

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート床版の輪荷重走行疲労試験

オリエンタル白石(株)正会員 工修 ○杉田 篤彦
 オリエンタル白石(株)正会員 博(環境学) 二井谷教治
 岡山大学大学院 正会員 博(工学) 藤井 隆史
 岡山大学大学院 正会員 博(工学) 綾野 克紀

Abstract : To examine the fatigue characteristics of concrete bridge slab using blast furnace slag fine aggregate, a wheel load running fatigue test with rubber tire was carried out on three specimens. Test specimens were basically designed in accordance with the specifications for highway bridges, 1964. The thickness of the slab was 160 mm and the top surface of the specimens was kept in wet condition using curing mat. One specimen was made of ordinary concrete having designed strength of 35Mpa with conventional fine aggregate. Other two specimens had same shape and arrangement of re-bars except for concrete having higher designed strength of 50Mpa with blast furnace slag fine aggregate. Fatigue life of two specimens with concrete using blast furnace slag fine aggregate were longer than that of the specimen with ordinary concrete. This result is decisive because of deference in concrete strengths. Further verifications of fatigue properties of concrete slabs are needed. Displacements at the center of the specimen with ordinary concrete were simulated by the Ducom, 3 dimensional FEA. Analytical deformations agreed well with test results. It was found that the Ducom is very useful with verification of the fatigue properties of wheel load running fatigue tests.

Key words : Blast furnace slag sand, Concrete bridge Slab , Wheel load running fatigue test

1. はじめに

高炉水砕スラグを細骨材に使用したコンクリートは、凍結融解抵抗性が高く、また塩害に対しても耐久性が高いことが既往の研究から明らかである¹⁾²⁾。一方、道路橋床版の損傷メカニズムは、既往の研究からほぼ明らかにされている³⁾⁴⁾。とくに輪荷重走向試験機の活用が大きく寄与しており、既設RC床版の損傷メカニズムの解明、疲労耐久性、新しい形式の床版の疲労耐久性を評価することが可能となっている。本研究では、塩害や凍害環境下で耐久性のある高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの床版疲労耐久性に着目して、輪荷重走向試験を行った。輪荷重試験では、普通砕砂のコンクリート床版および接合部を有した床版について、たわみ性やひび割れ性状を比較した。材料特性の違いもあり、普通砕砂コンクリート床版が6.4万回で破壊した。走行試験で破壊に至らなかった供試体については、最後に定点集中載荷試験を行い、床版の残存耐荷力を確認した。実験の範囲内で接合部の有無は、変形量に差異はなく同程度の耐荷性があることが分かった。

2. 試験概要

2.1 供試体

供試体の一覧を表-1、供試体の形状寸法を図-1、2に示す。供試体は合計3体を製作した(長さ2,800mm×幅3,200mm×床版厚さ160mmとした一体成形の供試体を2体、幅350mmの場所打ち接合部を有する供試体を1体)。床版の劣化を顕著にするために、昭和39年道路橋示方書で設計することから床版厚は160mmとし、図-3、写真-1に示す接合部も薄くでき、床版取替え工事で多く採用され

表-1 RC床版供試体の一覧

供試体番号	床版厚(mm)	床版形状(mm) 床版支間 2,500mm	目地有無	主鉄筋 (上段:圧縮 下段:引張)		配力鉄筋 (上段:圧縮 下段:引張)		コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	細骨材	配合 番号
				呼び径	間隔(mm)	呼び径	間隔(mm)			
S1	160	2,800×3,500	無	D16	300	D10	300	36.2	硬質砂岩	No. 1
S2			無	D16	150	D13	300	85.7	高炉スラグ 細骨材	No. 2
S3			有	1,575×2,800-2枚, 接合部幅 350				(77.3)接合部		

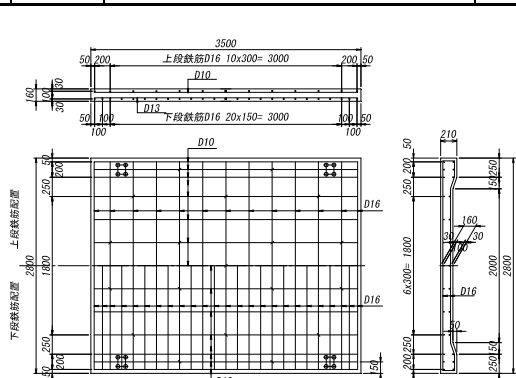


図-1 供試体の形状・寸法(一体)

