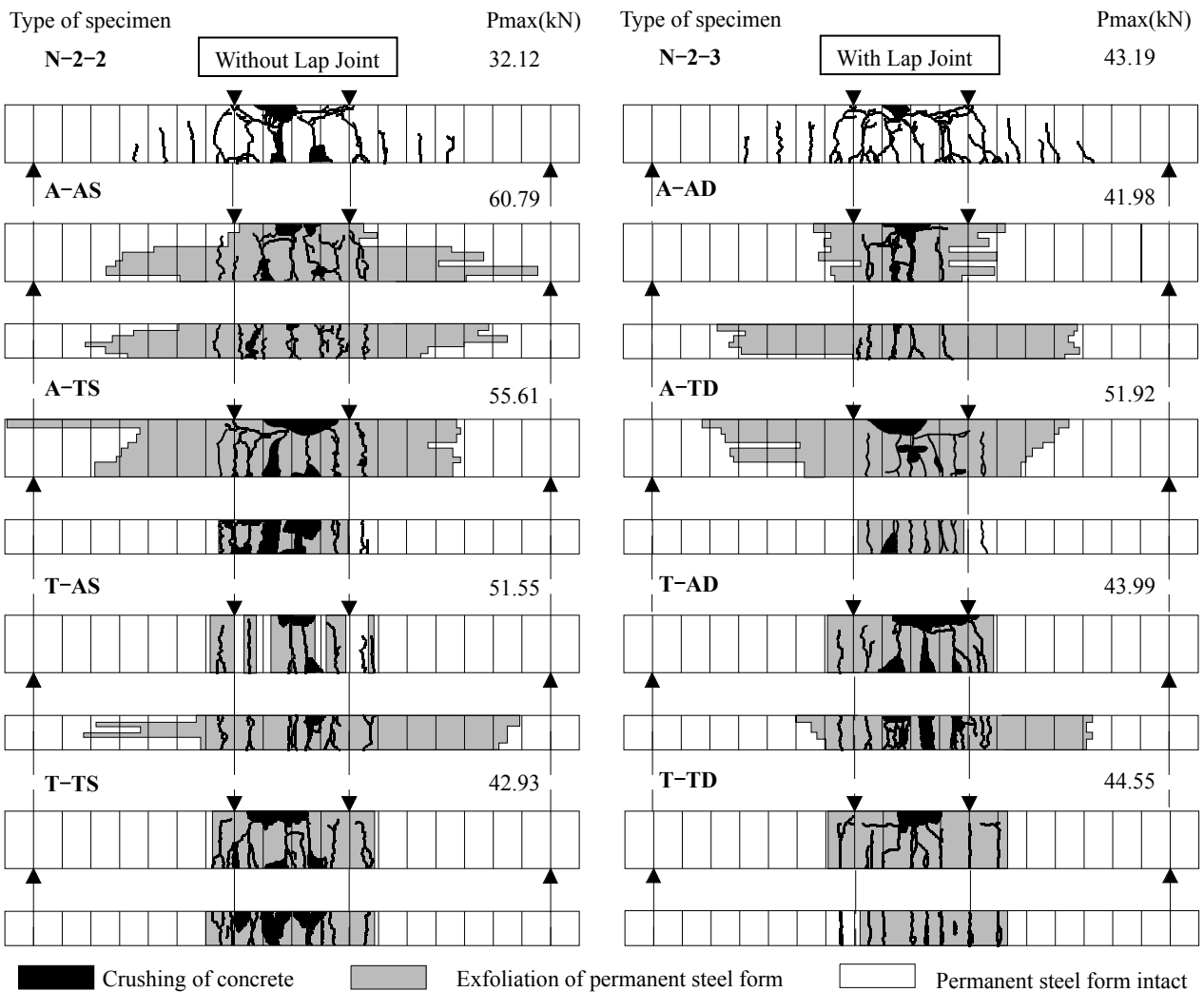


Fig.4 Cracking and exfoliating pattern of RC beams using permanent steel forms after flexural strength test

