熊本地震により損傷したフーチングの破壊メカニズム推定に関する実験的検討

（株）高速道路総合技術研究所　正会員　○西谷　朋晃　長谷　俊彦
NEXCO 西日本コンサルタンツ（株）　正会員　李　首一　中谷　隆生
i エンジニアリング（株）　正会員　大森　卓也　木村　大吾

1. 目的

平成 28 年熊本地震により，木山川橋 P11 橋脚（下り線）の可動支承が破損して擬似的に固定化したことで，設計で想定した以上の地震時慣性力が橋脚天端に作用し，**写真-1** に示す橋脚の傾斜やフーチングのせん断破壊等が生じた．しかし，当該フーチングは柱前面から杭位置までの距離がフーチング厚の 1/2 よりも短く，道路橋示方書ではせん断照査が不要となる形状であり，被災時のようなせん断破壊は想定されていなかった．また，当該橋脚の杭は鋼管杭であり，杭とフーチングの接合は杭をフーチング内に埋込む「方法 A」が採用されていたが，せん断破壊面は柱前面とフーチング内に定着された杭外面で生じており，一般的な斜めひび割れではなく，一面せん断破壊の形状であった．このように，当該フーチングの破壊形態はこれまでに想定されていないものであったため，本研究では，その破壊メカニズムを推定する目的で，供試体による載荷実験を実施した．

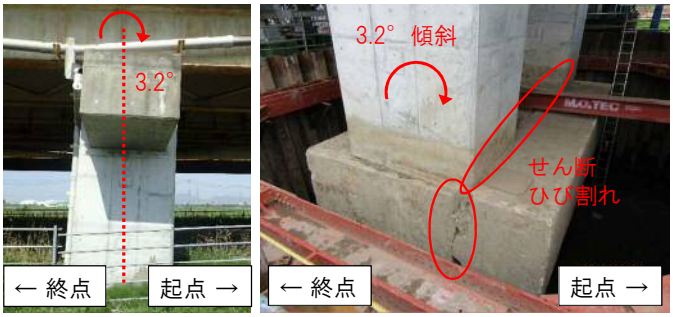


写真-1 木山川橋の被災状況

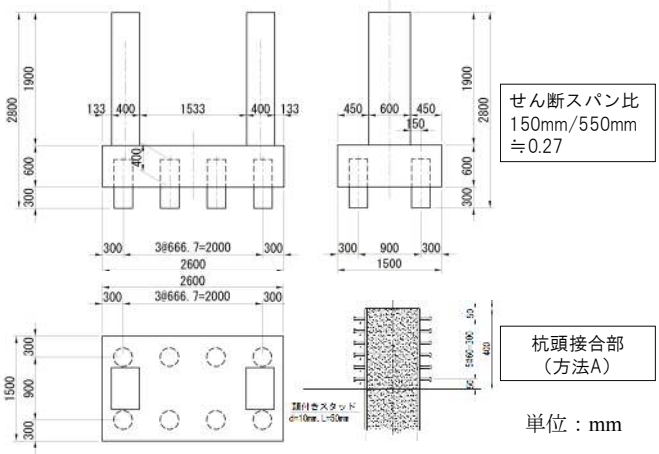


図-1 供試体概要

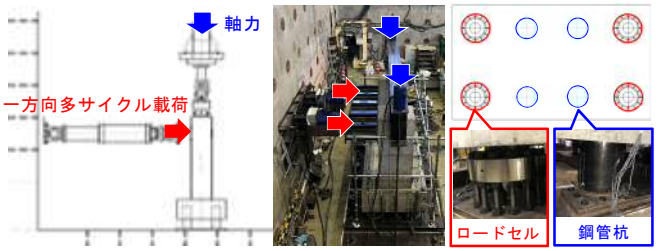


図-2 載荷試験状況

2. 実験概要

2.1 供試体概要

図-1 に，供試体概要を示す．供試体の寸法は実橋の 1/3 スケールとし，配筋は供試体寸法と同様に，実鉄筋量及び鋼材量の 1/3 とした．ただし，柱と鋼管杭については，最大荷重載荷時においてフーチングよりも先行破壊しないような鉄筋量及び鋼管板厚とした．

2.2 載荷方法

図-2 に，載荷試験状況を示す．供試体には実橋の 1/3 に相当する死荷重 1,143 kN を軸力として載荷した後に，水平ジャッキを用いて水平力を単調載荷した．

2.3 計測方法

表-1 に，供試体の計測項目及び計測箇所を示す．なお，杭頭反力は，四隅に設置したロードセルにより計測した．

表-1 計測項目及び計測箇所

項目	計測箇所	
鉄筋ひずみ	柱鉄筋	
	フーチング上面	橋軸方向，橋軸直角方向
	フーチング下面	
	杭頭スタッド・鉄筋	
杭反力	ロードセル	
コンクリートひずみ	柱	前面
		背面
	フーチング上面，下面	
変位	柱	
	フーチング　水平方向，上下方向	

3. 実験結果

写真-2 に供試体の損傷状況，**図-3** に柱の載荷点位置における水平荷重と水平変位の関係，**図-4** に各載荷ステップの鉄筋ひずみ及びひび割れ分布を示す．水平荷重が 600

キーワード　熊本地震，フーチング，杭頭接合方法，せん断スパン比，破壊メカニズム
連絡先　〒194-8508　東京都町田市忠生 1-4-1　（株）高速道路総合技術研究所　TEL：042-791-1943