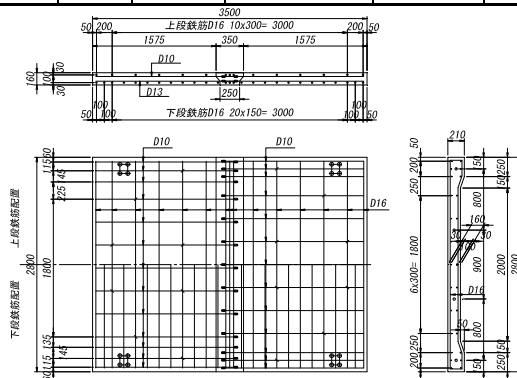


図-2 供試体の形状・寸法(接合部有り)

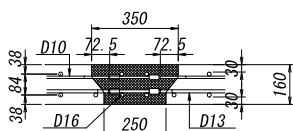


図-3 接合部の配筋図



写真-1 接合部鉄筋組立状況

表-2 コンクリートの配合表

配合番号	水セメント比 W/C (%)	空気量 Air (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					高性能 AE減水剤 (C×%)	増粘剤 (C×%)	AE剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
				水 W	セメント C	細骨材S		粗骨材 G				
						砕砂 CS	高炉スラグ 細骨材BFS					
No. 1	65.0	4.5	48.0	170	262	885	—	967	0.40	0.00	0.003	0.00
No. 2	40.0	2.0	43.0	153	383	—	839	1,065	1.10	0.04	0.000	0.03

ている継手構造とした。

2.2 使用材料

結合材には、早強ポルトランドセメント(密度 3.13g/cm³, ブレーン値 4,600cm²/g), 粗骨材には、硬質砂岩砕石(最大寸法 20mm, 表乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 0.56%)を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂(表乾密度 2.63g/cm³, 吸水率 2.00%, 粗粒率 2.93)および高炉スラグ細骨材(表乾密度 2.77g/cm³, 吸水率 0.69%, 粗粒率 2.14)を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤, AE 剤, 消泡剤および増粘剤を用いた。鉄筋は、JIS G 3112 鉄筋コンクリート用棒鋼に適合する SD345 D16, D13 および D10 を使用した。

2.3 コンクリートの配合

使用したコンクリートの配合を表-2に示す。No.1の配合は、床版を昭和39年道路橋示方書で設計することから、コンクリート圧縮強度を35N/mm²となるように水セメント比65%の配合とした。No.2の配合は、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートで、プレキャスト床版を想定してコンクリートの圧縮強度を50N/mm²となるように水セメント比40%の配合とした。高炉スラグ細骨材は、練り混ぜ時にエントラップドエアが多くなることから、消泡剤を使用し、高性能AE減水剤も合わせて使用した。なお、接合部のコンクリートも同様な配合としている。

3. 床版の輪荷重走行試験

3.1 ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機の概要²⁾

本実験で使用した輪荷重走行試験機は、ゴムタイヤを装着した自走式である。写真-2にゴムタイヤ式輪荷重走行試験機を示す。この自走式試験機は、ゴムタイヤを装着した台車に油圧モータが設置され、チェーン駆動でタイヤが回転駆動するものである。ゴムタイヤであることから直接、床版に載荷することができる特長があり、実橋に近い載荷形態である。表-3にゴムタイヤ式輪荷重走行試験機の概要を示す。走行試験では、航空機用のゴムタイヤを使用し、荷重を載荷して走行させている。走行区間は、12.5mで、供試体を3枚直列に敷き並べ、同一条件で試験を行った。

3.2 実験方法

実験供試体は、輪荷重走行試験機に床版支間 2.5m で直列に配置し、隣接する部分も支持した 4 辺支持となっている。隅角部は、浮き上がりを防止するために回転拘束しないように固定した。載荷段階は、荷重一定とし、載荷荷重は 200kN とし、一定荷重を載荷した。たわみの計測は、床版中央にて 1, 10, 100, 200, 500, 1,000, 2,000, 5,000, 1 万回で行い、それ以降は 1 万回ごとに計測を行った。走行試験装置概要と床版配置を図-4に示す。床版に疲労の影響を大きくさせるため、水張りに近い状態を考慮した。そこで、床版上面を湿潤に近い状態とするため、走行区分の両脇に保水性の高い養生マットを敷設して試験を行った。