3.5 ひび割れおよび破壊状況

Fig. 4 に各試験体の曲げ試験後のひび割れ状況および永久型枠の剥離位置を示す。なお、在来工法の試験体は試験中にひび割れを記録した。永久型枠工法の試験体は、試験終了後、永久型枠表面を打診棒で叩き、音による剥離位置の診断を行い、剥離位置の特定を行った後、永久型枠を剥がしてひび割れおよび破壊状況を記録した。N-2-2 試験体は、荷重点間において曲げひび割れが発生した後、荷重点と支点間のせん断スパン中央までと、広範囲にひび割れが見られた。N-2-3 試験体は、N-2-2 試験体と比較して荷重点間に多くのひび割れが見られたが、最終的に N-2-2 と同様の破壊状況に至った。永久型枠工法による試験体のひび割れ状況は、全試験体とも、大きな曲げひび割れが荷重点間だけに集中する傾向が見られ、継手の有無および型枠の方向性による影響は確認されなかった。永久型枠の剥離位置においては、T 方向で使用した永久型枠は、ひび割れが発生している箇所でも剥離が集中している傾向が見られたが、A 方向で使用した永久型枠は、荷重点間だけでなく、荷重点から支点にかけ

での広範囲にわたる剥離が見られた。以上のことから、先に述べた考察のとおり、A 方向は、T 方向と比較して、型枠全体で負担する引張応力が增大し、RC 梁部材の耐力および剛性上昇に大きく寄与していることが裏付けられる。

4. まとめ

- (1) 強度結果より、永久型枠を用いた試験体は、在来工法試験体と比較して、大きな耐力上昇が確認できた。また、引張鉄筋を 3-D10 とした補試験体と比較しても、同等または上回る最大耐力が得られた。
- (2) P- δ 曲線より、曲げ応力が集中する位置での継手の有無、または、梁側面に使用する永久型枠の方向性が変わること、部材の復元力特性に大きな影響を与えることが確認された。
- (3) 各種剛性より、永久型枠を梁軸方向で使用することで、引張鉄筋降伏後も応力を大きく負担していることが推察できたことから、永久型枠の方向性は、RC 梁部材の剛性および耐力上昇に大きく寄与していると考

えられる。

- (4) エネルギー吸収量より、永久型枠を用いることで、RC 梁部材の耐震性能が改善されると考えられる。
- (5) ひび割れおよび破壊状況より、永久型枠を用いた試験体は、在来工法の試験体と比較して、曲げひび割れが集中する傾向が見られた。また、永久型枠の剥離部分の検証結果から、永久型枠を梁軸方向で用いることで、応力負担が広範囲にわたり、部材の剛性および耐力上昇に大きく寄与していることが裏付けられた。
- (6) 本実験および検討結果より、本研究で使用した鋼製永久型枠の基礎的な力学的特性、永久型枠の方向性および継手の有無が RC 梁部材の耐力、剛性および靱性能に及ぼす影響を明確にした。

謝辞

本研究は、2009 年度日本大学工学部研究費による助成を受けた結果の一部である。また、本実験の実施にあたり、日本環境製造株式会社 の鎌田義雄社長、山和正常務、片岡賢治主任には多大なご協力頂きました。鹿島建設株

式会社東北支店の縄田桂三氏には本実験を始めるのにあたり貴重なご意見を頂きました。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本経済新聞 2008.9.9
- 2) 坂井俊治, 小野定, 大和竹史, 楠貞則: レジンコンクリート永久型枠を用いた RC 素材の載荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 17, No. 2, pp.153-158, 1995.
- 3) 堀井克章, 栗田工, 多田孝, 寺野伸吾: 産業廃棄資源のみからなる現場打ちコンクリートと繊維補強セメントモルタル製永久型枠との複合化, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1495-1500, 2005.
- 4) Sanjay PAREEK, 倉田光春, 外山隆吉: RC 梁の連続繊維シートによる曲げ補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.1477-1482, 1999.