© Japan Society of Civil Engineers

kN に達した時点から柱の引張側となるフーチングの後趾側において割裂や鉛直方向のせん断力が作用したことにより，鉛直せん断ひび割れが発生し始め，水平荷重が 1,000 kN に達した時点でフーチング上面主鉄筋が最初に降伏した．水平荷重の増加に伴い，フーチングのひび割れ範囲が大きくなり，5 δy の時点で水平荷重が最大に達した．その後は耐力低下とともに変位が増大し，10 δy に達した時点で載荷を終了した．

4. 破壊メカニズムの推定

4.1 杭とフーチングの接合方法の影響

最初に供試体に発生した鉛直せん断ひび割れは，実橋と同様，埋込まれた鋼管杭の外縁とほぼ同位置に発生していたため，鋼管埋込み部が弱点となり破壊が進展した可能性が考えられた．そこで，フーチングの有効高をパラメータとし，フーチングのせん断耐力とそれに相当するせん断力発生させる水平力をはりモデルを用いて算出した．その結果，**図-5** に示すとおり，有効高が 200 mm の場合，フーチングにせん断ひび割れが発生するための水平力は 540 kN 程度で，供試体に鉛直ひび割れが発生し始めた時点の水平力 600 kN とほぼ一致する．したがって，実際にせん断耐力に寄与した有効高は設計で想定した有効高（**図-5** Case d4）よりも小さく，鋼管埋込み部が構造上の弱点となったことが確認された．

4.2 載荷条件の影響

実橋では柱の圧縮側に一面せん断ひび割れが発生していたのに対して，供試体では柱の引張側に鉛直方向のせん断ひび割れが発生しており，その発生箇所が異なっていた．これは，載荷条件やフーチングの固定条件の違いが一因であると考えられるが，実橋では，前震・本震ともに橋軸方向でレベル 2 地震相当の繰返し交番荷重が作用したことが確認されている．したがって，実橋の破壊メカニズムとして，最初に柱の引張側となる後趾側のフーチングに鉛直ひび割れが発生することで，フーチングの鉛直方向の有効断面が減少した．その後，レベル 2 地震相当の繰返し交番荷重による圧縮力を受けた際に，弱点となったフーチングの付け根付近に一面せん断ひび割れ等の損傷が生じたと推定される．

写真-2 供試体の損傷状況（実験終了時）

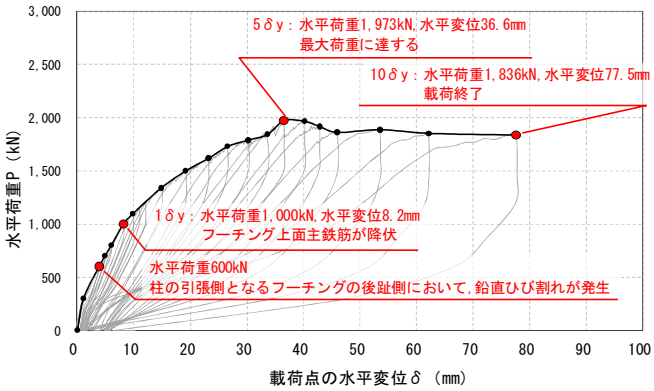


図-3 水平荷重と水平変位の関係

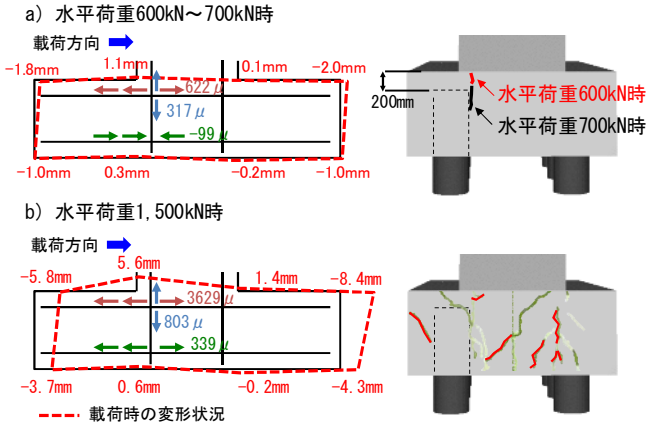
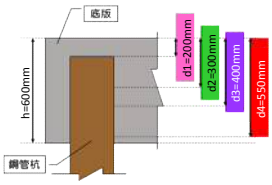


図-4 各載荷ステップの鉄筋ひずみ及びひび割れ分布



Case	有効高 d (mm)	せん断耐力（計算値） Sc (kN)	Sc相当発生時の載荷点の水平力（計算値） P (kN)	備　考
d1	200	309	540	実験では，載荷点の水平力600kNに達した時点からフーチングに鉛直ひび割れが発生した．
d2	300	491	618	
d3	400	924	798	
d4	550	1,707	1,100	

図-5 フーチングのせん断耐力の算出結果

5. まとめ

熊本地震で損傷したフーチングの破壊メカニズムを推定するために，供試体による載荷実験を実施した．その結果，フーチングの鋼管埋込み部付近で，実際にせん断耐力に寄与した有効高が設計で想定した有効高より小さく，構造上の弱点となったことが確認された．また，実橋は可動支承の擬似固定化により設計で想定した以上の地震時慣性力が作用したことに加えて，レベル 2 地震相当の繰返し交番荷重により，実験で確認された弱点部から損傷が進展したと推定された．今後，解析により実験との整合性等について検討を行う予定である．

【謝辞】本研究は，土木研究所，首都高速道路（株）及び阪神高速道路（株）との共同研究の一環として実施した．

© Japan Society of Civil Engineers