表-3 ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機の概要

項目	仕様	
試験装置	寸法	幅 3.0m × 長さ 15m
形状寸法	ピット	幅 3.7m, 深さ 1.0m
車輪	種類	航空機用ゴムタイヤ 産業車両用ゴムタイヤ
性能	負荷荷重	航空機用ゴムタイヤ： 60kN~280kN
	定速走行速度	0.4~5.5km/hr
	走行区間	最大 12.5m



写真-2 ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機

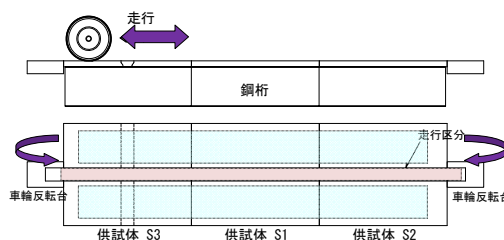


図-4 輪荷重走行試験装置、床版配置

4. 試験および解析の結果と考察

4.1 床版上面・下面のひび割れ状況

各供試体床版の試験終了時のひび割れ図を図-5に示す。供試体 S1 は、走行載荷回数 64,189 回で破壊に至った。ひび割れは最初に床版支間に直角方向に発生し、その後、繰り返しの走行載荷によって、隅角部から床版中央に向かってひび割れが発生し、橋軸方向に伸展した。ひび割れは、走行載荷回数 2,000 回でほぼ形成され、その後の繰り返しの走行載荷によって、ひび割れ幅の増大やひび割れの伸展があった。床版中央部分では、走行回数の増加にともなってひび割れは格子状になっていった。走行回数が 2 万回で、床版上面からひび割れが貫通し、床版上面の水が下面にしみでた。また、ひび割れ面のすり磨き、ひび割れ部の角欠けにより、コンクリートの部分的な欠落も生じた。総たわみ量が 20mm を越えたため、供試体 S1 は破壊と判定し、床版を取り外し、走行用鋼製桁を取り付けて試験を再開した。

供試体 S2, S3 は、88,475 回まで荷重載荷を行った。この時点で、走行装置の都合から載荷を中止して、試験終了とした。供試体 S2 は、走行載荷回数 100 回目で床版支間中央にひび割れが発生した。また隅角部から中央部に向かってひび割れが発生した。2,000 回でひび割れが多く見られるようになり、5,000 回では、床版支間方向のひび割れも見られるようになった。走行載荷回数 5 万回で、ひび割れが格子状に伸展しているが、ひび割れ幅の増大は見られなかった。

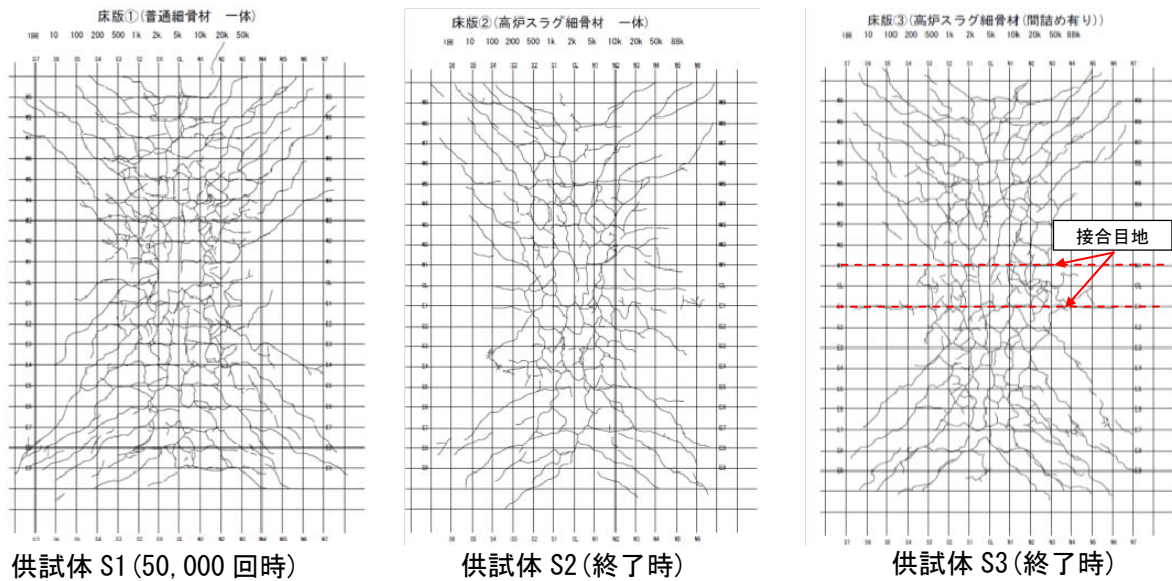


図-5 各供試体のひび割れ図

接合部のある供試体 S3 は、走行載荷回数 100 回目で床版中央に顕著なひび割れが発生した。また、接合目地に沿ってひび割れも一部見られた。接合部にひび割れの発生は、床版部よりも少なく、2,000 回から床版支間方向にもひび割れの発生が見られた。走行載荷回数 2 万回では支間中央から隅角部に向かったひび割れが多く発生し、またひび割れが格子状に形成されていった。また、目地に沿ったひび割れも見られ、目開きも生じていた。上面に設置した養生マットからの水が下面の目地にしみ出ているのが、走行載荷回数 2 万回を経過したのちに見られた。5 万回以降は、ひび割れ数の増加は少なく、ひび割れが格子状に進展していった。

4.2 床版中央点たわみの載荷による経時変化

走行回数による床版中央部の静的載荷によるたわみの変化と、コンクリート構造物のコンクリート構造の打設から供用終了まで、長期にわたる材料特性と構造応答を時空間で追跡する 3 次元構造-材料応答連成解析 (DuCOM) ³⁾ で載荷たわみ量の解析を行った結果を図-6 に示す。

供試体 S1 の終了時には、たわみが 20.3mm に達している。供試体 S1 の載荷たわみは、走行回数が 3 万回以降でたわみが急激に大きくなっており、3

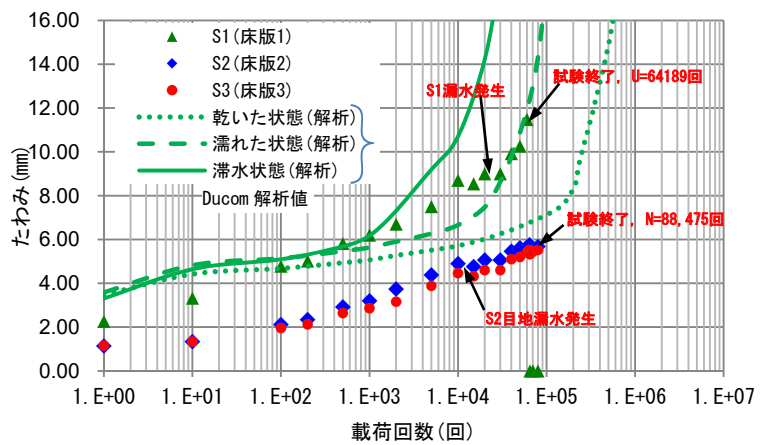


図-6 載荷回数-たわみ図

万~6 万回にかけては、9.0mm から 11.5mm と 2.5mm 増加している。このことは、今回の実験条件を鑑みたコンクリート床版の乾いた状態、濡れた状態および滞水状態を解析に反映して行った中で、濡れた状態での解析値と実験値が比較的近い値となっている。

今回の床版疲労試験では、濡れた状態に近づけ、水の影響を受けやすい状況とするため、養生マット敷設し散水を行っており、滞水と乾燥との中間であるとする、今後の輪荷重走行試験などの疲労解析を行う上で有効な解析手法であることが分かった。ただし、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの構成則が明らかにする必要がある。一方、供試体 S2, S3 の載荷たわみに差異はなく、接合部がない供試体 S3 の方が若干載荷たわみは大きい。たわみ量は、載荷回数にともなって漸増しており、走

行回数が3万回を超えてからも、S1に比べて、増加量は緩やかである。また、供試体S1とS2、S3とでは、おおよそ2倍の荷重たわみに差があり、コンクリート強度、弾性係数の違いが大きく影響していると考えられる。最終計測でのたわみは、供試体S3が5.7mm、供試体S2が5.5mmであった。

4.3 輪荷重走行試験後の床版耐力試験

輪荷重走行試験を終えた供試体S2およびS3について、単調静的荷重による残存耐力試験を行った。試験概要図を図-7に、状況写真を写真-3に、試験後のひび割れ図を図-8示す。

中央部の変位が約60mmで荷重の大きな増加が見られないことと、床版固定部のコンクリートのひび割れが生じたことから、荷重試験を終了とした。ひび割れは、走行試験のひび割れ幅が大きくなり、変形にともなって四隅からのひび割れが多く生じた。終了近くでは、床版上面に押し抜きせん断破壊の兆候も見られた。荷重試験に先立って、材料非線形3次元FEM解析による床版耐力解析(DIANA Ver9.6)を行った。解析モデルは対称性を考慮した1/4モデルとし、RC床版はソリッド要素、主筋、配力筋、幅止め筋は埋込み鉄筋要素としてモデル化した。鉄筋とコンクリートの付着は完全付着とし、主筋と配力筋は同位置にモデル化した。図-9に材料モデル、解析モデルを示す。荷重試験による荷重-変位図と解析値を図-10に示す。

解析値の初期の荷重-変位の傾きが急であるのに対して、実験値は、傾きが緩やかである。解析モデルは、処女荷重を想定しているのに対して、実験では、輪荷重走行試験による床版のひび割れが初期剛性を低下させているためと考える。それ以外は、概ね解析値と実験値は、ほぼ同じ形状で推移している。

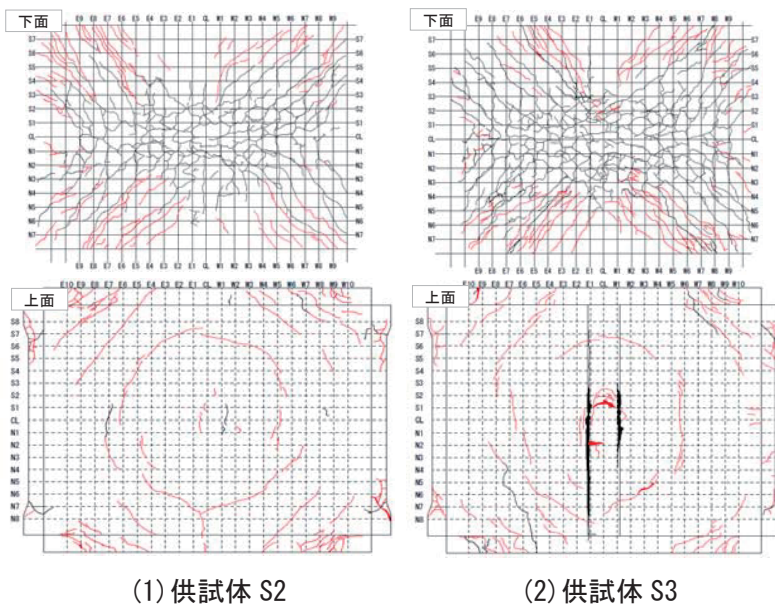


図-8 床版耐力試験後のひび割れ図

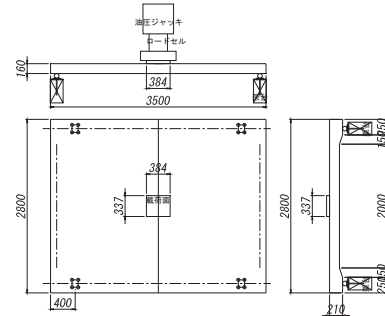


図-7 床版載荷試験概要図



写真-3 床版耐力試験状況

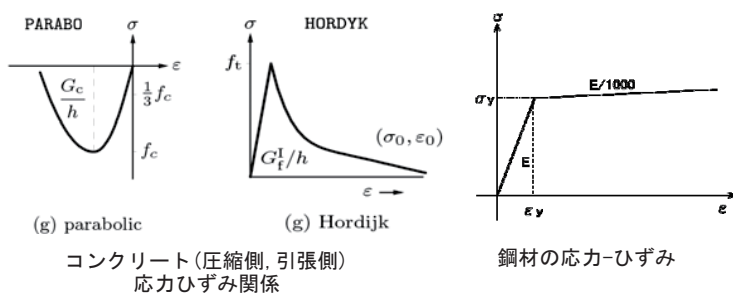
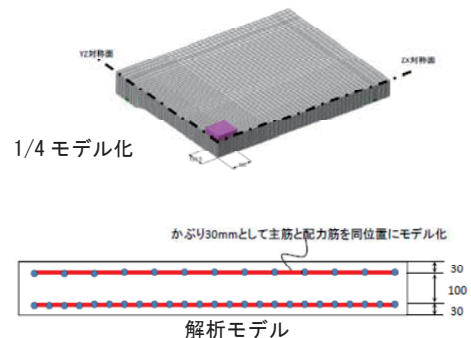


図-9 材料および解析モデル



供試体S3の荷重値がわずかに大きいですが、接合部の有無による荷重の大きな差は見られず、ほぼ同等の耐荷性能である。接合部は、鉄筋が重ね継手の様に配置されており、載荷点直下では、鋼材が供試体S2に比べて多いため、若干大きい荷重になったと考えられる。

5. まとめ

以下に本論文で得られた知見と課題を示し、本論文のまとめとする。

- ①コンクリート強度の違いはあるが、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリート床版は、普通砕砂を使用したコンクリート床版に比べ、同一の載荷条件下で載荷回数を上回る疲労耐荷性能があり、たわみも小さい。
- ②DuCOM による普通砕砂のコンクリート床版の解析では、湿潤状態を想定した実験であるが、実験値と解析値が近い値で推移していることから、比較的精度良く再現でき、有効な解析手法である。
- ③高炉スラグ細骨材を使用したコンクリート床版の輪荷重走行試験でひび割れが発生した床版耐力は、初期載荷を受けていない床版の解析による耐力と比較すると、ほぼ同等の載荷荷重であることから、実験の範囲内の繰り返し荷重を受けても、耐荷性能を保持していることがわかった。
- ④接合部は、特殊加工鉄筋の継手構造であるが、一体の床版とほぼ同等の耐荷性能を有することがわかった。
- ⑤DuCOM による高炉スラグ細骨材のコンクリート床版の解析には、その使用による乾燥、湿潤状態の土砂化などの劣化が解明されていない理由から、コンクリートの引張軟化曲線などの構成則を明らかにする必要がある（現在検討を進めている）。
- ⑥接合目地においては、早期にひび割れの発生が生じていたことから、目地処理方法や粗度処理程度の評価方法、また接合目地に着目した定点疲労試験を行い、接合目地の改良に関する要素検討が必要である（現在検討を進めている）。

謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：NEDO）によって実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤井隆史ほか：コンクリートの耐久性に及ぼす高炉スラグ細骨材の影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第13巻， pp. 1-6， 2013. 11
- 2) Paweena JARIYATHITIPONG, 藤井隆史ほか：高炉スラグを用いたコンクリートの塩害環境下における凍結融解抵抗性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol. 67， pp. 427-433， 2014. 2
- 3) 松井伸二ほか：ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機による既設RC床版の疲労特性，第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集， pp. 161-166， 2000. 10
- 4) 三田村浩ほか：道路橋RC床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響，構造工学論文集，Vol. 55A， pp. 1420-1431， 2008. 9
- 5) 前川宏一ほか：非線形解析技術 ―ナノからマクロへの連携―，プレストレストコンクリート ―PCとコンクリート構造―，Vol. 43， No. 2， pp. 43-49，プレストレストコンクリート技術協会，2001. 3

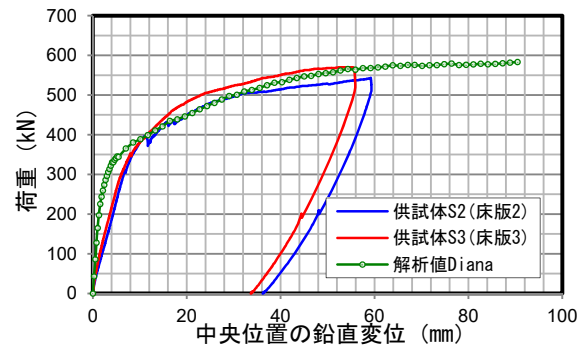


図-10 荷重-変位図